

ISSN 2215-2202  
Impreso ISSN 0377-9424

# AGRONOMÍA COSTARRICENSE

REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
COLEGIO DE INGENIEROS AGRÓNOMOS  
MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA

[www.cia.ucr.ac.cr](http://www.cia.ucr.ac.cr)  
[www.mag.go.cr/rev\\_agr/index.html](http://www.mag.go.cr/rev_agr/index.html)



Julio - Diciembre 2024

Volumen 48

Número 2

## AGRONOMÍA COSTARRICENSE

Revista semestral de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Costa Rica, El Colegio de Ingenieros Agrónomos, y el Ministerio de Agricultura y Ganadería

### DIRECTOR

Nevio Bonilla Morales  
Ministerio de Agricultura y Ganadería  
San José, Costa Rica.

### EDITOR

Manuel Ernesto Camacho Umaña  
Centro de Investigaciones Agronómicas  
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

### ASISTENTE EDITORIAL

Rosibel Serrano Gómez  
Centro de Investigaciones Agronómicas  
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

### PORTADA

En relación con el artículo:  
“Crecimiento y acumulación de nutrimentos en la variedad de papa Elbe-UCR” de Ulloa-Calvo *et al.*



**AGRONOMÍA  
COSTARRICENSE**

*ahora en línea*

Visite la Revista

[www.mag.go.cr/rev\\_agr/index.html](http://www.mag.go.cr/rev_agr/index.html)

[www.cia.ucr.ac.cr](http://www.cia.ucr.ac.cr)

Los miembros del Consejo Editorial y el Consejo Editorial Asesor Internacional realizan un arbitraje permanente de los trabajos publicados en la Revista Agronomía Costarricense.

## CONSEJO EDITORIAL

Fernando Mojica Betancur  
Colegio de Ingenieros Agrónomos, Costa Rica.  
Francisco Saborío Pozuelo  
Universidad de Costa Rica, Costa Rica  
Jorge Alberto Elizondo Salazar  
Universidad de Costa Rica, Costa Rica.  
Mario Villatoro Sánchez  
Universidad de Costa Rica, Costa Rica.  
Primo Luis Chavarría  
Colegio de Ingenieros Agrónomos, Costa Rica

## CONSEJO EDITORIAL ASESOR INTERNACIONAL

Aixa Ofelia Rivero Guerra  
European Centre for Applied Statistics S. L., España  
Alcido Elenor Wander  
Embrapa Rice and Beans, Brasil  
André Mendes Jorge  
Universidade Estadual Paulista – UNESP, Brasil  
Beatriz Irene Eibl  
Universidad Nacional de Misiones, Argentina  
Danilo Pezo  
Tropical Agriculture Research and Training Center (CATIE), Perú  
Francisco Paulo Chaimsohn  
Investigador Independiente, Brasil  
Guadalupe Valdovinos Ponce  
Colegio de Postgraduados, México  
Gustavo J. Lascano  
Clemson University, USA  
Héctor Horacio Murcia Cabra  
Universidad de Santo Tomás (USTA), Colombia  
Héctor Mario Andrade Montemayor  
Universidad Autónoma de Querétaro, México  
Hugo Antonio Tobías Vásquez  
Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala  
Jorge Dionisio Etchevers Barra  
Colegio de Posgraduados, México  
Jorge Hernán Chiriboga Pareja  
Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Brasil  
José Ezequiel Villarreal Núñez  
Universidad de Panamá, Panamá  
Laura Bertha Reyes Sánchez  
Universidad Nacional Autónoma de México, México  
Martha Nascimento Castro  
Faculdade Araguaia, Brasil  
Mónica Matilde Barbazán Pacheco  
Universidad de la República, Uruguay  
Olegario Muñiz Ugarte  
Instituto de Suelos del Ministerio de la Agricultura (MINAG), Cuba  
Patrice Cannavo  
Institut Agro Rennes-Angers, Francia  
Raúl E. Jaramillo Velasteguí  
International Plant Nutrition Institute, Ecuador  
Renato de Mello Prado  
Universidade Estadual Paulista–UNESP, Brasil  
Rogelio Nogales Vargas-Machuca  
Estación Experimental del Zaidín, España

Revista Agronomía Costarricense / Centro de Investigaciones Agronómicas.

Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Teléfono 2511 2080. Correo electrónico: [rac.cia@ucr.ac.cr](mailto:rac.cia@ucr.ac.cr)

ISSN 2215-2202

# AGRONOMÍA COSTARRICENSE

---

**REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

COLEGIO DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA

Volumen 48

2024

Número 2



---

## REVISORES ESPECIALIZADOS

---

### Revisores Nacionales

Adrian Pinto  
 Alexander Kaune  
 Alexis Villalobos  
 Alfredo Alvarado H.  
 Alfredo Bolaños  
 Allan González  
 Andrés Hernández  
 Antonio Bogantes  
 Arturo Brenes A.  
 Bernal Azofeifa  
 Bernal Herrera  
 Bernal Valverde  
 Bernardo Vargas  
 Bryan Alemán  
 Carlos Alfaro  
 Carlos Alpizar  
 Carlos Luis Loria  
 Carlos Rodríguez V.  
 Carmela Velásquez  
 Claudia Fernández  
 Cristina Chinchilla  
 Cristina Vargas  
 Dagoberto Arias  
 Daniel Ramirez  
 Daniel Saborío  
 David Mora  
 Dennis Barquero  
 Denis Hine  
 Dennis León  
 Diego Berrocal  
 Diógenes Cubero  
 Douglas Marín  
 Edgar Vidal  
 Eduardo Barrantes  
 Edwin Orozco  
 Elías de Melo  
 Eric Mora N.  
 Eugenio González  
 Federico Albertazzi  
 Felipe Arauz C.  
 Felipe Arguedas  
 Fermín Subirós R.  
 Francisco Mesén  
 Francisco Saborío  
 Franklin Herrera  
 Freddy Soto  
 Gabriel Garbanzo  
 Gabriela Chinchilla  
 Geiner Matamoros  
 Geovanny Garro  
 Gilbert Barrantes  
 Guillermo Araya  
 Gustavo Fallas  
 Gustavo Quesada  
 Héctor Medrano  
 Helga Blanco M.  
 Hugo Aguilar  
 Ileana Moreira  
 Ingrid Varela  
 Ismael Hernández  
 Jesús Céspedes  
 Jorge Camacho  
 Jorge C. Vargas  
 Jorge Elizondo  
 Jorge Leiva  
 Jorge Mora B.  
 Jorge Sandoval  
 Jorge Segura  
 José L. Corrales  
 José P. Jiménez  
 José P. Vargas  
 Juan José Romero

Juan R. Navarro  
 Julieta Carranza  
 Julio Arias  
 Julio César Calvo  
 Julio Rodríguez  
 Karolina Villagra  
 Kenneth Largaespada  
 Kenneth Madriz  
 Laura Segura  
 Laura Solís  
 Leida Castro  
 Leslie Medina  
 Lidieth Uribe  
 Lisela Moreira  
 Lorena Flores  
 Lorena Uribe  
 Luis Barboza  
 Luis Brenes Q.  
 Luis Calvo  
 Luis Diego Arroyo  
 Luko Hilje  
 Marcela Alfaro  
 Marco Adamson  
 Marco Lobo  
 Marco V. Sáenz  
 Marcos Chaves  
 María Isabel González  
 Maricruz Ramírez  
 Marianella Alfaro  
 Mario Saborío  
 Mario Villatoro  
 Marta Montero  
 Marvin Araya  
 Marvin Vargas  
 Mauricio Serrano  
 Michael González  
 Miguel Barquero  
 Milagro Granados  
 Mónica Blanco  
 Natalia Barboza  
 Natalia Soto  
 Néstor Chaves  
 Noé Salazar  
 Olman Murillo  
 Orlando Carrillo  
 Orlando Chinchilla  
 Óscar Arias  
 Óscar Castro  
 Patricia Quesada  
 Patricia Ramírez  
 Rafael Mata  
 Ramiro Alizaga  
 Ramón Mezzón  
 Ramón Molina  
 Randall Chacón  
 Randy Chinchilla  
 Raúl Botero  
 Rebeca Sandoval  
 Rebeca Zamora  
 Renato Jiménez  
 Ricardo Piedra  
 Roberto Azofeifa  
 Roberto Camacho  
 Roberto Ramírez  
 Roberto Villalobos  
 Rodolfo Araya  
 Roger Fallas  
 Roger Muñoz  
 Rubén Calderón  
 Rubén Ortiz  
 Ruth de la Asunción  
 Ruth León G.  
 Sergio Abarca

Shirley Rojas  
 Stephanie Quirós  
 Susana Cascante  
 Sigso Acuña  
 Victor Hugo Porras  
 Victor Julio Vargas  
 Victoria Arronis  
 Victoria García  
 Vidal Vega  
 Walter Marín M.  
 Walter Peraza  
 Werner Rodríguez  
 Wilbert Phillips  
 William Rivera  
 William Sánchez  
 Yannery Gómez

### Revisores Internacionales

Abellino Pity (Honduras)  
 Adriana Murillo W. (EE.UU)  
 André Finkler (Brasil)  
 Andrea C. Montenegro (Colombia)  
 Andrés Búcaro (Guatemala)  
 Amaury Espitia (Colombia)  
 Aura Morales (El Salvador)  
 Avi Goldsmith (EE.UU)  
 Beatriz Eibl (Argentina)  
 Bernardo Villegas (Colombia)  
 Carlos Faúndez U. (Chile)  
 Carlos Orrego (Colombia)  
 Carolina Zamorano (Colombia)  
 Cesáreo Rodríguez H. (México)  
 Corina Bernigaud (Uruguay)  
 Consuelo Estevez (Puerto Rico)  
 Daniel Carreira (Argentina)  
 Edgar Amezcuita (Colombia)  
 Emilio Olivares Sáenz (México)  
 Ermita Hernández (Puerto Rico)  
 Francisco Coll (Cuba)  
 Francisco Ibarra P. (México)  
 Francisco P. Chaimsohn (Brasil)  
 Géri E. Meneghello (Brasil)  
 Guadalupe Valdovinos P. (México)  
 Guillermo Reyes (Nicaragua)  
 Héctor M. Andrade M. (México)  
 Hernán Chiriboga P. (Ecuador)  
 Hugo del Cid H. (Guatemala)  
 Ignacio E. Paunero (Argentina)  
 Ildefonso Pla Sentis (España)  
 Jaime Garzón (Colombia)  
 Jorge Etchevers B. (México)  
 José A. Lezcano Barrozo (Panamá)  
 José A. Ordoñez (Honduras)  
 José Cartagena (Colombia)  
 José E. Villarreal (Panamá)  
 José Barrera Violet (Colombia)  
 José M. Tapia (México)  
 José Moure (España)  
 José R. Bárcena G. (México)  
 Juan Carlos Rosas (Honduras)  
 Juan F. Gallardo (España)  
 Juan F. Barrera G. (México)  
 Juan Pedro Agostini (Argentina)  
 Julián F. Becerra (Colombia)  
 Kolima Peña Calzada (Cuba)  
 Kellen Gatti (Colombia)

Lérica Almaguel (Cuba)  
 Leonides Castellanos R. (Colombia)  
 Leopoldo Álvarez (Argentina)  
 Luis Barahona Amores (Panamá)  
 Luis Castresana (España)  
 Luis Felipe Lata (Brasil)  
 Manuel Reigosa (España)  
 Manuel Sandoval (México)  
 Marcela Guerrero (Colombia)  
 Marta Nascimento C. (Brasil)  
 Mauricio Arango (Colombia)  
 Nolver Arias Arias (Colombia)  
 Olegario Muñiz Ugarte (Cuba)  
 Óscar A. Guzmán P. (Colombia)  
 Óscar G. Campos (Guatemala)  
 Patricia Moreno (Colombia)  
 Patrice Cannavo (Francia)  
 Ramiro Ramírez P. (Colombia)  
 Ramón Rivera (Cuba)  
 Raúl Zapata (Colombia)  
 Reynaldo Mendoza (Nicaragua)  
 Roberto Fernández (Argentina)  
 Roberto Ferreira (Brasil)  
 Rolando Cifuentes (Guatemala)  
 Rosa Mª Arias (México)  
 Rubén Cabanillas Cruz (México)  
 Santiago M. Sáenz (Colombia)  
 Sergio Hernández (México)  
 Sonia Ospina (Colombia)  
 Tania Mulkay (Cuba)  
 Victor Hugo Porras (Colombia)  
 Víctor Ordaz Chaparro (México)  
 Wuellins Durango (Ecuador)  
 Yisa María Ochoa (México)  
 Yolanda Moguel (México)

# AGRONOMÍA COSTARRICENSE

## REVISTA EN LÍNEA

Si desea visitar la Revista Agronomía Costarricense puede hacerlo a través del

**Portal de Revistas Académicas de la Universidad de Costa Rica** <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost>

**Ministerio de Agricultura y Ganadería** [http://www.mag.go.cr/rev\\_agr/index.html](http://www.mag.go.cr/rev_agr/index.html)

**Centro de Investigaciones Agronómicas** [www.cia.ucr.ac.cr](http://www.cia.ucr.ac.cr)

También puede encontrarla en los siguientes índices internacionales:

	LATINDEX (Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal)
	REDALYC (Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal)
	SciELO (Scientific Electronic Library Online)
	SIDALC (Sistema de Información y Documentación Agropecuaria de las Américas)
	INIS Atomindex (International Nuclear Information System)
	Base AGROC
	DIALNET
	DOAJ (Directory of Open Access Journals)
	AGRIS
	REDIB (Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico)
	PERIÓDICA (Índice de Revistas Latinoamericanas de Ciencias)
	Ulrich's
	OCLC World Cat
	CAB Abstracts

	COPAC
	ROAD (Directory of Open Access Scholarly Resources)
 Food and Agriculture Organization of the United Nations	FAO Online Catalogues
	SHERPA/RoMEO
	Organization for tropical studies
	Gale (Cengage Company)
	DGB UNAM
	CONRICyT (Consortio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica)
	CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe)
	LA Referencia (Red de repositorios de acceso abierto a la ciencia)
	Zoological Record
	Academic Search Complete
	MIAR (Matriz de Información para el Análisis de Revistas)
	SABIO
	SUDOC

#### CANJES

Universidad de Costa Rica  
 Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información  
 Unidad de Selección y Adquisiciones  
 -CANJE  
 Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
 Costa Rica

#### DIRECCIÓN

REVISTA AGRONOMÍA COSTARRICENSE

Centro de Investigaciones Agronómicas  
 Universidad de Costa Rica  
 San José, Costa Rica  
 Teléfono 2511-2080  
 Correo electrónico: rac.cia@ucr.ac.cr

#### CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial Universidad de Costa Rica  
 administracion.siedin@ucr.ac.cr  
 www.editorial.ucr.ac.cr  
 Apartado Postal 11501  
 2060 Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
 Costa Rica

#### Número suelto:

Costa Rica      ₡ 3060.00 incluye el 2% de IVA

#### Suscripción anual:

Costa Rica      ₡ 8160.00

América Latina,  
 Asia y África      US\$ 20.40

Resto del mundo      US\$ 71.40

## AGRONOMÍA COSTARRICENSE

Revista semestral de ciencias agrícolas de la Universidad de Costa Rica, el Colegio de Ingenieros Agrónomos y el Ministerio de Agricultura y Ganadería.

**VOLUMEN 48**

**2024**

**NÚMERO 2**

### Artículos científicos

- Crecimiento y acumulación de nutrimentos en la variedad de papa Elbe-UCR ..... 9-29  
*Eric Ulloa-Calvo, Manuel E. Camacho-Umaña y Arturo Brenes-Angulo*
- Análisis de calidad de cacao utilizando espectroscopía de infrarrojo cercano portable: Desafíos para diferenciación geográfica ..... 31-43  
*Paola Quesada-Arguedas, Carlos Hernández-Aguirre, Alejandro Vargas-Martínez y Alejandra Mencia-Guevara*
- Procesos erosivos en Andisoles cultivados con cebolla (*Allium cepa* L.): Contribución del sedimento adherido al bulbo a la pérdida del suelo y sus nutrimentos ..... 45-63  
*Silvia Marín-Araya, Mario Villatoro-Sánchez y Manuel E. Camacho-Umaña*
- Evaluación de dos métodos para aplicaciones agroquímicas (spray boom y dron) en el cultivo del arroz ..... 65-81  
*Esteban Arroyo-Mejías, Isaac Venegas-Méndez, M. Melissa Rojas-Downing y Alejandra María Rojas-González*
- Efecto de prácticas de agricultura de conservación en la producción de maíz en el sistema milpa en Yucatán, México ..... 83-94  
*Carlos Aldair Gamboa-Cimé, José Bernardino Castillo-Caamal, Rodolfo Vilchis-Ramos, Jorge Santiago Santos-Flores y Alan García-Lira*
- Calidad poscosecha del ñame (*Dioscorea alata* L.) en Costa Rica: Factores que afectan durante el curado y almacenamiento del tubérculo ..... 95-110  
*Maricruz Ramírez-Sánchez, Johanny Castro-Chinchilla, Marco Vinicio Sáenz-Murillo y Gerardina Umaña-Rojas*
- Identificación morfológica y molecular de potenciales hongos nematófagos en fincas bananeras de la región Huetar Atlántica de Costa Rica ..... 111-131  
*Berlioth Ugalde-Monge, Roy Artavia-Carmona, Irena Hilje-Rodríguez y Walter Peraza-Padilla*

## Notas técnicas

Determinación del número de repeticiones para un experimento en agricultura: Importancia de la variabilidad y tamaño del efecto . . . . . 133-142  
*Jorge Claudio Vargas-Rojas, Alejandro Vargas-Martínez y Eduardo Corrales-Brenes*

Ciclos de aplicación de un bioestimulante sobre el desarrollo de plantas de café en viveros . . . . . 143-149  
*Yusdel Ferrás-Negrín, Carlos Alberto Bustamante-González y Vidalina Pérez-Salina*

Influencia del extracto de *Ascophyllum nodosum* en el enraizamiento de *Mentha spicata* L. . . . . 151-158  
*Pablo Fernando Luna-Rodríguez, Hans Marcelino Munguía-Falcon, Isabel Elena Mogollón-Ortega, Excela Elizabeth Saavedra-Flores, Claudia Paz Romero-Ayala, María Fernanda Siancas-Carrasco, Martha Andrea Márquez-Bautista, Cecilia Emperatriz Figueroa-Serrudo, Isabel Maximiliana Montes-Yarasca y Héctor Baroni Cántaro-Segura*

Efecto de bioestimulantes sobre el crecimiento y la producción de pepino y melón en invernadero. . . . . 159-168  
*Julio Gabriel-Ortega, Mirian Chilan-Mata, Washington Narváez-Campana, Fernando Ayón-Villao, William Merchán-García, Heidi Flores-Ramírez y Gema Burgos-López*

## Revisión de literatura

Potencial hídrico y contenido del agua en el suelo: Métodos de análisis disponibles y sus implicaciones en el manejo de los recursos suelo y agua. . . . . 169-200  
*Carlos Hidalgo-Campos y Manuel E. Camacho-Umaña*

## CRECIMIENTO Y ACUMULACIÓN DE NUTRIMENTOS EN LA VARIEDAD DE PAPA ELBE-UCR

*Eric Ulloa-Calvo<sup>1</sup>, Manuel E. Camacho-Umaña<sup>2/\*</sup>, Arturo Brenes-Angulo<sup>3</sup>*

**Palabras clave:** nutrición mineral; crecimiento vegetal; *Solanum tuberosum*; fertilización; Andisoles.

**Keywords:** mineral nutrition; plant growth; *Solanum tuberosum*; fertilization; Andisols.

**Recibido:** 03/07/2024

**Aceptado:** 26/08/24

### RESUMEN

**Introducción.** El cultivo de la papa representa una actividad fundamental en la economía costarricense. Desde el 2015, la variedad Elbe-UCR está disponible en la agrocadena de papa, y es considerada como promisorio debido a su alta tolerancia a patógenos, plagas insectiles y condiciones de sequía, así como sus elevados rendimientos (mayores a 40 t ha<sup>-1</sup>). Pese a lo anterior, no se tienen estudios sobre crecimiento y acumulación de nutrientes que permitan una mejor planificación de la fertilización del cultivo, con miras a una producción más sostenible. **Objetivo.** Desarrollar y validar las curvas de acumulación de nutrientes en la variedad de papa Elbe-UCR, cultivada en la Zona Norte de Cartago. **Materiales y métodos.** Se recolectaron muestras de la biomasa de la planta cada 15 días después de la siembra (dds), las cuales se separaron en

parte aérea, tubérculo y raíz, para determinar su masa fresca y seca, así como su concentración de nutrientes. **Resultados y discusión.** La variedad Elbe-UCR acumuló un valor promedio de materia seca de 12016 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds, de los cuales el 70% correspondió a la biomasa del tubérculo. Para un rendimiento de 40 t ha<sup>-1</sup>, esta variedad acumuló un total de 195, 20, 312, 54, 16, y 20 kg ha<sup>-1</sup> de N, P, K, Ca, Mg y S, respectivamente. También, acumuló un total de 336, 123, 6250, 337, y 213 g ha<sup>-1</sup> de Zn, Cu, Fe, Mn y B, respectivamente. **Conclusión.** La variedad Elbe-UCR presentó una gran capacidad de acumulación de Ca y K, y no requiere los niveles altos de N que aplican regularmente los productores en Costa Rica. Los resultados obtenidos en el presente trabajo se consideran básicos para el manejo correcto de la fertilización y desarrollo de formulaciones comerciales para esta variedad, con miras a una producción más sostenible.

\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: manuel.camachoumana@ucr.ac.cr  
1 Eurosemillas S.A. Cartago, Costa Rica.  
 0009-0007-0485-2824.

2 Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía y Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.  
 0000-0001-7589-8327.  
3 Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.  
 0000-0001-8770-6863.

## ABSTRACT

**Growth and nutrient accumulation in the Elbe-UCR potato variety. Introduction.** Potato crop represents a fundamental activity within the Costa Rican economy. Since 2015, the Elbe-UCR variety has been available in the potato agrifood chain, being considered as promising due to its high tolerance to pathogens, insect pests, and drought conditions, as well as its high yields (greater than 40 t ha<sup>-1</sup>). Despite this, there are no studies about growth and nutrient accumulation that would allow a better fertilization planning for this potato variety, aiming to attain sustainable production. **Objective.** To develop and validate nutrient accumulation curves for the Elbe-UCR potato variety, cultivated in the Northern Zone of Cartago. **Materials and methods.** Biomass samples were collected every 15 days after planting (dap), which were

separated into aboveground biomass, tuber, and root, to determine their fresh and dry mass, as well as their nutrient concentration. **Results and discussion.** The Elbe-UCR variety accumulated an average dry matter value of 12016 kg ha<sup>-1</sup> at 135 dap, of which 70% corresponded to the tuber biomass. For a yield of 40 t ha<sup>-1</sup>, this variety accumulated a total of 195, 20, 312, 54, 16, and 20 kg ha<sup>-1</sup> of N, P, K, Ca, Mg, and S, respectively. It also accumulated a total of 336, 123, 6250, 337, y 213 g ha<sup>-1</sup> of Fe, Cu, Zn, Mn, and B, respectively. **Conclusion.** The Elbe-UCR variety showed a great capacity for Ca and K accumulation and does not require the high levels of N regularly applied by producers in Costa Rica. The results obtained in this study are considered fundamental for the management of fertilization and the development of commercial formulations for this variety, aiming for a more sustainable production.

## INTRODUCCIÓN

El cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) representa la cuarta actividad agrícola más importante a nivel mundial después del cultivo del trigo (*Triticum aestivum* L.), el arroz (*Oryza sativa* L.) y el maíz (*Zea mays* L.) (Brenes *et al.* 2002, Earle 2020). En Costa Rica, para el 2023 se reportó un total de 3104 ha cultivadas con papa, de las cuales el 58% se ubica en las zonas altas de Cartago, con una producción total de 47292 toneladas en este sector (SEPSA 2024).

La producción de papa se ve fuertemente afectada por fenómenos climáticos, fluctuaciones en el mercado internacional, y el manejo del cultivo (Prasad 2018). En relación con este último aspecto, existen factores bióticos de importancia económica en el cultivo de la papa dentro de los cuales destacan los patógenos: el tizón tardío (*Phytophthora infestans* Mont. de Bary) y la marchitez bacteriana (*Ralstonia solanacearum* Smith); en adición a plagas insectiles como el minador de la hoja de papa

(*Liriomyza huidobrensis* Blanchard) (Brenes *et al.* 2002, Gómez-Alpízar *et al.* 2007).

Un manejo integrado del cultivo de la papa (MICP) resulta fundamental para lograr la producción deseada de una forma sostenible y a un menor costo económico (Connel *et al.* 1991). Dentro de estos sistemas de manejo integrado destacan dos componentes de suma importancia: 1) el uso de cultivares mejorados genéticamente, tolerantes a plagas y enfermedades y altamente productivos (Bonnell 2008); y 2) un programa de fertilización del cultivo que contemple sus necesidades nutricionales óptimas para un rendimiento específico (Soratto *et al.* 2021).

Desde 1997, existe en Costa Rica un programa dedicado al mejoramiento genético del cultivo de la papa, a cargo del Laboratorio de Biotecnología de Plantas del Centro de Investigaciones Agronómicas en la Universidad de Costa Rica (LBP-CIA-UCR), el cual ha logrado con éxito la liberación de varias variedades (Brenes y Gómez-Alpízar 2009). En el 2015, este programa puso a disposición de la agrocadena de la papa

la variedad Elbe-UCR, un cultivar de papa con alta tolerancia al tizón tardío (*P. infestans*) y al minador de la hoja (*L. huidobrensis*), así como una muy alta productividad (mayor a 45 t ha<sup>-1</sup>) y resistencia a las condiciones de sequía y estrés.

Dentro del manejo de la nutrición mineral y la fertilización de los cultivos, es necesario conocer la tasa de acumulación de nutrientes en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo (curvas de acumulación de nutrimentos) (Bertsch 1998). El objetivo de estas curvas de acumulación de nutrimentos es cuantificar los requisitos nutricionales mínimos del cultivo para obtener un rendimiento específico, los cuales permiten la planificación de la fertilización de un cultivo (Bertsch 2003). Para el cultivo de la papa en Costa Rica, en la literatura se cuenta con diversos estudios de acumulación de nutrimentos para variedades como *Floresta*, *Granola*, y *MF-80* (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009).

Pese a lo anterior, no se cuenta con un estudio de crecimiento y acumulación de nutrimentos específico para la variedad Elbe-UCR, la cual debido a sus características deseables y vigor de planta se proyecta como una variedad muy promisoriosa para la producción de papa en potenciales escenarios de sequía, lo cual representaría un reto en los esfuerzos de adaptación al cambio climático en América Latina (Cavazos *et al.* 2024). La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar y validar las curvas de acumulación de nutrimentos en la variedad de papa Elbe-UCR, cultivada en la Zona Norte de Cartago.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio experimental y condiciones agroecológicas

El sitio para el establecimiento de los experimentos de acumulación de nutrimentos y los ensayos de validación, se ubicó en localidad de Guarumos, cantón de Alvarado de la provincia de Cartago, Costa Rica, a una elevación de

2800 msnm. Dicho sitio se clasificó dentro del sistema de zonas de vida de Holdridge (Holdridge 1967) como Bosque Pluvial Montano (bp-M), con valores de precipitación pluvial promedio entre 1800 y 2300 mm año<sup>-1</sup>, y valores anuales de temperatura entre 9 y 12°C (Solano y Villalobos 2001). Ahí, se establecieron dos sectores: 1) Guarumos 1, donde se desarrolló el experimento de las curvas de acumulación de nutrimentos (9,968947 N; 83,816903 O), y 2) Guarumos 2, donde se realizaron los ensayos de validación de las curvas (9,966783 N; 83,820833 O).

Los suelos dominantes en esta región son mayoritariamente de origen volcánico, profundos y de color oscuro, con un buen contenido de materia orgánica y baja densidad aparente, así como texturas francas, franco arenosas y arenas francas (Alvarado *et al.* 2001). Taxonómicamente, estos suelos se clasifican de acuerdo con el sistema *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff 2014) dentro del orden de los Andisoles, específicamente en el Subgrupo taxonómico *Typic Hapludands* (Alvarado y Mata 2016).

En general, estos Andisoles se consideran moderadamente fértiles, pero presentan limitaciones como una alta fijación de fósforo de alrededor de 70% debido a la presencia de nano cristales de alofana (Nanzzyo *et al.* 1993, Buol *et al.* 2011), así como limitaciones en la concentración de boro, azufre y zinc (Bertsch 1998).

Se realizó un muestreo de suelo inicial para determinar la fertilidad de los sitios donde se realizaron los ensayos. Para ello se tomó una muestra compuesta siguiendo el protocolo de muestreo de suelo, con un barreno del tipo holandés y a una profundidad de 20 cm.

Dicha muestra compuesta se homogenizó y se redujo a una masa total de 0,5 kg mediante el cuarteo de muestra (Bertsch 1998). Estas muestras se llevaron al Laboratorio de Suelos y Foliares del Centro de Investigaciones Agronómicas (LSF-CIA-UCR), donde se le realizó un análisis químico completo (pH, acidez, Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, Fe, Mn). Para dicho análisis se utilizó la solución extractora KCl – Olsen modificado (Bertsch *et al.* 2005), y el pH se realizó en agua

en una proporción 1:2,5 suelo:agua (Díaz-Romeu y Hunter 1987). Los parámetros de fertilidad del suelo de ambos sectores (Guarumos 1 y Guarumos 2) se resumen en la Tabla 1.

### Material vegetal, siembra y manejo del cultivo

Para la determinación de las curvas de acumulación de nutrimentos de la variedad de papa Elbe-UCR se utilizó semilla básica II de

papa, la cual fue obtenida de semilla básica I cultivada el ciclo anterior en la misma finca, de acuerdo con los lineamientos de ONS (2005). La primera siembra del ensayo para las curvas de acumulación se realizó en abril 2017. La distancia de siembra fue de 35 cm entre plantas y 75 cm entre surcos. La aporca se realizó a los 45 días después de la siembra (dds). Posteriormente, se realizó la eliminación del follaje con herbicida (“quema del cultivo”) a los 135 dds.

Tabla 1. Parámetros de fertilidad del suelo obtenidos para los sitios experimentales en la localidad de Guarumos de Cartago, Costa Rica.

Finca	pH (H <sub>2</sub> O)	Adicez	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
Guarumos 1	6,6	0,14	7,15	1,18	0,37	8,84	2	81	11,1	19	214	7
Guarumos 2	6,4	0,12	4,96	1,62	0,30	7,00	2	90	10,4	23	225	7
Nivel crítico*	<b>5,5</b>	<b>0,5</b>	<b>4,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,20</b>	<b>5,00</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>5</b>

\* Niveles críticos o de referencia para los suelos de Costa Rica (Bertsch 1998).

\*\* Se utilizó la solución extractora KCL-Olsen modificado (Bertsch *et al.* 2005).

Las fórmulas de fertilizante utilizadas durante el ciclo del cultivo fueron:

1. *A la siembra*: mezcla física 14-21-13-3-7,2 (S); a una dosis de 700 kg ha<sup>-1</sup>.
2. *A la aporca*: una mezcla de dos fertilizantes comerciales; a una dosis de 2242 kg ha<sup>-1</sup>. Dichos fertilizantes fueron:
  - 12-11-18-3-8 (S)-0,02 (B)-0,2 (Fe)-0,02(Mn)-0,02(Zn); 1233 kg ha<sup>-1</sup>.
  - Kmag 0-0-22-18-22(S); 1009 kg ha<sup>-1</sup>.

Dichas fórmulas generaron un aporte total de N, P, K y Mg de 246, 124, 444, 144 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Para la validación de las curvas de acumulación se utilizó semilla básica III de la misma variedad obtenida a partir de semilla básica II, también cultivada el ciclo anterior en la misma finca, de acuerdo con los lineamientos de ONS (2005). La segunda siembra, donde se realizó

la validación de dichas curvas, inició en agosto 2018, siguiendo los mismos lineamientos de siembra, fertilización y densidad que en la primera siembra. La aporca se realizó a los 48 dds y la eliminación del follaje con herbicida se realizó a los 138 dds.

Las fórmulas de fertilizante granulado utilizadas en el ensayo de validación de las curvas de absorción fueron:

1. *A la siembra*: fórmula química 12-27-8-2,5-4,3(S); a una dosis de 545 kg ha<sup>-1</sup>.
2. *A la aporca*: una mezcla de dos fertilizantes comerciales, a una dosis de 2159 kg ha<sup>-1</sup>. Dichos fertilizantes fueron:
  - Kmag 0-0-22-18-22(S); 1559 kg ha<sup>-1</sup>.
  - Fórmula química 19-4-19; 600 kg ha<sup>-1</sup>.

Dichas fórmulas generaron un aporte total de N, P, K y Mg de 179, 75, 415, 177 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Determinación de las curvas de acumulación de nutrimentos**

Se tomaron muestras de plantas completas cada 15 días a partir de la emergencia y hasta que se completó el ciclo del cultivo, a los 135 días después de siembra. Se recolectó 3 plantas completas por unidad experimental (5 unidades en total), elegidas aleatoriamente de los surcos centrales, para un total por muestreo de 15 plantas y 120 en total. En cada planta recolectada se separó la biomasa de cada componente: hojas, tallo, raíz y tubérculos. Dichas muestras se trasladaron con mucho cuidado al Laboratorio de Suelos y Foliarres del Centro de Investigaciones Agronómicas (LSF-CIA-UCR), donde se determinó el peso

fresco, el peso seco, y el porcentaje de humedad de cada componente de la biomasa de la muestra.

Para cada componente muestreado se analizó su concentración de P, Ca, Mg, K, S, Fe, Mn, Cu, Zn, y B mediante espectrometría de emisión ICP-OES Perkin Elmer optima 8300 siguiendo la metodología descrita por Kalra (1998), y la concentración de N mediante combustión seca en un analizador Elementar® rapid N° 3.

Con toda esta información anterior se construyó una base de datos. Con los valores de humedad de las muestras y el peso fresco se determinó la biomasa seca de cada componente de la biomasa de las plantas de papa. Se calculó la acumulación de nutrimentos para cada tejido multiplicando la biomasa seca por la concentración de acuerdo con las siguientes fórmulas:

Para los macroelementos N, P, K, Ca, Mg, y S:

$$\text{kg nutrimento componente}^{-1} = \frac{\text{biomasa seca (kg) componente}^{-1} * \text{elemento (\%)}}{100} \quad (1)$$

Para los elementos menores Fe, Cu, Zn, Mn y B:

$$\text{g elemento componente}^{-1} = \frac{\text{biomasa seca (kg) componente}^{-1} * \text{elemento (mg kg}^{-1}\text{)}}{1000} \quad (2)$$

Estos valores permitieron calcular la acumulación total de nutrimentos por hectárea para cada etapa del ciclo de cultivo, tomando en cuenta la acumulación total por cada planta y multiplicando por la densidad de plantas por hectárea (35000 plantas).

**Validación de las curvas de acumulación de nutrimentos**

Una vez desarrolladas las curvas de acumulación y la estimación de los requerimientos totales para un ciclo de producción de la variedad de papa Elbe-UCR, se estableció un ensayo para validar la información obtenida de las curvas de

acumulación. En dicho ensayo se utilizó un diseño de bloques completos al azar, que consistió en 4 tratamientos y 3 repeticiones cada uno. La unidad experimental fue una parcela compuesta de 6 surcos de 0,75 m de ancho por 6 m de largo, con un área aproximada de 27 m<sup>2</sup>.

Los tratamientos evaluados se detallan a continuación:

- **Curva:** dosis de fertilizante recomendadas a partir de los valores de acumulación obtenidos de las curvas generadas para la variedad Elbe-UCR. Las cantidades aplicadas de N, P, K, y Mg fueron 179, 75, 415, 177 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

- **Curva + 25%:** dosis recomendadas más un 25% de incremento de la dosis de NPK obtenida de las curvas de acumulación generadas para la variedad Elbe-UCR. Las cantidades aplicadas de N, P, K, y Mg fueron 224, 94, 519, 221 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.
- **Curva - 25%:** dosis recomendadas menos un 25% de la dosis de NPK obtenida de las curvas de acumulación generadas para la variedad Elbe-UCR. Las cantidades aplicadas de N, P, K, y Mg fueron 135, 56, 312, 132 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.
- **Testigo:** dosis y fuentes de fertilizante utilizada por el productor. Las cantidades aplicadas de N, P, K, y Mg fueron 246, 124, 444, 144 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Al momento de la cosecha, para cada uno de los tratamientos y sus repeticiones se determinó el número y peso total de tubérculos por planta de un total de 10 plantas por tratamiento, tomadas del surco central. Dichos valores se utilizaron para calcular el rendimiento total mediante un valor de densidad del cultivo de 35000 plantas ha<sup>-1</sup>.

#### **Análisis de costos de producción**

Para analizar el impacto económico de la implementación de un plan de fertilización basado en las curvas de acumulación de nutrientes en la producción de papa, se estimó una estructura de costos asociados, y se realizó un estudio de presupuestos parciales, siguiendo los lineamientos descritos en Ávalos y Villalobos (2018). Estos procedimientos permiten determinar el cambio en los costos de producción al variar las cantidades y dosis de fertilizante, y su efecto sobre el rendimiento final de la papa variedad Elbe-UCR.

#### **Análisis estadístico**

En los datos obtenidos del ensayo de validación de las curvas de acumulación de nutrientes, se verificaron los supuestos de homogeneidad y homocedasticidad de varianzas mediante una inspección visual de la distribución de los residuos obtenidos de los modelos ajustados (normal QQ Wally plots y Wally plots) para la variable de respuesta evaluada, en este caso el rendimiento total por área (kg ha<sup>-1</sup>) siguiendo los lineamientos descritos por Kozak y Piepho (2018).

Una vez verificados dichos supuestos, los datos fueron analizados mediante un modelo lineal generalizado (GLM), con el “tratamiento” como único factor fijo. Para la separación de medias se utilizó el método HSD-Tukey con un  $p$ -value <0,05.

Todos estos procedimientos anteriores se realizaron mediante el programa estadístico R Studio (R v. 4.0.4, 2021-02-15) “Lost Library Book” (R Studio Team 2015).

### **RESULTADOS**

#### **Crecimiento y acumulación de biomasa de la variedad de papa Elbe-UCR**

La acumulación de biomasa durante el ciclo de cultivo en esta variedad de papa se documentó desde la siembra hasta los 135 dds (Figura 1). Se observó un incremento paulatino en los valores de acumulación de la biomasa aérea (tallo y follaje) hasta los 105 dds, momento a partir del cual la planta incrementó de forma significativa la acumulación de materia seca en los tubérculos hasta alcanzar un valor promedio de 8399 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 1A).

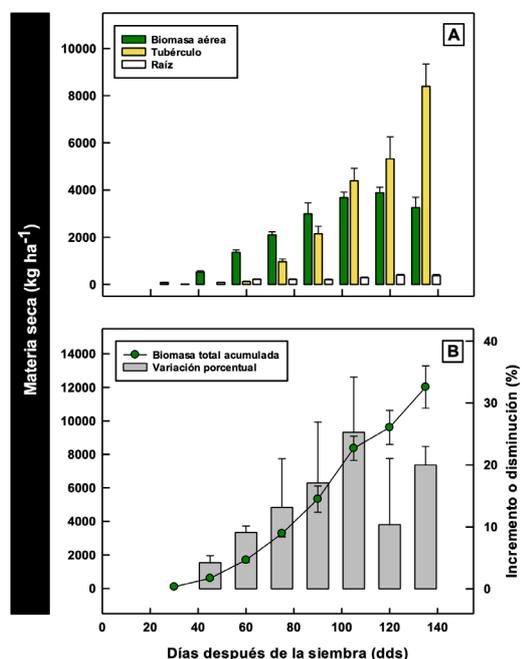


Figura 1. Crecimiento y acumulación de biomasa en la papa variedad Elbe-UCR cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. A) Acumulación por componente de la biomasa de la planta. B) Acumulación total y variación porcentual durante el ciclo del cultivo. Barras de error como error estándar.

Después de la segunda fertilización granulada (45 dds), el incremento en la biomasa total acumulada en un periodo de 15 días fue en promedio de 5%, por lo que la acumulación de materia seca llegó hasta los 105 dds sin disminuciones (Figura 1B). Curiosamente, a los 120 dds se observaron plantas con follaje amarillento (inicio de la etapa de maduración), lo cual se reflejó en una disminución de 15% respecto a la quincena anterior (105 dds). Posteriormente, a los 135 dds volvió a incrementar el contenido de materia seca, lo cual coincide con la fase de llenado de tubérculos, hasta alcanzar un valor promedio de materia seca de 12016 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 1B).

### Curvas de acumulación de nutrimentos de la variedad de papa Elbe-UCR

#### Macroelementos acumulados en la biomasa de las plantas de papa

La acumulación de N, P y K (en cada componente de la biomasa y cantidad total) durante el ciclo de cultivo de esta variedad de papa se detalla en la Figura 2. En el caso del nitrógeno, la acumulación en la biomasa aérea y en la raíz llegaron de forma respectiva a valores máximos de 133 y 7,8 kg ha<sup>-1</sup> a 120 dds, mientras que en la biomasa de los tubérculos se obtuvo un valor de 75 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 2A).

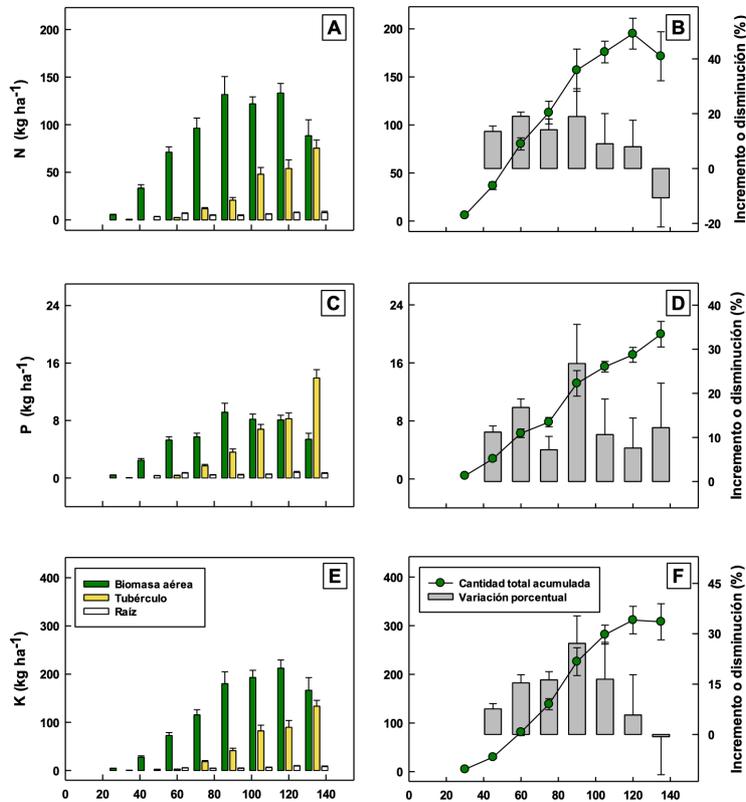


Figura 2. Acumulación de los tres macronutrientes principales (N, P, y K) en la biomasa de la papa variedad Elbe-UCR cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. Paneles izquierdos (A, C y E) representan respectivamente la acumulación de N, P, y K por componente de la biomasa de la planta. Paneles derechos (B, D y F) representan respectivamente la acumulación total y la variación porcentual de N, P, y K durante el ciclo del cultivo. Barras de error como error estándar.

La acumulación total de N en la variedad Elbe-UCR presentó un incremento constante durante el ciclo del cultivo, llegando a un valor máximo de  $195 \text{ kg ha}^{-1}$  a los 120 dds. Posteriormente, se observó una disminución en la acumulación total de este elemento (un valor de variación de -11%), la cual coincide con la etapa final de llenado y maduración de los tubérculos (Figura 2B).

Con respecto al elemento fósforo, su acumulación en la biomasa aérea alcanzó un valor

máximo de  $9 \text{ kg ha}^{-1}$  a los 90 dds y se mantuvo más o menos constante hasta los 135 dds donde su acumulación descendió hasta  $5 \text{ kg ha}^{-1}$ . En adición, en la biomasa de los tubérculos se observó una clara tendencia al incremento en la acumulación de este elemento, donde se obtuvo un valor de  $14 \text{ kg ha}^{-1}$  a los 135 dds. La acumulación total de P también presentó un incremento constante durante el ciclo del cultivo, hasta alcanzar un valor máximo de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  a los 135 dds (Figura 2C).

Por otro lado, el potasio fue el elemento que se acumuló en mayor cantidad por las plantas de papa de la variedad Elbe-UCR (Figura 2). El K presentó un patrón de acumulación similar al observado en el N (Figura 2 A y B), donde la acumulación de K en la biomasa aérea y en la raíz llegaron de forma respectiva a valores máximos de 212 y 9,5 kg ha<sup>-1</sup> a los 120 dds, mientras que en la biomasa de los tubérculos se acumuló un valor máximo de 134 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 2E).

La acumulación total de K presentó un incremento constante durante el ciclo del cultivo, llegando a un valor máximo de 312 kg ha<sup>-1</sup> a los 120 dds. También se observó una pequeña disminución en la acumulación total de K a los 135 dds, con un valor de variación de -1% (Figura 2F).

La acumulación de Ca, Mg, y S en los distintos componentes de la planta se detalla en la Figura 3 para las diferentes etapas y para la totalidad del ciclo de cultivo. El calcio se acumuló principalmente en la biomasa aérea, con un incremento marcado desde los 45 a los 90 dds, tiempo a partir del cual el Ca acumulado se mantuvo relativamente estable y alcanzando un valor máximo de 50 kg ha<sup>-1</sup> a los 105 dds. Este último valor contrasta con los contenidos de Ca obtenidos en la biomasa de los tubérculos y la raíz, los cuales alcanzaron valores de 2,3 y 4,7 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, a los 135 dds (Figura 3A). Al evaluar la acumulación total de Ca en el ciclo del cultivo, se obtuvo un valor máximo de 54 kg ha<sup>-1</sup> a los 105 dds, con un ligero descenso (variación de -3,5%) a los 120 dds y un incremento final (2%) a los 135 dds (Figura 3B).

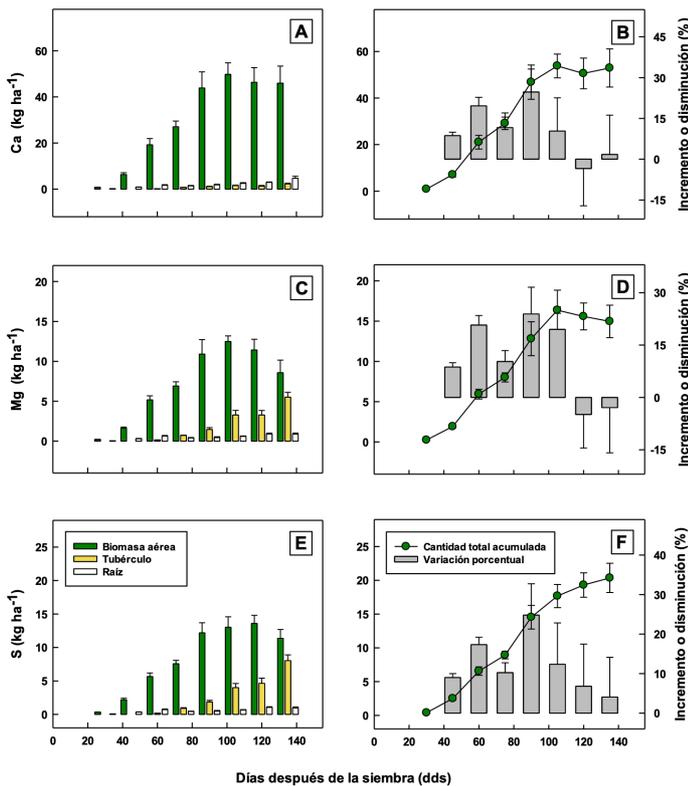


Figura 3. Acumulación de tres macronutrientes secundarios (Ca, Mg, y S) en la biomasa de la papa variedad Elbe-UCR cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. Paneles izquierdos (A, C y E) representan respectivamente la acumulación de Ca, Mg, y S por componente de la biomasa de la planta. Paneles derechos (B, D y F) representan respectivamente la acumulación total y la variación porcentual de Ca, Mg, y S durante el ciclo del cultivo. Barras de error como error estándar.

De forma similar al Ca, el magnesio se acumuló principalmente en la biomasa aérea de las plantas de papa, con un incremento continuo desde los 30 hasta los 105 dds donde acumuló un valor máximo de 12,5 kg ha<sup>-1</sup>, el cual descendió paulatinamente hasta alcanzar 8,6 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 3C). Se observó un incremento en la acumulación de Mg en la biomasa de los tubérculos a partir de los 90 dds hasta obtener un valor máximo de 5,5 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds.

Los valores de acumulación total del Mg presentaron una tendencia similar a la observada en la biomasa aérea, obteniendo un valor máximo de acumulación de Mg de 16,4 kg ha<sup>-1</sup> a los 105 dds. A partir de los 105 dds se observó un descenso paulatino en las cantidades de Mg (valores de variación de -5 y -3%) hasta los 135 dds (Figura 3D).

Finalmente, la acumulación de azufre presentó un comportamiento muy similar al del magnesio, es decir, valores crecientes de acumulación en la biomasa aérea y de los tubérculos hasta alcanzar valores máximos de 14 kg ha<sup>-1</sup> a los 120 dds y 8 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds, respectivamente (Figura 3E). La acumulación total de este elemento presentó un patrón similar al observado para el fósforo, con un incremento continuo hasta alcanzar un valor máximo de 20,4 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 3F).

### **Elementos menores acumulados en la biomasa de las plantas de papa**

La acumulación de los elementos menores (Zn, Cu, Fe, Mn y B) durante el ciclo de cultivo se resume en las Figuras 4 y 5. En el caso del zinc, la acumulación en la biomasa aérea, tubérculos y raíz llegó de forma respectiva a valores máximos de 222, 82,3 y 31,5 g ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 4A). De forma similar, la acumulación total de Zn en el cultivo alcanzó un valor máximo de 336 g ha<sup>-1</sup> a los 135 dds, con un ligero descenso (variación de -2%) a los 120 dds (Figura 4B).

Al evaluar el comportamiento de la acumulación del cobre, se observó un valor de 28 ± 27 g ha<sup>-1</sup> acumulado a los 60 dds en el tubérculo, el cual desciende drásticamente hasta 4,5 g ha<sup>-1</sup> a los 75 dds, momento a partir del cual incrementa de forma paulatina hasta alcanzar un valor de 40 g ha<sup>-1</sup> a los 135 días (Figura 4C). Este comportamiento también se observó en la acumulación total de Cu durante el ciclo del cultivo, donde se observaron dos descensos a los 75 y 120 dds, así como tres incrementos significativos a los 60, 90 y 135 dds, con valores de variación de 29, 21 y 42%, respectivamente, hasta alcanzar un valor total acumulado de 123 g ha<sup>-1</sup> (Figura 4D).

Por otro lado, el hierro se acumuló principalmente en la biomasa aérea, con un valor máximo de 5984 g ha<sup>-1</sup> acumulado a los 100 dds (Figura 4E). La acumulación total a lo largo del ciclo de cultivo fue muy similar al observado en el cobre. En este aspecto, se observaron dos descensos a los 75 y 120 dds, así como dos incrementos significativos a los 60, y 105 dds, con valores respectivos de variación de 48 y 166%; siendo en este último periodo (105 dds) donde se alcanza un valor total acumulado de 6250 g ha<sup>-1</sup> (Figura 3F).

El manganeso presentó la tendencia de acumulación en los distintos componentes de la biomasa de las plantas de papa: Biomasa aérea >>> Raíces >> Tubérculos. En ese sentido, en la biomasa aérea se obtuvo un valor máximo de 50 g ha<sup>-1</sup> acumulado a los 105 dds. Curiosamente, en ese mismo momento el Mn presentó un valor máximo de 7 g ha<sup>-1</sup> en la biomasa de los tubérculos (Figura 5A). En adición, la acumulación total de Mn presentó una tendencia al incremento desde 30 hasta los 105 dds donde alcanza un máximo promedio de 337 kg ha<sup>-1</sup>, y posteriormente se observó una caída en la cantidad total acumulada, con dos descensos a los 120 y 135 con variación de -23 y -22%, respectivamente (Figura 5B).

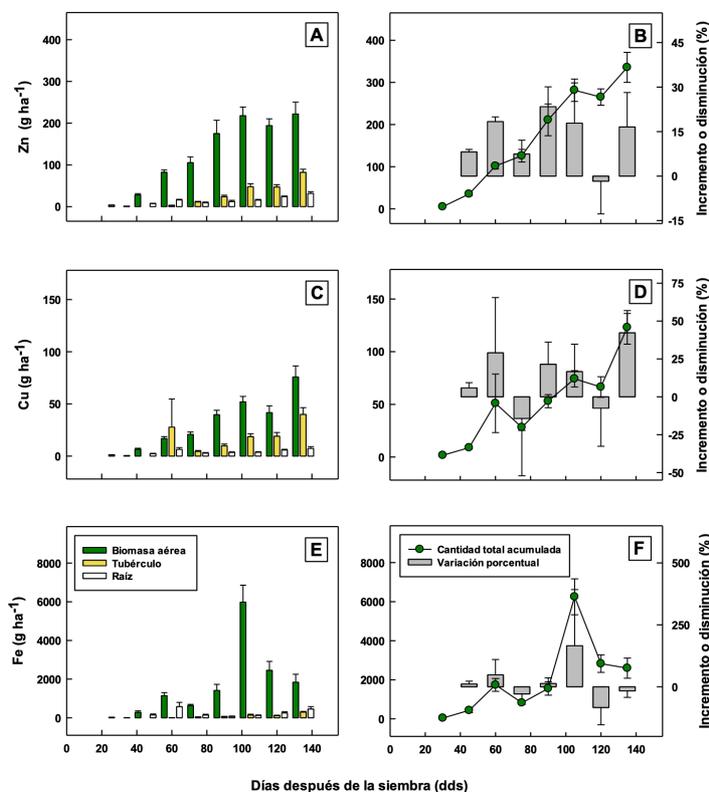


Figura 4. Acumulación de tres microelementos (Zn, Cu, y Fe) en la biomasa de la papa variedad Elbe-UCR, cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. Paneles izquierdos (A, C y E) representan respectivamente la acumulación de Zn, Cu, y Fe por componente de la biomasa de la planta. Paneles derechos (B, D y F) representan respectivamente la acumulación total y la variación porcentual de Zn, Cu, y Fe durante el ciclo del cultivo. Barras de error como error estándar.

Finalmente, la acumulación del boro en los distintos componentes de la biomasa de las plantas de papa Elbe-UCR se resume en la Figura 5C. Se observó la siguiente tendencia de acumulación de B en los componentes evaluados: Biomasa aérea >>> Tubérculos >> Raíces; así como un valor máximo de  $186\ g\ ha^{-1}$  acumulado a los 105 dds en la biomasa aérea.

Al evaluar la acumulación total del B durante el ciclo de esta variedad de papa, se observó una tendencia al incremento desde los 30 hasta los 105 dds, momento donde se alcanza un valor máximo de  $211\ g\ ha^{-1}$ . A partir de este momento se observó un leve descenso en la acumulación (variación de  $-5\%$ ) seguido de un incremento en los 135 dds hasta alcanzar un valor máximo de  $212\ g\ ha^{-1}$  (Figura 5D).

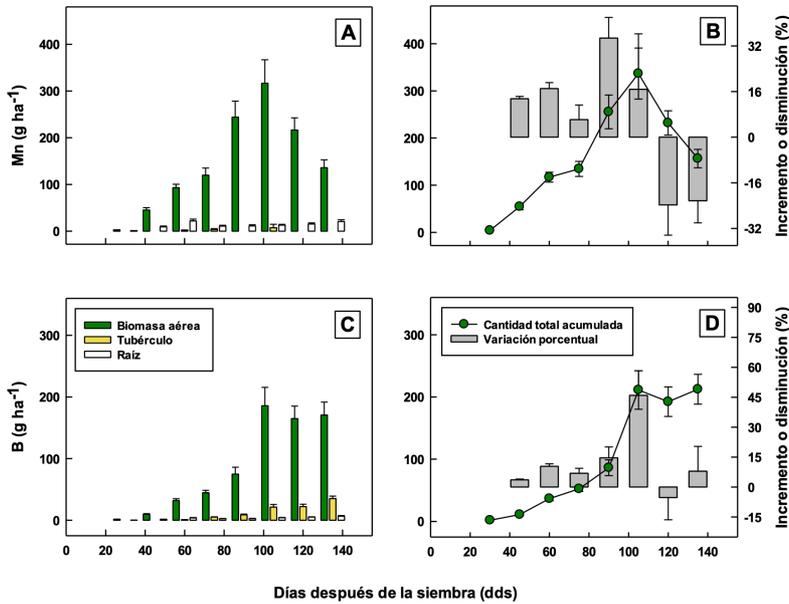


Figura 5. Acumulación de dos microelementos (Mn y B) en la biomasa de la papa variedad Elbe-UCR cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. Paneles izquierdos (A y C) representan respectivamente la acumulación de Mn y B por componente de la biomasa de la planta. Paneles derechos (B y D) representan respectivamente la acumulación total y la variación porcentual de Mn y B durante el ciclo del cultivo. Barras de error como error estándar.

### Validación de las curvas de acumulación de nutrientes de la variedad Elbe-UCR Efecto de los tratamientos de fertilización sobre el rendimiento de la papa

Los resultados obtenidos para el ensayo de validación de los datos de acumulación anteriormente mencionados (Figuras 2-5) se resumen en la Figura 6. No se observaron diferencias significativas entre los rendimientos obtenidos para tratamientos evaluados (Tabla 2, Figura 6).

Indiferentemente de aumentar o disminuir en un 25% la cantidad de fertilizante aplicado al cultivo (Curva + 25% y Curva - 25%) no se

generó un cambio significativo en el rendimiento (HSD Tukey = 8896,44 kg ha<sup>-1</sup>) al compararlo con el plan de fertilización desarrollado a partir de los valores de acumulación de nutrientes obtenidos en las curvas (Curva) o el manejo de la fertilización realizada por el agricultor (Testigo).

Estos resultados obtenidos refuerzan la validez de los valores de acumulación de nutrientes obtenidos a través de las curvas, ya que no se observó una disminución significativa en el rendimiento de la papa cuando se consideran los criterios de fertilización desarrollados a partir del conocimiento de las cantidades totales acumuladas por la variedad Elbe-UCR.

Tabla 2. Resumen del modelo lineal generalizado (GLM) obtenido para la variable rendimiento total en el ensayo de validación de las curvas de acumulación de nutrimentos en la papa variedad Elbe-UCR, cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica.

Fuente de variación	SC†	gl†	CM†	F†	p-value
Tratamiento	70070000	3	23356666,7	1,05	0,4234
Error	178605000	8	22325625		
Total	248675000	11			

† SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio; F: Factor F.

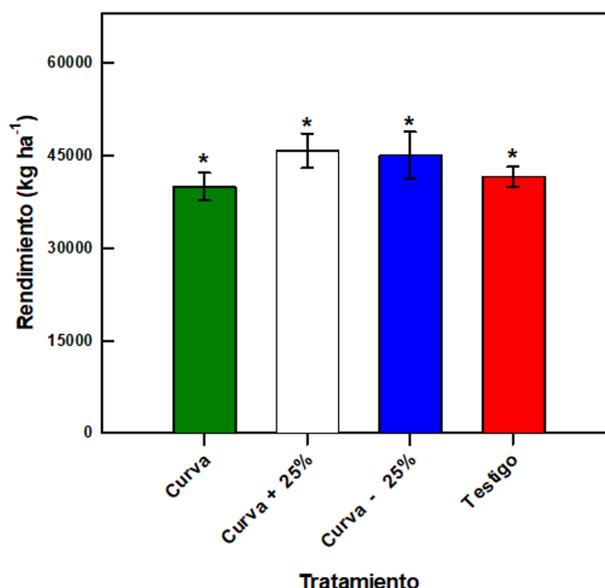


Figura 6. Rendimiento total obtenido para los tratamientos de fertilización evaluados en el ensayo de validación de las curvas de acumulación de nutrimentos de la papa variedad Elbe-UCR, cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. \* Medias no presentaron diferencias significativas ( $p$ -value >0,05) de acuerdo con la prueba HSD-Tukey. Barras de error como error estándar.

### Presupuestos parciales y análisis de costos de producción

En adición a los resultados obtenidos en los ensayos de validación de las curvas de

acumulación, se evaluaron los costos de producción asociados. Los costos variables por la fertilización granulada para cada tratamiento (Figura 6), así como los valores de rendimiento e ingresos generados se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Inversión y ganancia neta obtenida para los tratamientos de fertilización evaluados en los ensayos de validación de las curvas de acumulación de nutrimentos en la papa variedad Elbe-UCR, cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica.

Tratamiento	Peso	Siembra	Aporca	Mano de obra	Inversión total	Diferencia en inversión con respecto al testigo	Ingresos *	Ingresos más diferencia en inversión	Diferencia en ganancia con respecto al testigo
	kg ha <sup>-1</sup>					Colones (¢) ha <sup>-1</sup>			
Curva	39900	401422	1004336	50850	1456608	-25398	23940000	23914602	-1075398
Curva + 25%	45850	501778	1255420	63550	1820748	-389538	27510000	27120462	2130462
Curva - 25%	45150	301067	753252	38150	1092469	338741	27090000	27418741	2438741
Testigo †	41650	418148	933062	50000	1431210		24990000	24990000	

† manejo de fertilización habitual del agricultor.

\*calculado con un precio de venta de ¢600 kg<sup>-1</sup>.

La menor inversión económica y el mayor retorno por rendimiento se obtuvo en el tratamiento Curva - 25% (0,75 veces la fertilización recomendada a partir de la curva de absorción). Entre las fórmulas fertilizantes para siembra y aporca y los respectivos costos de mano de obra para aplicarlos, se invirtió un total de ¢1 092 469 y se obtuvo un incremento de 9,8% en el rendimiento con respecto al manejo de fertilización habitual del agricultor (Testigo). Para el tratamiento Curva + 25% (1,25 veces la fertilización recomendada a partir de la curva de absorción) se invirtió un total de ¢1 820 748, con un rendimiento que superó en 8,5% al que se obtuvo por el tratamiento testigo.

En el tratamiento Curva (fertilización recomendada a partir de las curvas de absorción) se invirtió un total de ¢1 456 608, y se obtuvo un rendimiento de 4,3% por debajo del obtenido en el tratamiento Testigo.

El tratamiento (con mayor retorno económico) fue el tratamiento Curva - 25%, en el que cual se obtuvo un incremento de ¢2 438 741 respecto al testigo. El tratamiento Curva + 25% presentó de igual forma una ganancia de ¢2 130 462, pero la inversión en fertilizante adicional lo colocó como el tratamiento de mayor costo de inversión.

## DISCUSIÓN

### Crecimiento y acumulación de biomasa del cultivo de la papa Elbe-UCR

De forma general, la acumulación de materia seca se vio direccionada principalmente hacia la biomasa aérea, y a partir de los 60 dds se observó que la acumulación de materia seca en la biomasa de los tubérculos incrementó significativamente hasta representar cerca de un 70% de la biomasa total acumulada 135 dds (Figura 1), de forma similar a lo observado en otros estudios de crecimiento en distintas variedades de papa distintas (Cabalceta *et al.* 2005, Oliveira *et al.* 2016, de Almeida *et al.* 2018).

Al respecto, da Silva *et al.* (2020) observaron el mismo patrón de incremento en la acumulación de materia seca a partir de los 55 dds en cinco variedades de papa en Brasil. Sierra *et al.* (2013) determinaron que el mayor incremento en la materia seca de la parte aérea se da a los 45 dds en la variedad Karú y que posteriormente los tubérculos se vuelven el mayor sumidero de materia seca, además de que las hojas y tallos no incrementan biomasa.

Curiosamente, en la variedad Elbe-UCR se observó un incremento en la biomasa radical a los 60 dds, el cual se mantuvo más o menos similar en

las restantes fechas de evaluación. Badillo-Tovar *et al.* (2004) mencionan que la biomasa radical permanece constante una vez finalizada la etapa de crecimiento vegetativo, representando apenas un 1,1% de la materia seca total. Pese a esto anterior, en la variedad Elbe-UCR la biomasa de raíz representó un 3% del total de materia seca, lo cual es característico y distintivo de este material. En este sentido, una mayor masa radicular puede representar ventajas bajo condiciones edáficas hostiles, como bajos contenidos de humedad o de nutrientes.

La variedad de papa Elbe-UCR presenta un gran potencial de rendimiento, esto debido a sus características como un sistema radical y vigor de la planta que le permiten una gran capacidad de extracción de nutrientes, lo cual se ve reflejado en la curva de crecimiento.

#### **Acumulación de nutrimentos en la biomasa del cultivo de la papa Elbe-UCR**

Los elementos que se acumularon en mayor cantidad en la biomasa total fueron el N, P, K, Ca y Mg, donde el 50% del total acumulado ocurre entre la emergencia y el inicio de la floración (Figuras 2 y 3). El orden de acumulación total de estos elementos fue  $K > N > Ca > S > Mg > P$ .

Se determinó que Elbe-UCR tiende acumular más K que N. El contenido acumulado total de K ( $312 \text{ kg ha}^{-1}$  de K) fue superior a los valores reportados en otras variedades de papa en el país, como Granola ( $284 \text{ kg ha}^{-1}$  de K) y MF-80 ( $166 \text{ kg ha}^{-1}$  de K), y ligeramente inferior a la acumulación de K por la variedad Floresta (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005). Lo contrario sucede con el N, el cual se acumula en mayor cantidad en otros cultivares de papa (Bertsch 2003). En el presente trabajo se determinó que la variedad Elbe-UCR puede absorber como máximo  $195 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrógeno (Figura 2), 50% menos que la cantidad de nitrógeno acumulada por la variedad Floresta ( $381 \text{ kg ha}^{-1}$  N) y 16% menos de la variedad Granola ( $228 \text{ kg ha}^{-1}$  de N) ambas ampliamente cultivadas en Costa Rica (Bertsch 2003). La cantidad total de N acumulado por la variedad Elbe-UCR, fue suficiente para favorecer el vigor del

área foliar, así como para obtener un rendimiento superior al promedio de  $25000 \text{ kg ha}^{-1}$  reportado para Costa Rica (Avilés y Piedra 2017).

El P total acumulado presentó un valor de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  para un rendimiento de  $40000 \text{ kg ha}^{-1}$ . Esta cantidad fue superior a las reportadas para variedades comúnmente cultivadas en Costa Rica, entre ellas MF-80 ( $8 \text{ kg ha}^{-1}$  de P) y Granola ( $8 \text{ kg ha}^{-1}$  de P), pero inferior a las cantidades requeridas por la variedad Floresta ( $23 - 27 \text{ kg ha}^{-1}$  de P) para obtener rendimientos totales similares a los obtenidos en el presente trabajo (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009). Al comparar los resultados obtenidos en el presente estudio con los valores de acumulación total de P en el cultivo de papa reportados en la literatura ( $30 - 40 \text{ kg ha}^{-1}$  de P) en otras latitudes y con rendimientos similares (Sierra *et al.* 2013, Gómez *et al.* 2017), la variedad Elbe-UCR presenta una acumulación menor de este elemento.

Para los elementos Ca y Mg, las cantidades totales acumuladas presentaron diferencias con las cantidades reportadas para otras variedades comerciales de papa en Costa Rica (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005). En ese sentido, el Ca total acumulado por la variedad Elbe-UCR ( $54 \text{ kg ha}^{-1}$  de Ca) fue superior al reportado por las variedades Floresta y Granola ( $41$  y  $25 \text{ kg ha}^{-1}$  de Ca, respectivamente), e inferior a las cantidades de Ca acumulado ( $75 \text{ kg ha}^{-1}$  de Ca) por otras variedades cultivadas en Chile (Sierra *et al.* 2013). De forma contraria al Ca, el Mg total acumulado por estas dos variedades comerciales mencionadas con anterioridad fueron más elevadas ( $35$  y  $22 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mg, respectivamente) que las obtenidas para la variedad Elbe-UCR ( $16 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mg). Estos valores de Mg total acumulado fueron similares a los reportados por da Silva *et al.* (2020) para cuatro variedades de papa ( $17, 30, 26,$  y  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mg para Agata, Asterix, Atlantic, y Taurus, respectivamente) cultivadas en Minas Gerais, Brasil.

Por otro lado, los elementos menores se acumularon en mayor cantidad en la biomasa total de la variedad de papa Elbe-UCR (Figuras 4 y 5). El orden de acumulación total de estos elementos fue  $Fe \gg \gg Mn > Zn > B > Cu$ , y dichas cantidades

acumuladas presentaron tendencias similares a las obtenidas por Bertsch (2003) para cuatro variedades comerciales, con excepción del elemento B el cual no fue reportado en dichas variedades.

En estudios más recientes sobre acumulación de nutrimentos en variedades de papa en Costa Rica (Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009) las cantidades totales de B acumulado varían entre 42 y 162 g ha<sup>-1</sup> de B, las cuales fueron más bajas que la cantidad obtenida para la variedad Elbe-UCR (212 g ha<sup>-1</sup> de B). Curiosamente, este valor de acumulación total de B obtenido en el presente estudio fue superior a los valores obtenidos por Fernandes *et al.* (2017) en cinco variedades papa y bajo tres niveles de fósforo disponible en el suelo (37 - 144 g ha<sup>-1</sup> de B).

### **Validación de los resultados de acumulación y costos de producción**

Un aspecto novedoso del presente estudio fue la implementación de ensayos de validación de los resultados de acumulación de nutrimentos por esta variedad de papa, así como un análisis de costos de producción asociados (presupuestos parciales), ya que los estudios de acumulación de nutrimentos por el cultivo de la papa disponibles en la literatura se limitan a la descripción del crecimiento y la dinámica de acumulación de elementos esenciales durante el ciclo de cultivo (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009).

La verificación de los resultados obtenidos a partir de las curvas de acumulación de nutrimentos resulta fundamental para determinar las dosis adecuadas para la fertilización de los cultivos, optimizando los recursos para el alcance de los valores de rendimiento deseados (Bertsch 1998). Al observar los resultados de los ensayos de validación de las curvas de acumulación de nutrimentos por la papa variedad Elbe-UCR (Figura 6), se logró verificar que al incrementar o disminuir en un 25% la cantidad de fertilizante a aplicar al cultivo (dosis obtenidas a partir de las curvas de acumulación), no se obtuvo un cambio significativo en el rendimiento, en específico, no se observó un descenso en el rendimiento.

De hecho, el análisis de costos indica que al reducir en 25% la cantidad de fertilizante calculada a partir de los datos de acumulación de la papa variedad Elbe-UCR (Curva - 25%) se obtiene un mayor rédito económico (Tabla 3). Esto anterior, podría indicar que existió un consumo excesivo de nutrientes como N, lo cual pudo reducir la tuberización al promover el desarrollo vegetativo, además de reducir la materia seca de los tubérculos (Zelalem *et al.* 2009, Ruza *et al.* 2013, Gathungu *et al.* 2015, Duguma y Chewaka 2019) generando un efecto en el rendimiento final y la relación costo-beneficio asociada a un factor parcial (Ávalos y Villalobos 2018), en este caso, la fertilización del cultivo.

El presupuesto parcial tiene como objetivo comparar el efecto de un cambio tecnológico específico sobre los costos de producción y el rendimiento final de un cultivo, sin necesidad de analizar el total de costos del cultivo (Horton 1982, Reyes 2001). Esta herramienta económica resultó en un excelente complemento a la información obtenida de las curvas de acumulación de nutrientes y los ensayos de validación (Tabla 3), pues permitió determinar un cambio en los costos asociados a la selección de fertilizantes granulados.

### **Implicaciones de los resultados obtenidos en el presente estudio**

Las cantidades promedio acumuladas en los componentes de la biomasa total de la papa variedad Elbe-UCR se resumen en la Tabla 4. Esta información se considera fundamental para el desarrollo de los planes de fertilización y formulación comercial para esta variedad, la cual presentó patrones de acumulación distintos a los reportados en la literatura para otras variedades producidas comercialmente en Costa Rica (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009), así como en otras variedades desarrolladas y cultivadas en las regiones del Sur de América (Sierra *et al.* 2013, Gómez *et al.* 2017, da Silva *et al.* 2020, Fernández *et al.* 2017).

Tabla 4. Valores promedios de acumulación de nutrientes en la papa variedad Elbe-UCR, cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica.

Muestreo	Materia seca	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Fe	Mn	B
dds	g planta <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>										
Tubérculo												
30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60,0	10,2	2,3	0,3	2,7	0,1	0,1	0,2	2,9	27,7	12,6	1,8	1,0
75,0	82,5	11,8	1,7	18,6	0,7	0,7	0,9	11,4	4,5	45,0	3,9	5,3
90,0	183,1	2135,7	3,6	41,4	1,1	1,5	1,9	23,8	9,9	66,3	0,0	8,9
105,0	376,6	4393,2	6,8	82,3	1,6	3,3	4,0	47,9	18,6	142,0	7,4	21,3
120,0	456,5	5325,4	8,3	89,8	1,3	3,3	4,7	47,3	19,1	116,6	0,0	22,3
135,0	719,9	8398,8	13,9	133,5	2,3	5,5	8,0	82,3	40,0	298,4	0,0	35,2
Biomasa aérea												
30,0	7,4	85,9	0,4	4,6	0,7	0,2	0,3	3,9	1,2	24,6	2,9	1,7
45,0	44,7	521,0	2,5	27,6	6,3	1,6	2,2	27,9	6,6	282,0	45,3	9,6
60,0	116,7	1361,0	7,2	72,9	19,2	5,2	5,7	82,5	16,8	1145,7	93,2	31,9
75,0	180,1	2100,9	9,6	115,5	27,1	6,9	7,6	105,4	20,8	633,5	119,9	44,6
90,0	256,4	2990,9	13,8	180,1	43,9	10,9	12,2	175,1	39,6	1414,9	244,1	74,9
105,0	315,5	3680,4	12,9	193,1	49,8	12,5	13,0	217,9	52,0	5983,6	316,7	185,8
120,0	333,4	3890,1	13,3	212,2	46,3	11,4	13,6	194,1	41,6	2456,7	216,7	165,0
135,0	278,3	3247,1	8,5	166,5	46,0	8,6	11,4	222,0	75,8	1842,9	135,9	170,7
Raíz												
30,0	1,2	13,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	1,2	0,4	12,4	1,2	0,2
45,0	7,4	85,9	3,3	2,3	0,8	0,3	0,3	7,2	2,3	150,9	9,2	1,4
60,0	18,7	218,6	6,8	5,5	1,7	0,6	0,7	16,2	6,4	576,0	22,1	3,8
75,0	18,4	214,7	4,8	4,6	1,4	0,4	0,4	9,3	2,9	141,4	10,8	2,6
90,0	17,0	198,3	4,5	4,7	1,8	0,5	0,5	12,2	3,5	74,6	11,3	2,6
105,0	25,1	292,8	6,0	6,3	2,5	0,6	0,7	15,7	3,7	124,5	12,7	4,1
120,0	34,0	396,4	7,8	9,5	2,9	0,9	1,1	24,0	5,8	252,1	15,5	5,2
135,0	31,8	370,5	7,6	8,0	4,7	0,9	1,0	31,5	7,3	454,2	20,6	6,6

Muestreo	Materia seca		N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Fe	Mn	B
	g planta <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>											
dds	kg ha <sup>-1</sup> *												
Total													
30,0	8,5	99,6	6,0	0,4	4,9	0,9	0,3	0,4	5,0	1,6	37,0	4,0	1,8
45,0	52,0	606,9	36,7	2,8	30,0	7,1	1,9	2,5	35,1	8,9	432,8	54,5	11,0
60,0	145,6	1699,1	80,3	6,3	81,1	21,0	5,9	6,6	101,5	51,0	1734,3	117,1	36,7
75,0	280,9	3277,6	112,9	7,8	138,7	29,1	8,0	8,9	126,1	28,2	820,0	134,6	52,5
90,0	456,4	5324,9	157,0	13,2	226,2	46,8	12,8	14,5	211,1	53,0	1555,8	255,4	86,3
105,0	717,1	8366,4	175,9	15,5	281,6	53,8	16,4	17,7	281,5	74,3	6250,1	336,8	211,2
120,0	823,9	9611,9	195,0	17,1	311,5	50,6	15,6	19,3	265,3	66,4	2825,4	232,1	192,4
135,0	1030,0	12016,4	171,5	20,0	308,1	52,9	15,0	20,4	335,7	123,1	2595,5	156,5	212,5
Total		12016,4	195,0	20,0	311,5	53,8	16,4	20,4	335,7	123,1	6250,1	336,8	212,5
Cosecha		8398,8	75,4	13,9	133,5	2,3	5,5	8,0	82,3	40,0	298,4	7,4	35,2
Cosecha (%)		69,9%	38,7%	69,7%	42,9%	4,2%	33,7%	39,5%	24,5%	32,5%	4,8%	2,2%	16,6%

\*Calculado con una densidad de 35000 plantas ha<sup>-1</sup>. El rendimiento promedio total obtenido fue de 40000 kg ha<sup>-1</sup>.

El manejo de la fertilización con NPK para la variedad evaluada en el presente estudio debería mantener un equilibrio entre las cantidades aplicadas de K y N, ya que si bien ambos elementos mantienen un sinergismo en el cultivo de papa (Grzebisz *et al.* 2017) se requiere un balance entre las cantidades de N y K, ya que un exceso de alguno de estos dos nutrientes podría resultar contraproducente. En la literatura se ha reportado que dosis muy elevadas de N prolongan la fase vegetativa y afectan las propiedades poscosecha de la papa (Giletto *et al.* 2013, Ruza *et al.* 2013, Duguma y Chewaka 2019).

Para la variedad de papa Elbe-UCR, se hipotetizó una tendencia al desarrollo de tubérculos pequeños por desbalances entre el N y K, por lo que se redujo considerablemente las aplicaciones de fuentes nitrogenadas, y se incrementó las aplicaciones con fuentes altas en potasio en comparación con las recomendaciones para otras variedades de papa disponibles en la literatura (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009, Grzebisz *et al.* 2017, da Silva *et al.* 2020).

En el presente trabajo, se determinó la necesidad de reducir las dosis de N (195 kg ha<sup>-1</sup> de N) y se evaluó el uso del Kmag (0-0-22-18-22 (S)) como una fuente de K, Mg y S, generando un excelente rendimiento de tubérculos de tamaño comercial en comparación con los valores de rendimiento promedio reportados para Costa Rica (Avilés y Piedra 2017).

Pese a lo anterior, el ajuste de las dosis de fertilizante a partir de fórmulas comerciales disponibles en el mercado resultó difícil de conseguir. Esto último sugiere la necesidad de continuar con las investigaciones sobre dosis y formulación para esta variedad, la cual, debido a sus atributos como una mayor tolerancia a plagas y enfermedades, su alto contenido de

sólidos y bajo contenido de azúcares reductores (ideal para uso industrial), se presenta como una variedad muy prometedora para la agrocadena costarricense de papa.

## CONCLUSIONES

Los requerimientos nutricionales de la variedad Elbe-UCR son distintos a los de otras variedades que los productores utilizan actualmente en Costa Rica. La variedad Elbe-UCR presentó una gran capacidad de extracción de calcio y potasio, y no requiere los niveles altos de nitrógeno que se aplican regularmente los productores en Costa Rica.

Las fuentes genéricas comerciales de fertilizante granulado que se comercializan en la actualidad no se adaptan completamente a los requerimientos nutricionales de Elbe-UCR, pues se requiere mayor cantidad de calcio y menor cantidad de nitrógeno. Dichas proporciones son difíciles de conseguir en las fórmulas comerciales disponibles, por lo que se debe implementar las aplicaciones con fuente de calcio de forma independiente.

Los resultados obtenidos en la validación de las curvas de acumulación y el análisis de presupuestos parciales para la variedad Elbe-UCR, demostraron cambios en la estructura de costos de producción con los cambios en las dosis de fertilizante, donde un incremento en las dosis de fertilizante no siempre representó mayores rendimientos.

El potencial de rendimiento, características destacables en vigor, sanidad de follaje, así como propiedades industriales para la elaboración de bastones y frituras, hacen de la variedad Elbe-UCR promisoría para el mercado de Costa Rica.

## LITERATURA CITADA

- Alvarado, A; Bertsch, F; Bornemisza, E; Cabalceta, G; Forsythe, W; Henríquez, C; Mata, RA; Molina, E; Salas, R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo y Centro de Investigaciones Agronómicas-Universidad de Costa Rica. 111 p.
- Alvarado, A; Iturriaga, I; Smyth, JT; Ureña, JM; Portuéguez, E. 2009. Efecto de la fertilización con fósforo sobre el rendimiento y la absorción de nutrimentos de la papa en un Andisol de Juan Viñas, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(1):45-61. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v33i1.6734>
- Alvarado, A; Mata, R. 2016. Soils of Costa Rica: an agroecological approach. Chapter 4. *In* Kappelle M (ed.). *Costa Rican Ecosystems*. Chicago, USA, University of Chicago Press. p. 64-93.
- Ávalos, J; Villalobos, A. 2018. Análisis económico: un estudio de caso de *Jatropha curcas* L. mediante la metodología de presupuestos parciales. *Agronomía Mesoamericana* 29(1):95-104. DOI: <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.27901>
- Avilés, J; Piedra, R. 2017. Manual del cultivo de papa en Costa Rica (*Solanum tuberosum* L.) San José, Costa Rica, INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). 92 p.
- Badillo-Tovar, V; Castellanos Ramos, J; Muñoz Ramos, J; Sánchez García, P; Villalobos-Reyes, S; Vargas-Tapia, P. 2004. Demanda nutrimental del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, en la región del bajo. *Revista Chapingo Serie Hortícola* 10(1):67-74.
- Bertsch, F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. p. 83-110
- Bertsch, F. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. San José, Costa Rica, ACCS. p. 184-189.
- Bertsch, F; Bejarano, JA; Corrales, M. 2005. Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen modificado y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(3):137-142.
- Brenes, A; Gómez-Alpizar, L. 2009. La variedad de papa Desiree en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(1):155-157. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v33i1.6743>
- Brenes, A; Rivera, C; Vásquez, V. 2002. Principales enfermedades y plagas de la papa en Costa Rica. San José, Costa Rica, EUNED. s. p.
- Bonnel, E. 2008. Potato Breeding: a Challenge, as ever!. *Potato Research* 51(3):327-332. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11540-008-9116-z>
- Buol, SW; Southard, RJ; Graham, RC; McDaniel, PA. 2011. Soil genesis and classification. (6 ed.). Chichester, UK, John Wiley & Sons. p. 543.
- Cabalceta, G; Saldías, M; Alvarado, A. 2005. Absorción de nutrimentos en el cultivar de papa MNF-80. *Agronomía Costarricense* 29(3):107-123. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v29i3.6785>

- Cavazos, T; Bettolli, ML; Campbell, D; Sánchez Rodríguez, RA; Mycoo, M; Arias, PA; Rivera, J; Simões-Reboita, M; Gulizia, C; Hidalgo, HG; Alfaro, EJ; Stephenson, TS; Sörensson, AA; Cerezo-Mota, R; Castellanos, E; Ley, L; Mahon, R. 2024. Challenges for climate change adaptation in Latin America and the Caribbean region. *Frontiers in Climate* 6: 1392033. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1392033>
- Connell, TR; Koenig, JP; Stevenson, WR; Kelling, KA; Curwen, D; Wyman, JA; Binning, LK. 1991. An integrated systems approach to potato crop management. *Journal of Production Agriculture* 4(4):453-460. DOI: <https://doi.org/10.2134/jpa1991.0453>
- da Silva, C; Soares, M; Ferreira, M; Cavalcante, A; de Andrade, G; de Aquino, L. 2020. Dry matter and macronutrient extraction curves of potato varieties in the Alto Paranaíba region, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 24(3):176-186. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n3p176-186>
- de Almeida, F; Torres, W; Cabrera, J; Arzuaga, J. 2018. Crecimiento de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L., cv Romano), en la provincia de Huambo, Angola, bajo dos densidades de plantación. *Cultivos Tropicales* 39(3):31-40.
- Díaz-Romeu, R; Hunter, A. 1978. Metodología de muestreo de suelo, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 61 p.
- Duguma, H; Chewaka, M. 2019. Role of nitrogen on potato production: a review. *Journal of Plant Sciences* 7(2):36-42.
- Earle, R. 2020. *Feeding the People: The Politics of the Potato*. s. l. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108688451.001>
- Fernandes, AM; Soratto, RP; Souza, EFC; Job, ALG. 2017. Nutrient uptake and removal by potato cultivars as affected by phosphate fertilization of soils with different levels of phosphorus availability. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 41:e0160288. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160288>
- Gathungu, GK; Aguyoh, JN; Isutsa, DK. 2015. Optimization of seed potato specific density, starch and dry matter contents and tuberization capacity of resultant plants through integrated irrigation, nitrogen and phosphorus management. *Journal of Plant Sciences* 3(4):225-233.
- Giletto, C; Monti, M; Ceroli, P; Echeverria, H. 2013. Efecto de la fertilización con nitrógeno sobre la calidad de tubérculos de papa (var. Innovator) en el sudeste Bonaerense. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 14(2):217-222.
- Gómez-Alpízar, L; Carbone, I; Ristaino, JB. 2007. An Andean origin of *Phytophthora infestans* inferred from mitochondrial and nuclear gene genealogies. *Proceedings of the National Academy of Science* 104(9):3306-3311. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0611479104>
- Gómez, M; Magnitskiy, S; Rodríguez, L; Darghanm A. 2017. Accumulation of N, P and K in the tubers of potato (*Solanum tuberosum* L. ssp. andigena) under contrasting soils of the Andean region of Colombia. *Agronomía Colombiana* 35(1):59-67.
- Grzebisz, W; Čermák, P; Rroco, E; Szczepaniak, W; Potarzycki, J; Füleky, G. 2017. Potassium impact on nitrogen use efficiency in potato – a case study from the central – east Europe. *Plant Soil Environ* 63(9): 422-427. DOI: <https://doi.org/10.17221/344/2017-pse>
- Holdridge, LR. 1967. *Life Zone Ecology*, Tropical Science Center, San José, Costa Rica.
- Horton, D. 1982. Análisis de presupuesto parcial para investigación en papa a nivel de finca. *Boletín de Información Técnica* 16. Lima, Perú, CIP (Centro Internacional de la Papa). 15 p.
- Kalra, Y. 1998. *Handbook of reference methods for plant analysis*. Soil and Plant Analysis Council, Inc. Boca Raton, FLA, CRC Press. 300 p.
- Kozak, M; Piepho, HP. 2018. What's normal anyway? Residual plots are more telling than significance tests when checking ANOVA assumptions. *Journal of Agronomy and Crop Science* 204(1):86-98. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12220>
- Nanzyo, M; Dahlgren, R; Shoji, S. 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. In Shoji, S; Nanzyo, M; Dahlgren, SR (eds.). *Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization*. *Developments in Soil Science* (21). Amsterdam, The Netherlands, Elsevier. p. 145-188.
- ONS (Oficina Nacional de Semillas). 2005. *Reglamento Técnico para la Certificación de Semilla de Papa. (Solanum tuberosum)*. Costa Rica. s. p.
- Oliveira, JS; Brown, HE; Gash, A; Moot, DJ. 2016. An explanation of yield in three potato cultivars. *Agronomy Journal* 108(4):1434-1446. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0486>
- Prasad, KK. 2018. Challenges and opportunities in potato production towards sustainable horticulture development. In *Sustainable Horticulture Development and Nutrition Security* (Vol. 3). Balgaluru, India, Scientific Publishers. p. 194-205.
- R Studio Team. 2015. *R Studio: Integrated Development for R*. Boston: R Studio, Inc. (en línea). Consultado 23 mar. 2024. Disponible en <http://www.rstudio.com>
- Reyes, M. 2001. Análisis económico de experimentos agrícolas con presupuestos parciales: re-enseñando el uso de este enfoque. *Boletín informativo* 1. Universidad de San Carlos, Guatemala. 31 p.

- Ruza A; Skrabule, I; Vaivode, A. 2013. Influence of nitrogen on potato productivity and nutrient use efficiency. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences*. 67(3):247-253. DOI: <https://doi.org/10.2478/prolas-2013-0043>
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2024. Boletín Estadístico Agropecuario 34. Serie Cronológica 2019 – 2022. (en línea). Consultado 2 jul. 2024. Disponible en <http://www.sepsa.go.cr/>
- Sierra, BC; Santos, A; France, I; Kalazich, B; Contreras, S. 2013. El cultivo de la papa en la región de Coquimbo. Manejo del suelo, fertilización y algunos otros factores de manejo agronómico. *Boletín INIA* N° 266. La Serena, Chile. 134 p.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to soil taxonomy*. (12 ed.). United States Department of Agriculture. Lincoln, Nebraska, Natural Resources Conservation Service. 362 p.
- Solano, J; Villalobos, R. 2001. Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfico climático de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 8(1):26-39.
- Soratto, RP; Yagi, R; Job, ALG; Fernandes, AM. 2021. Fertilization management strategies for 'Agata' potato production. *Horticultura Brasileira* 39:389-396. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20210407>
- Zelalem, A; Tekalign, T; Nigussie, D. 2009. Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) to different rates of nitrogen and phosphorus fertilization on Vertisols at Debre Berhan, in the central highlands of Ethiopia. *African Journal of Plant Science* 3(2):16-24.





## ANÁLISIS DE CALIDAD DE CACAO UTILIZANDO ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CERCANO PORTABLE: DESAFÍOS PARA DIFERENCIACIÓN GEOGRÁFICA

Paola Quesada-Arguedas<sup>1</sup>, Carlos Hernández-Aguirre<sup>2/\*</sup>,  
Alejandro Vargas-Martínez<sup>3</sup>, Alejandra Mencia-Guevara<sup>4</sup>

**Palabras clave:** *Theobroma cacao* L.; NIR; análisis multivariado; origen geográfico; poscosecha.

**Keywords:** *Theobroma cacao* L.; NIR; multivariate analysis; geographic origin; post-harvest.

**Recibido:** 20/02/24

**Aceptado:** 28/05/24

### RESUMEN

**Introducción.** La combinación de curvas de calibración generadas por espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) con aprendizaje profundo ofrece una oportunidad para desarrollar métodos de discriminación de la calidad y origen del cacao, apoyando estrategias de valorización territorial y trazabilidad de cacaos diferenciados. **Objetivo.** Validar la aplicabilidad de un método de discriminación de cacaos según su origen geográfico, mediante técnicas de espectroscopía NIR portátil y aprendizaje profundo. **Materiales y métodos.** Se recolectaron 193 muestras de granos de cacao fermentados y secos de diversas regiones de Costa Rica, utilizando 72 muestras para calibración y 121 para predicción. Las muestras se analizaron para determinar

su composición proximal, acidez titulable y compuestos fenólicos. Se empleó un espectrofotómetro NIR para recopilar datos espectrales (400-1700 nm). El preprocesamiento de los datos espectrales permitió desarrollar modelos de regresión para predecir características químicas. Para el modelo de clasificación geográfica, se eliminó el ruido de los espectros y se realizó un análisis de conglomerados, usando la distancia Gower y el método de agrupamiento Ward sobre los componentes obtenidos mediante Análisis de Componentes Principales (ACP). **Resultados.** La grasa fue el principal componente presente en el conjunto de muestras (>39,67%). El análisis espectral demostró que el NIR puede diferenciar el cacao según el grado de fermentación y el contenido de compuestos fenólicos. El modelo de regresión de mínimos cuadrados parciales

\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: carlos.hernandez.aguirre@una.cr

1 Estudiante de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

 0009-0009-2497-7717.

2 Laboratorio de Calidad e Innovación Agroalimentaria (LABCIAGRO), Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

 0000-0002-0059-8028.

3 Escuela de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

 0000-0001-8039-8984.

4 Laboratorio de Calidad e Innovación Agroalimentaria (LABCIAGRO), Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

 0000-0003-2449-0510.

extendida (XLS) mostró la mejor capacidad predictiva para las propiedades químicas. El agrupamiento por origen geográfico identificó cuatro grupos influenciados principalmente por propiedades químicas relacionadas con prácticas poscosecha. **Conclusión.** El modelo de regresión lineal empleado demostró ser superior en la predicción de características químicas proximales. Se observó que la limitada diversidad genética y las prácticas poscosecha estandarizadas podrían reducir la variabilidad de calidad asociada al origen geográfico, limitando la utilidad del NIR en la identificación del origen y la trazabilidad. Se sugiere explorar espectros más amplios y equipos adicionales para análisis multivariados avanzados.

## ABSTRACT

**Quality analysis of cocoa using portable Near-Infrared Spectroscopy (NIR): Challenges towards geographical differentiation. Introduction.** The combination of calibration curves generated by Near-Infrared (NIR) spectroscopy with deep learning offers an opportunity to develop methods for discriminating the quality and origin of cocoa, supporting strategies for territorial valorization and traceability of differentiated cocoas. **Objective.** To validate the applicability of a method for discriminating cocoa according to its geographical origin using portable NIR spectroscopy and deep learning techniques. **Materials and methods.** A total of 193 samples

of fermented and dried cocoa beans from different regions of Costa Rica were collected, using 72 samples for calibration and 121 for prediction. The samples were analyzed to determine their proximal composition, titratable acidity, and phenolic compounds. A NIR spectrophotometer was used to collect spectral data (400-1700 nm). Spectral data preprocessing allowed for the development of regression models to predict chemical characteristics. For the geographical classification model, noise was removed from the spectra, and cluster analysis was performed using the Gower distance and Ward's clustering method on components obtained through Principal Component Analysis (PCA). **Results.** Fat was the main component present in the sample set (>39.67%). Spectral analysis demonstrated that NIR can differentiate cocoa based on the degree of fermentation and phenolic compound content. The extended partial least squares (XLS) regression model showed the best predictive capacity for chemical properties. Clustering by geographical origin identified four groups mainly influenced by chemical properties related to post-harvest practices. **Conclusion.** The linear regression model used proved superior in predicting proximal chemical characteristics. It was observed that limited genetic diversity and standardized post-harvest practices could reduce the quality variability associated with geographical origin, limiting the utility of NIR in origin identification and traceability. It is suggested to explore broader spectra and additional equipment for advanced multivariate analyses.

## INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo de importancia económica y social en comunidades rurales del trópico y forma parte de un sistema agroalimentario fundamental en la evolución histórica, cultural y comercial de Centroamérica, vinculando alrededor de 15 000

familias que habitan zonas remotas y de difícil acceso (Orozco Aguilar *et al.* 2007). La región mesoamericana alberga una enorme riqueza de variabilidad genética y es fuente de cacaos con características especiales de sabores y aromas particulares (Zarrillo *et al.* 2018), los cuales se definen como “cacao fino y de aroma” de acuerdo con la Organización Internacional de Cacao.

Se reconocen dos clases de calidades comerciales, cacao a granel “bulk” (calidad estándar) atribuido particularmente al tipo Forastero, y cacao fino (calidad alta) atribuido a los tipos Criollo y Trinitario. Sin embargo, diversos estudios muestran que independientemente del tipo de cacao, las prácticas postcosecha (fermentación y secado) tienen un papel central en la generación de la heterogeneidad en el perfil de calidad (Papalexandratou *et al.* 2019, Verce *et al.* 2021). Además, las condiciones geográficas y agronómicas así como el tipo de suelo, clima, y madurez de la mazorca también influyen en el perfil aromático. Así, los cacaos de distintos orígenes geográficos tienen diferentes características organolépticas que influyen en la calidad del chocolate.

La diferenciación geográfica registrada para granos de cacao es poco común, a causa de una asociación entre la calidad del chocolate y el lugar de origen de las fábricas y centros de transformación final, y no la geografía vinculada a los granos de cacao como materia prima. De forma que, los cacaos mesoamericanos se encuentran desprotegidos ante un uso inadecuado e informal de su procedencia, lo cual destaca la importancia de estudios técnicos en diferentes territorios con producción de cacao que permitan evidenciar una correlación entre calidad y origen geográfico (Hernandez y Granados 2021).

La espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) se posiciona como una técnica rápida y sencilla para evaluar alimentos y productos agrícolas. El principio de esta técnica se basa en la absorción de radiación electromagnética en longitudes de onda de 780 a 2500 nm en una matriz determinada. Sus principales ventajas: 1) la rapidez en la que realiza una medición (entre 15 y 90 segundos), 2) el procedimiento no destructivo de la muestra y 3) el nulo uso de reactivos químicos.

La espectroscopía NIR se ha aplicado en el análisis cualitativo y cuantitativo de granos de cacao: discriminación de granos por el grado de fermentación (Teye *et al.* 2014); análisis de los niveles de  $\text{NH}_3$  en la determinación del origen geográfico (Hue *et al.* 2014); análisis de pH,

humedad, índice de fermentación y compuestos fenólicos totales (Anyidoho *et al.* 2021, Kutsanedzie *et al.* 2017, Sunoj *et al.* 2016, Teye 2022, Teye *et al.* 2015); estimación de compuestos químicos proximales como proteína, grasa, cenizas y carbohidratos totales (Barbin *et al.* 2018, Forte *et al.* 2023); incidencia de moho (Kutsanedzie *et al.* 2018); clasificación geográfica (Anyidoho *et al.* 2020), y diferenciación entre granos de orgánicos y convencionales (Anyidoho *et al.* 2021).

Todos los estudios anteriores se han basado en la implementación de enfoques de machine learning para la reducción del ruido espectral y el desarrollo de modelos de predicción. Para obtener la información de los datos espectrales se han aplicado técnicas de análisis quimiométrico, incluidos los mínimos cuadrados parciales (PLS), redes neuronales artificiales (ANN), y máquina de vectores de soporte (SVM).

La combinación de curvas de calibración generadas por espectroscopía NIR con aprendizaje profundo supone una oportunidad para crear métodos de discriminación de calidad y origen del cacao, apoyar estrategias de valorización territorial y gestionar sistemas de trazabilidad de productos diferenciados. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue validar de la aplicabilidad de un método de discriminación de cacaos según su origen geográfico, mediante el uso de técnicas de espectroscopía NIR portátil y métodos de machine learning. Adicionalmente, se evaluó la aplicación del NIR en la predicción de características de calidad mediante la construcción de modelos generados por análisis proximal y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Muestras

Los granos de cacao fermentados y secos se obtuvieron de territorios de Costa Rica asociados a la producción de cacao fino y de aroma, los cuales, para motivos de este estudio, se agruparon de la siguiente manera: Región Huetar Norte (Upala, Guatuso, Los Chiles, Sarapiquí, Pococí,

Guácimo, Matina, Limón, Valle de la Estrella), Región Caribe (Talamanca, Puerto Viejo, Sixo-la), Región Central (Turrialba), Región Brunca (Valle del General, Coto Brus, Ciudad Neily, Laurel, Paso Canoas), y Centroamérica (Nicaragua, Panamá y El Salvador) durante el periodo 2022 - 2023. Para cada muestra se registró: procedencia, tipología genética, tipo de fermentación. Dentro de los tipos de fermentación se encontró los siguientes: 1) sistemas artesanales con 5-6 días de fermentación en cajones de madera, y 2) sistemas industriales con volúmenes superiores a los 200 kg por lote y 6 días de fermentación en cajones de madera tipo escalera.

Se incluyeron 72 muestras en el conjunto de calibración y 121 muestras en el grupo de predicción. El conjunto de calibración se utilizó para desarrollar el modelo de predicción de las características químicas (Tabla 1), mientras que el conjunto de predicción se utilizó para evaluar el desempeño de los modelos desarrollados.

Tabla 1. Características químicas evaluadas en los granos de cacao utilizados para el desarrollo de la investigación.

Variable	Unidad	Referencia
Fibra cruda	%	ANKOM Technology (2006)
Proteína	mg mL <sup>-1</sup>	AOAC (2005a)
Humedad	%	AOAC (2005b)
Cenizas	%	AOAC (2005c)
Grasa total	%	AOAC (2005d)
Acidez titulable	meq 100 <sup>-1</sup>	Hinneh <i>et al.</i> (2018)
Epicatequina	mg g <sup>-1</sup>	Rojas (2020)
Teobromina	mg g <sup>-1</sup>	Rojas (2020)
Cafeína	mg g <sup>-1</sup>	Rojas (2020)

### Instrumento e información espectral

El espectro de cada muestra se recopiló mediante el espectrofotómetro de infrarrojo cercano (BÜCHI, Suiza). Todas las muestras se procesaron en modo rotatorio durante 15 segundos y los escaneos abarcaron un rango de espectro de luz visible + NIR (400 - 1700 nm) con dos nanómetros de resolución (650 puntos). Se utilizaron dos lámparas distintas denominadas como vista superior o vista inferior del equipo, para los escaneos del conjunto de calibración. Para el conjunto de predicción se utilizó solamente la vista superior. El espectrómetro portátil proporcionó las medidas en partes de absorbancia proporcionales (log 1/R), donde R representa la reflectancia.

### Conjunto de calibración

Se utilizaron 72 muestras para la creación del modelo de análisis proximal. Se procesaron 300 g de granos enteros en una licuadora durante 45 segundos (tres intervalos de licuado de cinco segundos con pausas de 10 segundos) con la mínima intensidad. No se realizó descascarillado de los granos ni tamizado del polvo resultante del licuado. Se colocaron 250 g de muestra procesada para la medición con la vista inferior y 10 g de la misma muestra para realizar la medición con la vista superior.

### Conjunto de predicción

Se procesaron 50 g de granos enteros en una licuadora durante 45 segundos (tres intervalos de licuado de cinco segundos con pausas de 10 segundos) con la mínima intensidad. No se realizó descascarillado de los granos ni tamizado del polvo resultante del licuado. Se colocaron 10 g de cacao para obtener los espectros según la vista superior del equipo.

### Análisis proximal

Se tomaron los 250 g de 72 muestras de granos de cacao molidos utilizados en los escaneos previos para realizar análisis proximales de

fibra cruda (ANKOM 2006), proteína (AOAC 2005a), humedad (AOAC 2005b), cenizas (AOAC 2005c) y grasa total (AOAC 2005d).

### Compuestos fenólicos

El análisis de cromatografía líquida (HPLC) se elaboró siguiendo la metodología descrita por Rojas (2020), donde los estándares químicos utilizados para comparar los tiempos de retención y las longitudes de onda con las muestras seleccionadas fueron: cafeína, (-) epicatequina y teobromina (Sigma Aldrich, Estados Unidos). Los solventes metanol (MeOH), acetonitrilo y ácido acético (CH<sub>3</sub>-COOH) fueron grado HPLC (Sigma Aldrich, Estados Unidos). El agua desionizada se obtuvo mediante el sistema Millipore Alpha Q.

Los granos de cacao destinados para el análisis del epicatequina y metilxantinas (teobromina y cafeína) fueron liofilizados (OPERON modelo FDU-7006) durante 48 horas, bajo las condiciones de 0 atm y -83°C. Seguidamente, se les removió la cáscara y fueron molidos con un mortero, posteriormente se almacenaron en un congelador a -20°C.

Para la extracción de grasas, se tomaron 2 g de cacao molido en un tubo plástico cónico, se agregaron 10 ml de hexano y se colocaron en baño ultrasónico a 40°C por 20 minutos y se sometieron a centrifugación a 25°C y 6607 RCF rpm durante 10 minutos y se descartó el sobrenadante. La muestra fue extraída con 10 ml de metanol-agua a una proporción de 15:6. Se colocó en baño ultrasónico a 40°C por 20 minutos, se centrifugó a 4807 RCF por 10 minutos, y el sobrenadante fue vertido en un falcon de 50 ml.

El procedimiento se ejecutó tres veces consecutivas, se combinaron las tres extracciones y se aforaron (con el mismo solvente de extracción) a un volumen de 40 ml. El sobrenadante, se volvió a centrifugar por 10 min a 25°C y 6607 RCF, y se filtró a través de filtros de 0,45 µm (Sartorius stedim biotech). Finalmente, se incorporaron en viales para HPLC.

El análisis cromatográfico se efectuó mediante el sistema HPLC Agilent serie 1200

(Agilent Technologies, Estados Unidos), el cual consta de un muestreador automático para viales de 2 mL, una bomba cuaternaria, un detector de diodos (DAD) y un detector ultravioleta (UV). Los componentes fueron separados utilizando una columna Zorbax Eclipse Plus C18 de 4,6 x 100 mm y 3,5 µm (Agilent Technologies, Estados Unidos).

El sistema solvente aplicado consistió en: eluyente A (agua desionizada con 1% ácido acético) y eluyente B (acetonitrilo). El gradiente de elución se programó con un flujo de 1 mL min<sup>-1</sup>, de la siguiente manera: 100% A por 10 minutos, 75% A por cinco minutos, 50% A por dos minutos, 0% A por un minuto; con un post-acondicionamiento de un minuto. La detección se realizó con el DAD a longitudes de onda de  $\lambda$  275,4 nm y  $\lambda$  325,5 nm.

La identificación de los compuestos se realizó con patrones de cafeína, (-) epicatequina, y teobromina utilizando las mismas condiciones descritas del método de HPLC. Los resultados fueron expresados en mili unidades de absorbancia por segundo (mUA s<sup>-1</sup>), cuyos valores medios ( $\pm$ ) de las desviaciones estándar representan un valor aproximado del contenido de tales compuestos. Sin embargo, esto no alude con exactitud la concentración por gramo de cacao desgrasado.

### Acidez titulable

Siguiendo la metodología realizada por Hinneh *et al.* (2018), se molieron 10 g de granos enteros usando una licuadora, los cuales fueron añadidos a un erlenmeyer con 90 mL de agua en punto de ebullición. El homogeneizado se filtró y se enfrió a 20–25°C. A continuación, se tituló una alícuota de 50 mL hasta un punto final de pH de 8,1 con NaOH 0,1 N (Sigma Aldrich, Estados Unidos). En el titulador, la acidez se expresó en meq 100<sup>-1</sup> (%). Es importante señalar que este procedimiento no fue para cuantificar el pH real del grano de cacao en sí, sino para medir la acidez derivada de los ácidos del grano que se difunden en el agua.

### **Preprocesamiento de la información espectral**

El análisis quimiométrico se realizó con el programa NIRWise Plus para Windows 10. Se realizó un preprocesamiento de la información espectral para mejorar el conjunto de datos sin procesar y reducir el ruido en los espectros con el método Escalado y Centrado (SNV), el cual resta el promedio y divide por la desviación estándar del vector. El pretratamiento estándar normal variable elimina las interferencias multiplicativas de la dispersión, el tamaño de las partículas y el cambio de la distancia de la luz, por lo que es altamente recomendable para muestras sólidas (Teye *et al.* 2020). En este caso, se calculó la primera derivada mediante cinco puntos de datos y una ventana de suavizado de cero puntos de datos (BÜCHI s.f.).

### **Modelos de regresión lineal de predicción para características químicas**

Los modelos de calibración para las características químicas estimadas fueron desarrollados con el programa NIRWise Plus para Windows 10 utilizando tres tipos de algoritmos de regresión: regresión de mínimos cuadrados parciales extendida (XLS), regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) y regresión de componentes principales (PCR).

Se realizó una validación cruzada utilizando las 72 muestras de calibración, en donde el algoritmo seleccionó un 80% de dichas muestras como conjunto de calibración y el 20% restante como conjunto de predicción. Para la evaluación de los resultados de la validación individual, se tomaron en cuenta los siguientes estadísticos:  $R^2$  de calibración, error estándar de la calibración (SEC),  $R^2$  de predicción y error estándar de la validación cruzada (SECV). Esto permitió la comparación de diferentes modelos de predicción.

### **Modelo de clasificación geográfica**

Se utilizó el programa Rstudio para eliminar el ruido de las muestras y corregir debilidades de señal. Se aplicaron técnicas de Escalado y

Centrado (SNV), el método de la primer y segunda derivada (D1 y D2), corrección de señal multiplicativa extendida (EMSC) y corrección de dispersión multiplicativa (MSC) y sus combinaciones bajo distinto orden de aplicación. Las derivadas se calcularon a partir del algoritmo de Savitzky-Golay.

Se aplicó un análisis de componentes principales (ACP) para reducir la dimensionalidad de 499 longitudes de onda a la cantidad de componentes donde el porcentaje de varianza acumulada explicase alrededor del 90%.

Se utilizaron las dimensiones obtenidas en ACP y se procedió a realizar un análisis de conglomerados utilizando la distancia Gower, método de agrupamiento Ward y se tomó como criterio para la determinación del número de grupos una línea de corte al 33% del rango de distancia observadas. Además, con los grupos formados, se hicieron tablas de contingencia para determinar la asociación ( $p < 0,05$ ) con las variables “Tipo de producción”, “Región” y “Genética”. Con las variables que fueron significativas se hizo un análisis de correspondencias múltiples para lograr describir los grupos.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Propiedades químicas proximales**

Los parámetros descriptivos de las propiedades químicas proximales de cacao seco se muestran en la Tabla 2. La grasa fue el mayor constituyente, en términos porcentuales, del conjunto de muestras, seguido por la proteína. Indicadores tales como epicatequina, la relación teobromina/cafeína, acidez y humedad, mostraron mayor peso en cuanto al coeficiente de variación. Lo anterior apunta a la relevancia del proceso poscosecha en la generación de variabilidad, y resalta la importancia de dichas variables en los criterios de discriminación de muestras según su origen. Estos resultados coincidieron con los publicados por Forte *et al.* (2023) donde de igual forma se encuentra mayor peso en el coeficiente de variación asociado a indicadores de la fermentación y el manejo poscosecha.

Tabla 2. Resultados de los parámetros químicos estimados en granos de cacao secos durante el desarrollo de la investigación.

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Acidez (meq 100 <sup>-1</sup> )	0,78	14,35	7,354	2,573	34,980
Humedad (m m <sup>-1</sup> ; %)	4,34	12,70	7,761	1,595	20,552
Grasa (m m <sup>-1</sup> ; %)	39,67	56,50	47,991	3,428	7,142
Proteína (m m <sup>-1</sup> ; %)	8,83	21,43	13,114	1,633	12,450
Cenizas (m m <sup>-1</sup> ; %)	2,24	4,62	3,539	0,371	10,489
Relación teobromina/cafeína	1,14	18,38	6,037	3,015	49,939
Epicatequina (mg g <sup>-1</sup> )	-1,20	9,62	3,143	1,750	55,684

Nota: meq = miliequivalentes, % m/m = porcentaje masa/masa.

### Características espectrales de los granos de cacao secos

El conjunto de espectros crudos de 193 muestras de cacao seco se presenta en la Figura 1A. El comportamiento espectral observado en las longitudes de onda de 400 a 1700 nm es similar al reportado por otros autores (Forte *et al.* 2023, Anyidoho *et al.* 2021). Se aplicó el preprocesamiento quimiométrico de Escalado y Centrado (SNV) a dicho espectro para obtener solo las características útiles de las muestras y construir un modelo confiable. El espectro que resultó de dicho análisis se presenta en la Figura 1B. En ambos gráficos es notable que el espectro visible de menores longitudes de onda (400 – 500 nm) es la región donde se generó mayor ruido.

Los espectros claves fueron en los rangos de 1150-1250, y 1400-1500 nm, correspondientes a grupos funcionales O-H, C-H, C-H<sub>2</sub>, C-H<sub>3</sub>, NH<sub>2</sub>, los cuales están a su vez asociados con carbohidratos complejos, agua, alcoholes alifáticos, grasas, polifenoles, ácidos orgánicos y anillos bencénicos. Específicamente, el contenido de grasa está relacionado con la banda de absorción alrededor de 1200 nm (Hayati *et al.* 2021), mientras que el contenido de humedad ha sido reportado en las regiones de 1460-1490 nm (Caporaso *et al.* 2018).

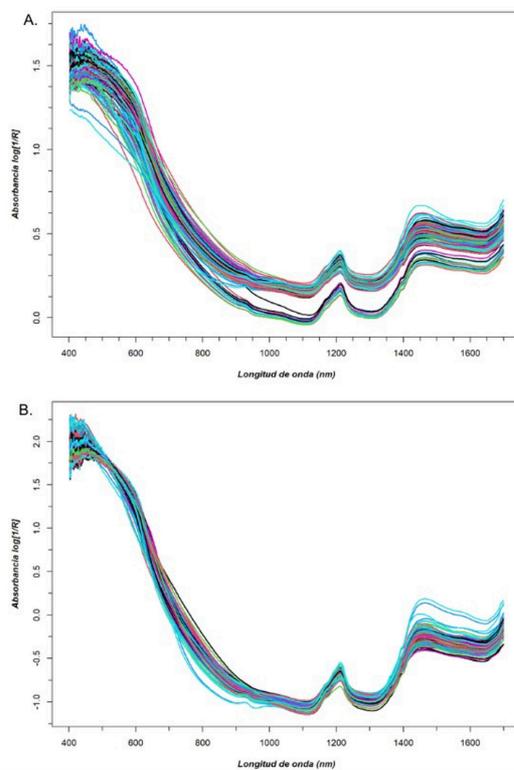


Figura 1. Espectro crudo (A) y espectro posterior a la aplicación del pretratamiento SNV (B) de las muestras de cacao seco analizadas durante el desarrollo de la investigación.

El rango 1200 – 1460 nm está relacionado con C-H, C-H<sub>2</sub>, C-H<sub>3</sub>, lo cual se asocia a compuestos con anillos bencénicos y fenólicos (tales como epicatequina). De esta manera, este estudio demuestra una alta capacidad del NIR para diferenciar cacao según su grado de fermentación, en respuesta a la variación de epicatequina y polifenoles, los cuales a su vez son indicadores de acidez, amargor y astringencia observado por Anyidoho *et al.* (2021).

### Modelos de regresión lineal para la predicción de parámetros químicos proximales

Los modelos de predicción fueron establecidos con la variable independiente (x) dada por

el espectro crudo y con la variable dependiente (y) dada por los contenidos respectivos de cada propiedad. Los estadísticos de cada modelo de predicción para las propiedades químicas se muestran en la Tabla 3. El modelo que obtuvo los valores máximos de coeficiente de correlación para la totalidad de las propiedades químicas fue XLS, en donde la propiedad de humedad presentó el valor máximo ( $R^2 = 0,922$ ) y grasa el valor mínimo ( $R^2 = 0,811$ ), bajo este modelo de regresión lineal. Asimismo, la Figura 2 ilustra los gráficos de regresión lineal para cada una de las propiedades proximales.

Tabla 3. Rendimiento de tres modelos de regresión lineal para siete propiedades medidas utilizando la vista inferior del NIR en cacao seco durante el desarrollo de la investigación.

Método de regresión	Estadísticos	Acidez	Humedad	Proteína	Grasa	Cenizas	Epicatequina	Teobromina/ cafeína
Regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS)	SEC	0,825	0,447	0,752	1,311	0,087	0,635	0,495
	R2	0,845	0,863	0,622	0,872	0,845	0,857	0,847
	SECV	1,505	0,721	1,536	2,315	0,215	0,756	1,241
	R2	0,543	0,676	0,031	0,635	0,297	0,793	0,297
Regresión de componentes principales (PCR)	SEC	1,251	0,566	0,648	2,465	0,186	0,672	1,164
	R2	0,628	0,806	0,759	0,576	0,293	0,840	0,405
	SECV	1,675	0,654	1,235	3,177	0,222	0,785	1,533
	R2	0,400	0,747	0,475	0,353	0,089	0,786	0,095
Regresión de mínimos cuadrados parciales extendida (XLS)	SEC	0,636	0,358	0,500	1,643	0,075	0,521	0,460
	R2	0,902	0,922	0,822	0,811	0,885	0,904	0,883
	SECV	0,749	0,438	0,583	2,009	0,087	0,588	0,519
	R2	0,865	0,888	0,759	0,722	0,848	0,878	0,853

Nota: SEC = error estándar de calibración,  $R^2$  = coeficiente de correlación de la regresión, SECV = error estándar de la validación cruzada.

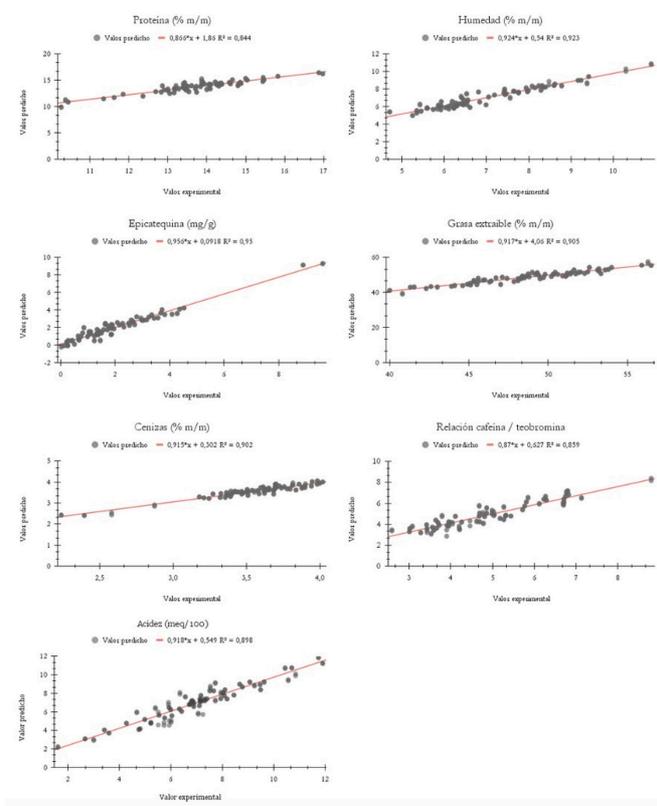


Figura 2. Curvas de calibración del modelo XLS para los parámetros químicos analizados.

### Aplicación del NIR como herramienta de predicción de origen

El análisis de Componentes Principales (ACP) utilizó 499 lecturas de longitudes a lo largo del espectro implementado (400-1700 nm), reduciendo la dimensionalidad a solamente tres componentes que lograron explicar el 93% de la variabilidad de los datos. Los resultados del agrupamiento basado en un modelo de Clasificación No Supervisada (CNS), utilizando las dimensiones seleccionadas, se muestran mediante un dendrograma en la Figura 3, donde se evidenciaron al menos cuatro grupos a una altura de 15 en el eje Y. Se graficaron dichos grupos mediante la asignación de color en la Figura 4.

En la Tabla 4 se observa la distribución de muestras por origen, según el grupo establecido previamente. El grupo 1 y 2 presentan en su mayoría muestras del Caribe y Región Huetar Norte; en el grupo 3 se agrupan en su mayoría las muestras de la Región Central, Caribe y Región Huetar Norte; y en el grupo 4 se agrupan menor cantidad de todos los orígenes. En un esfuerzo por comprender el peso de propiedades químicas en el agrupamiento por origen, se observa que el grupo 1 incluye muestras con un alto potencial de calidad atribuido a altos contenidos de grasa, así como valores bajos en la relación teobromina/cafeína y en el contenido de epicatequina. En este grupo se observan muestras predominantemente procesadas de manera artesanal, con genéticas basadas en híbridos trinitarios y clones CATIE.

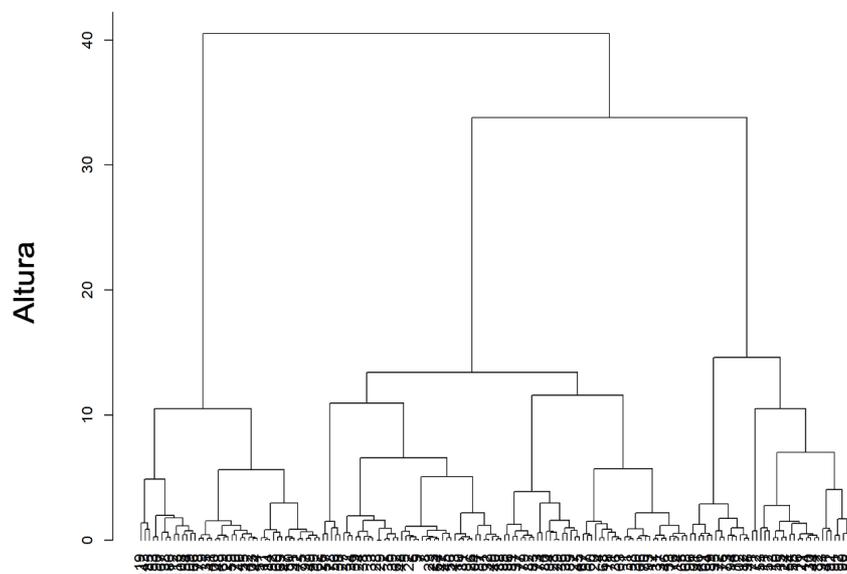


Figura 3. Dendrograma de agrupación a partir de los componentes principales obtenidos de las muestras de cacao seco analizadas durante el desarrollo de la investigación.

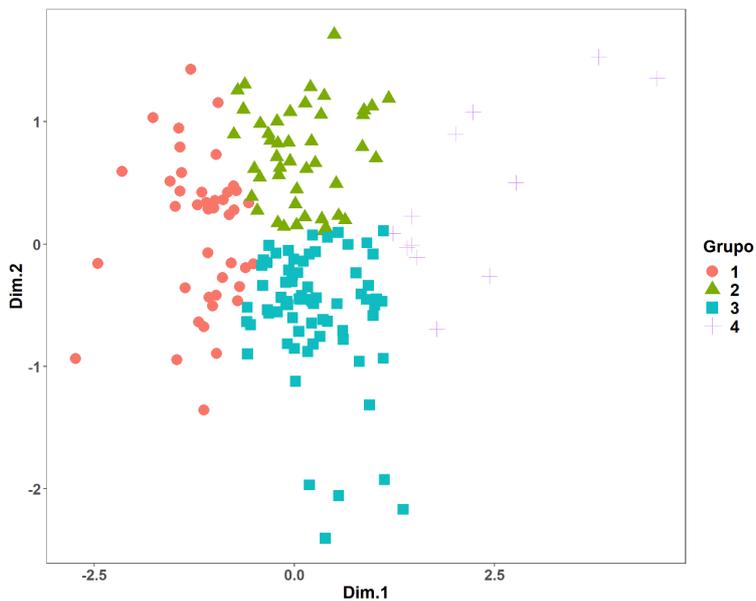


Figura 4. Agrupación de las muestras de cacao seco analizadas durante el desarrollo de la investigación según los resultados del dendrograma.

Tabla 4. Asociación de los grupos formados y el origen geográfico de las muestras de cacao seco analizadas durante el desarrollo de la investigación.

Región	Grupo			
	1	2	3	4
Brunca	3	7	14	2
Caribe	22	22	26	3
Huetar Norte	9	13	10	3
Centroamérica	4	0	6	0
Central	4	3	18	4

En el grupo 2 se incluye un amplio número de muestras con altos valores de acidez y humedad, evidenciando algunas carencias en el manejo poscosecha. En el grupo 3 las muestras presentan menor humedad y acidez, así como bajos valores de epicatequina, con genéticas diversas incluyendo cacaos acriollados e híbridos. El grupo 4 incluye muestras de calidad inferior, reflejada en altos valores de acidez, humedad y epicatequina.

La débil agrupación que se obtuvo en este estudio demostró que las prácticas poscosecha contribuyen mayormente a la diferenciación de calidad en comparación con el origen geográfico de las muestras, un aspecto que ha sido revisado recientemente por autores (D’Souza *et al.* 2017, Fanning *et al.* 2023).

De manera similar Anyidoho *et al.* (2020) realizaron un estudio para la discriminación por origen en consideración de cuatro países en África, atribuyendo los criterios de segregación a propiedades fisicoquímicas, aunque no demuestran con claridad un agrupamiento por origen. Se demostró el potencial de dicha herramienta en la predicción de propiedades fisicoquímicas derivadas del manejo poscosecha.

La fermentación y el secado del cacao son procesos espontáneos y realizados en finca, con múltiples factores que influyentes que han sido descritos por varios autores (Kongor *et al.* 2016, Febrianto *et al.* 2022) provocando una calidad variable del producto terminado. Por su parte, la genética aporta características de composición

molecular homogéneas según el cultivar, específicamente contenido de proteína, polisacáridos y polifenoles. Por tanto, es altamente probable producir granos de cacao con un perfil de calidad pobre, según el proceso de fermentación y el secado realizado (De Vuyst y Weckx 2016).

Es una práctica común de los productores de cacao, utilizar mezclas de granos fermentados y secos de diferentes orígenes y prácticas para complementar o contrastar las inconsistencias en calidad, dadas por el proceso poscosecha. Se resalta así la utilidad del NIR primordialmente en el análisis de compuestos químicos macromoleculares, así como de parámetros relacionados con la fermentación, los cuales reducen el peso del efecto de atributos asociados al origen geográfico.

## CONCLUSIONES

Este estudio demuestra la utilidad del NIR mediante un abordaje estadístico multivariado para la discriminación rápida, no destructiva y eficiente del cacao por calidad, en consideración de parámetros proximales e indicadores relevantes. Los resultados muestran que un modelo de regresión lineal combinado a pretratamiento de Clasificación No Supervisada (CNS), permite la identificación de calidad de los granos de cacao al mostrar superioridad en la predicción de características químicas proximales. Las técnicas propuestas podrían ser implementadas en el estudio y control de calidad de granos de cacao secos hacia una estimación de parámetros relevantes de fácil operación.

Se debe anotar que el establecimiento de plantaciones de limitada diversidad genética (clones internacionales y comerciales), junto a prácticas poscosecha estandarizadas, contribuye con una minimización del grado de diversidad de calidad asociada al origen geográfico. De manera que, la utilidad del NIR se ve limitada en la identificación de origen y trazabilidad por procedencia. En perspectiva de un espectro limitado al rango de 400-1700 nm, podrían recomendarse estudios con capacidad superior (>1700 nm) y el

uso de equipos portátiles complementarios tales como GC MS, NMR, FTIR, entre otros, mediante enfoques de análisis multivariado.

## AGRADECIMIENTOS

A las Agencias Regionales del Ministerio de Agricultura y Ganadería por su apoyo logístico en la recolección de muestras, al igual que productores de cacao del país por la facilitación de estas. Así como al Laboratorio de Análisis y Servicios Químicos, por el apoyo brindado durante esta investigación.

## LITERATURA CITADA

- ANKOM Technology. 2006. Method 10. Crude Fiber Analysis in Feeds By Filter Bag Technique (For A2000, A20001). s. p.
- Anyidoho, EK; Teye, E; Agbemafle, R. 2020. Non-destructive authentication of the regional and geographical origin of cocoa beans by using a handheld NIR spectrometer and multivariate algorithm. *Analytical Methods* 12(33):4150-4158. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0ay00901f>
- Anyidoho, EK; Teye, E; Agbemafle, R. 2021. Differentiation of Organic Cocoa Beans and Conventional Ones by Using Handheld NIR Spectroscopy and Multivariate Classification Techniques. *International Journal of Food Science*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/1844675>
- Anyidoho, EK; Teye, E; Agbemafle, R; Amuah, CLY; Boadu, VG. 2021. Application of portable near infrared spectroscopy for classifying and quantifying cocoa bean quality parameters. *Journal of Food Processing and Preservation* 45(5):1-13. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.15445>
- AOAC. 2005a. Meat and Meat Products: Official Method 981.10. *In Official Methods of Analysis* 39.1.19. p. 7.
- AOAC. 2005b. Meat and Meat Products: Official Method 950.46. *In Official Methods of Analysis* 39.1.02. p. 1.
- AOAC. 2005c. Animal Feed: Official Method 942.05. *In Official Methods of Analysis* 4.1.10. p. 8.
- AOAC. 2005d. Meat and Meat Products: Official Method 991.36. *In Official Methods of Analysis* 39.1.08. p. 3.
- Barbin, DF; Maciel, LF; Bazoni, CHV; Ribeiro, MS; Carvalho, RDS; Bispo, ES; Miranda, MPS; Hirooka, EY. 2018. Classification and compositional characterization of different varieties of cocoa beans by near infrared spectroscopy and multivariate statistical analyses. *Journal of Food Science and Technology* 55(7):2457-2466. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3163-5>
- Caporaso, N; Whitworth, MB; Fowler, MS; Fisk, ID. 2018. Hyperspectral imaging for non-destructive prediction of fermentation index, polyphenol content and antioxidant activity in single cocoa beans. *Food Chemistry* 258:343-351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.039>
- D'Souza, RN; Grimbs, S; Behrends, B; Bernaert, H; Ullrich, MS; Kuhnert, N. 2017. Origin-based polyphenolic fingerprinting of Theobroma cacao in unfermented and fermented beans. *Food Research International* 99:550-559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.007>
- De Vuyst, L; Weckx, S. 2016. The cocoa bean fermentation process: from ecosystem analysis to starter culture development. *Journal of Applied Microbiology* 121(1): 5-17. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.13045>
- Fanning, E; Eyres, G; Frew, R; Kebede, B. 2023. Linking cocoa quality attributes to its origin using geographical indications. *Food Control* 151:109825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109825>
- Febrianto, NA; Wang, S; Zhu, F. 2022. Chemical and biological properties of cocoa beans affected by processing: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 62(30):8403-8434. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1928597>
- Forte, M; Currò, S; Van de Walle, D; Dewettinck, K; Mirisola, M; Fasolato, L; Carletti, P. 2023. Quality Evaluation of Fair-Trade Cocoa Beans from Different Origins Using Portable Near-Infrared Spectroscopy (NIRS). *Foods* 12(1):4. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12010004>
- Hayati, R; Zulfahrizal, Z; Munawar, AA. 2021. Robust prediction performance of inner quality attributes in intact cocoa beans using Near-Infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Heliyon* 7(2):e06286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06286>
- Hernández, CE; Granados, L. 2021. Quality differentiation of cocoa beans: implications for geographical indications. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 101(10):3993-4002. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11077>
- Hinne, M; Semanhyia, E; Van de Walle, D; De Winne, A; Tzompa-Sosa, DA; Scalone, GLL; De Meulenaer, B; Messens, K; Van Durme, J; Afoakwa, EO; De Cooman, L; Dewettinck, K. 2018. Assessing the influence of pod storage on sugar and free amino acid profiles and the implications on some Maillard reaction related flavour volatiles in Forastero cocoa beans. *Food Research International* 111:607-620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.064>
- Hue, C; Gunata, Z; Bergounhou, A; Assemat, S; Boulanger, R; Sauvage, FX; Davrieux, F. 2014. Near infrared spectroscopy as a new tool to determine cocoa fermentation levels through ammonia nitrogen quantification. *Food Chemistry* 148:240-245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.005>

- Kongor, JE; Hinnah, M; de Walle, D Van; Afoakwa, EO; Boeckx, P; Dewettinck, K. 2016. Factors influencing quality variation in cocoa (*Theobroma cacao*) bean flavour profile - A review. *Food Research International* 82:44-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.012>
- Kutsanedzie, FYH; Chen, Q; Hassan, MM; Yang, M; Sun, H; Rahman, MH. 2018. Near-Infrared system coupled chemometric algorithms for enumeration of total fungi count in cocoa beans neat solution. *Food Chemistry* 240:231-238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.117>
- Kutsanedzie, FYH; Chen, Q; Sun, H; Cheng, W. 2017. In situ cocoa beans quality grading by Near-Infrared-chemodyes systems. *Analytical Methods* 9(37):5455-5463. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7ay01751k>
- Orozco Aguilar, L; Deheuvels, O; Villalobos, M; Somarriba Chávez, RE. 2007. El sector cacao en Centroamérica (en línea). s.l., s.e. Consultado 24 de noviembre de 2023 . Disponible en [www.catie.ac.cr](http://www.catie.ac.cr)
- Papalexandratou, Z; Kaasik, K; Kauffmann, LV; Skorstengaard, A; Bouillon, G; Espensen, JL; Hansen, LH; Jakobsen, RR; Blennow, A; Krych, L; Castro-Mejía, JL; Nielsen, DS. 2019. Linking cocoa varietals and microbial diversity of Nicaraguan fine cocoa bean fermentations and their impact on final cocoa quality appreciation. *International Journal of Food Microbiology* 304(June):106-118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.05.012>
- Rojas, K. 2020. Transformaciones bioquímicas asociadas a la calidad de algunos grupos genéticos de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante un proceso de fermentación controlada. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional. 96 p.
- Sunoj, S; Igathinathane, C; Visvanathan, R. 2016. Nondestructive determination of cocoa bean quality using FT-NIR spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture* 124:234-242. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2016.04.012>
- Teye, E. 2022. Mini shortwave spectroscopic techniques and multivariate statistical analysis as a tool for testing intact cocoa beans at farmgate for quality control in Ghana. *Infrared Physics and Technology* 122. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.INFRARED.2022.104092>
- Teye, E; Anyidoho, E; Agbemafle, R; Sam-Amoah, LK; Elliott, C. 2020. Cocoa bean and cocoa bean products quality evaluation by NIR spectroscopy and chemometrics: A review. *Infrared Physics and Technology* 104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103127>
- Teye, E; Huang, X yi; Lei, W; Dai, H. 2014. Feasibility study on the use of Fourier transform Near-Infrared spectroscopy together with chemometrics to discriminate and quantify adulteration in cocoa beans (en línea). *Food Research International* 55:288-293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.11.021>
- Teye, E; Huang, X; Sam-Amoah, LK; Takrama, J; Boison, D; Botchway, F; Kumi, F. 2015. Estimating cocoa bean parameters by FT-NIRS and chemometrics analysis. *Food Chemistry* 176:403-410. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2014.12.042>
- Verce, M; Schoonejans, J; Hernandez Aguirre, C; Molina-Bravo, R; De Vuyst, L; Weckx, S. 2021. A combined metagenomics and metatranscriptomics approach to unravel Costa Rican cocoa box fermentation processes reveals yet unreported microbial species and functionalities. *Frontiers in microbiology* 12:641185.
- Zarrillo, S; Gaikwad, N; Lanaud, C; Powis, T; Viot, C; Lesur, I; Fouet, O; Argout, X; Guichoux, E; Salin, F; Solorzano, RL; Bouchez, O; Vignes, H; Severts, P; Hurtado, J; Yepez, A; Grivetti, L; Blake, M; Valdez, F. 2018. The use and domestication of *Theobroma cacao* during the mid-Holocene in the upper Amazon. *Nat. Ecol. Evol.* 2:1879-1888.





## PROCESOS EROSIVOS EN ANDISOLES CULTIVADOS CON CEBOLLA (*Allium cepa* L.): CONTRIBUCIÓN DEL SEDIMENTO ADHERIDO AL BULBO A LA PÉRDIDA DEL SUELO Y SUS NUTRIMENTOS

Silvia Marín-Araya<sup>1, 2/\*</sup>, Mario Villatoro-Sánchez<sup>2</sup>, Manuel E. Camacho-Umaña<sup>3</sup>

**Palabras clave:** pérdida de suelo por cosecha del cultivo; erosión del suelo; conservación de suelos; labranza mecanizada; materia orgánica; suelos derivados de cenizas volcánicas.

**Keywords:** soil loss due to crop harvesting (SLCH); soil erosion; soil conservation; mechanized tillage; organic matter; volcanic ash-derived soils.

**Recibido:** 17/06/24

**Aceptado:** 30/07/24

### RESUMEN

**Introducción.** La pérdida de suelo es un proceso natural y complejo, el cual se puede potenciar por condiciones climáticas y labores agrícolas como la mecanización. Una forma de suelo (muy poco conocida) se debe al sedimento adherido al producto al momento de la cosecha, el cual se pierde permanentemente de los sembradíos. La cuantificación de este sedimento es un factor adicional a la pérdida de suelo por erosión y los nutrientes que pueden perderse de una parcela. **Objetivo.** Cuantificar la pérdida de suelo por cosecha del cultivo en dos ciclos de cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.) bajo tres implementos de labranza mecanizada. **Materiales y métodos.** Se establecieron parcelas (240 m<sup>2</sup> cada una) en un diseño de bloques completos al azar, las cuales se sembraron con cebolla. Al momento de la cosecha

del cultivo, se recolectó el sedimento adherido a la superficie de los bulbos y se estimaron los valores de pérdida de suelo para las parcelas evaluadas. Se realizaron análisis químicos de fertilidad, utilizando las metodologías KCl-Olsen y C/N total a los sedimentos obtenidos para calcular las pérdidas de nutrientes y materia orgánica por labores de cosecha. **Resultados y discusión.** Se cuantificaron cantidades de sedimento entre 594,71 ± 471,93 y 1083,94 ± 78,45 kg ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup> que se pierde de los sembradíos de cebolla de forma irreversible. En adición, se pueden perder hasta 3,04 ± 0,27 kg de N, 0,15 ± 0,02 kg de P, y 1,16 ± 0,12 kg de K por hectárea por ciclo de cultivo. **Conclusiones.** Los resultados obtenidos son pioneros en el estudio de erosión y pérdida de suelo por cosecha del cultivo en Costa Rica, y pueden servir de referencia para futuros estudios de manejo y conservación de suelos.

\* Autora para correspondencia. Correo electrónico: semarina@ncsu.edu / silvia.marinarayaya@ucr.ac.cr  
1 North Carolina State University, Department of Crop and Soil Sciences, Campus Box 7620, Raleigh, NC 27695, USA.  
 0000-0002-5494-677X.

2 Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Centro de Investigaciones Agronómicas, Laboratorio de Suelos y Foliar, San José, Costa Rica.  
 0000-0002-6678-5854.  
3 Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Centro de Investigaciones Agronómicas, Laboratorio de Recursos Naturales, San José, Costa Rica.  
 0000-0001-7589-8327.

## ABSTRACT

**Erosive processes in Andisols cultivated with onion (*Allium cepa* L.): Contribution of sediment adhered to the bulb to soil and nutrient loss. Introduction.** Soil loss is a natural and complex process that can be exacerbated by climatic conditions and agricultural practices such as tillage. One form of soil loss (which is not well-known) occurs due to sediment adhered to the product at harvest time, which is permanently lost from the fields. Quantifying this sediment is an additional factor to soil loss by erosion and the potential loss of nutrients from farmlands. **Objective.** To quantify the soil loss due to crop harvesting (SLCH) in two onion (*Allium cepa* L.) crop cycles under three mechanized tillage implements. **Materials and methods.** Field plots (240 m<sup>2</sup> each) were established following

a complete randomized block design, and further planted with onion. Sediment adhered to the surface of the bulbs at the time of harvest was collected, and SLCH values were estimated for the evaluated plots. Fertility analyses (chemical analysis extracted in KCl-Olsen and total C/N) were conducted on the obtained sediments to calculate the loss of nutrients and organic matter due to harvesting activities. **Results and discussion.** They were quantified sediment values between  $594.71 \pm 471.93$  and  $1083.94 \pm 78.45$  kg ha<sup>-1</sup> cycle<sup>-1</sup> that are irreversibly lost from the onion fields. Additionally, up to  $3.04 \pm 0.27$  kg of N,  $0.15 \pm 0.02$  kg of P, and  $1.16 \pm 0.12$  kg of K per hectare per cycle can be lost. **Conclusions.** The results obtained are pioneering in the study of erosion and soil loss due to crop harvesting in Costa Rica and can serve as a reference for future soil management and conservation studies.

## INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural fundamental en los agroecosistemas, con múltiples funciones ecológicas dentro de las cuales destacan su rol conectivo con la atmósfera y su influencia sobre la biosfera; su capacidad de almacenamiento de energía y materia; en adición a su papel como un enorme reservorio de carbono (Hillel 1998, Lal 2012, Hartge *et al.* 2016).

El suelo es recurso de suma importancia a nivel agroecológico y económico, el cual es altamente vulnerable a la degradación y la pérdida irreversible del mismo (Lal 2001, Bertsch 2006), tanto por procesos naturales (como el potencial erosivo de la lluvia, la gravedad y el viento) (Vahrson 1990, Villatoro-Sánchez *et al.* 2015) como por procesos asociados a factores antrópicos, entre ellos, la labranza mecanizada (Lal 2019). En ese sentido, la labranza mecanizada (producto de sistemas agrícolas de producción intensiva) es un factor de suma importancia debido a su influencia directa sobre la magnitud de la pérdida de suelo que se asocia a los otros

factores naturales anteriormente mencionados (Mehuys *et al.* 2009).

Dichos procesos erosivos ocurren comúnmente en suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles), en especial en aquellos que se desarrollan en las posiciones de ladera y las cimas de los sitios elevados (Shoji *et al.* 1993, Alvarado *et al.* 2001). Estos suelos se extienden a lo largo de los países de Centro América, principalmente los que se localizan en las cercanías de los numerosos volcanes de la región (Alvarado *et al.* 2001, Alvarado 2022).

De forma general, los Andisoles son descritos en la literatura como suelos resistentes a los procesos erosivos, debido a sus propiedades físicas como altos contenidos de materia orgánica y materiales nano cristalinos, altas porosidades y tasas de infiltración que evitan los flujos erosivos por precipitación pluvial (Shoji *et al.* 1993, Zehetner y Miller 2006).

Sin embargo, bajo las condiciones climáticas tropicales imperantes en la región Centroamericana (Solano y Villalobos 2001, Alfaro 2002) las tasas de erosión reportadas para los Andisoles

(tanto cuantificadas de forma experimental como calculadas con la ecuación universal de pérdida de suelo) pueden llegar a valores de hasta 76 Ton ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Lianes *et al.* 2009, Cerretelli *et al.* 2023); valores considerados como erosión severa según la clasificación propuesta por FAO (1979). Curiosamente, estas elevadas tasas de erosión incluyen principalmente el poder erosivo de la lluvia como agente causal, sin contemplar otros posibles mecanismos de erosión y remoción del suelo asociados a las actividades agrícolas, entre ellos, erosión por labranza mecanizada y la pérdida de suelo por cosecha del cultivo (Soil loss due to crop harvesting; SLCH).

La erosión por labranza mecanizada consiste en la masa de suelo que es removida y transportada por el implemento de labranza (apero) desde un sector del sembradío a otro durante las labores de mecanización y preparación del suelo (Govers *et al.* 1999). Este tipo de erosión depende en gran medida del valor de la pendiente del terreno y la dirección de la mecanización (es decir si esta se hace de forma perpendicular o paralela a la pendiente), donde valores elevados de pendiente (15-35%) y con mecanización realizada a favor de la pendiente pueden acarrear cantidades significativas de sedimento (Mehuys *et al.* 2009). En Andisoles de la zona alta de Cartago, se han reportado tasas de erosión por labranza mecanizada de hasta 250 Ton ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup>, cuando la mecanización se realiza a favor de pendiente con arado de disco (Tiessen *et al.* 2010).

Por otro lado, la pérdida de suelo por cosecha del cultivo (SLCH) es probablemente el mecanismo con menor reconocimiento dentro de los estudios de erosión y pérdida de suelo (Kuhwald *et al.* 2022). SLCH consiste en la pérdida de sedimentos, los cuales salen adheridos a la parte comercial del cultivo y salen de forma irreversible del sitio de siembra (Ruysschaert *et al.* 2004, Mwangi *et al.* 2015, Oshunsanya *et al.* 2018, Kuhwald *et al.* 2022). Este mecanismo puede generar tasas de erosión de hasta 22 Ton ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup>, y depende en gran medida de la morfología del cultivo, la densidad de siembra y

el tipo de suelo en el que se establece el cultivo (Ruysschaert *et al.* 2004, Han-Qing *et al.* 2016, Kuhwald *et al.* 2022).

Los estudios sobre SLCH son bastante escasos (Kuhwald *et al.* 2022), y la gran mayoría de estos trabajos se centran en la pérdida de sedimentos. Un componente de suma importancia de la remoción de sedimentos que ocurre por este mecanismo es la pérdida irreversible de materia orgánica y elementos esenciales para el crecimiento vegetal que salen del sitio de siembra cada vez que se cosecha el cultivo (Mwangi *et al.* 2015, Han-Qing *et al.* 2016).

A nivel Centroamericano, no se tienen reportes en la literatura de estudios sobre erosión de suelo que cuantifiquen las pérdidas asociadas a SLCH, y mucho menos las cantidades de nutrimentos y la materia orgánica que se pierden de forma irreversible del sitio de siembra. Para atender esta problemática se planteó la presente investigación, la cual tuvo como objetivo cuantificar la pérdida de suelo por cosecha del cultivo (SLCH) en dos ciclos de cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.) bajo tres implementos de labranza mecanizada en Andisoles de las tierras altas de Cartago, Costa Rica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de estudio

El presente estudio se desarrolló en una finca dedicada a la producción de los cultivos de cebolla (*Allium cepa* L.) y papa (*Solanum tuberosum* L.) ubicada en el distrito de Tierra Blanca, cantón de Cartago (9°54'20" N; 83°52'24" O) a una elevación de 1973 msnm (Figura 1). Los suelos de la finca se clasificaron dentro del orden de los Andisoles, con un régimen de humedad ústico (Suborden *Ustands*), comúnmente clasificados dentro del Subgrupo taxonómico *Typic Haplustands* (Alvarado *et al.* 2001, Alvarado y Mata 2016).

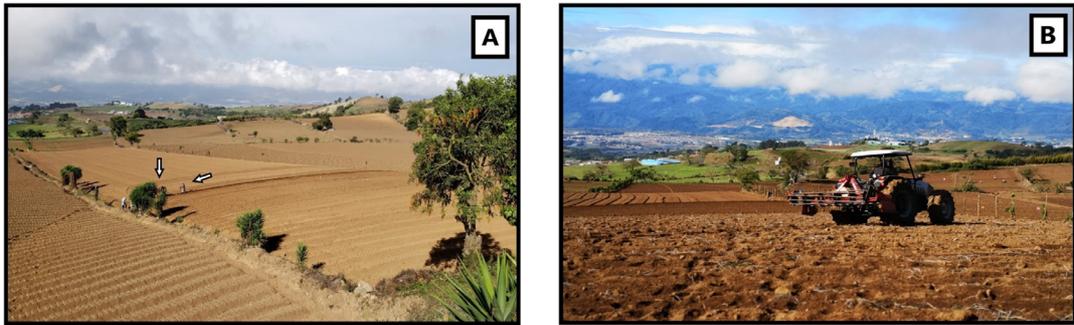


Figura 1. Vista panorámica de la finca dedicada al cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.) donde se estableció el presente estudio. Flechas blancas señalan preparación de las camas mediante un arado de vertedera tirado por un caballo (A). Labores de mecanización con la rastra rotativa (RR), uno de los implementos evaluados (B).

La pendiente promedio del terreno (medida con un clinómetro Suunto® PM-5) fue de 10%, y el suelo en su horizonte superficial Ap presentó una textura franco-arcillosa, un contenido de materia orgánica promedio de 2,9%, un valor de densidad aparente de  $1,13 \text{ Mg m}^{-3}$  y un 52% de espacio poroso total antes del inicio del experimento. Más detalles sobre el sitio experimental se pueden consultar en el trabajo de Marín-Araya y Villatoro-Sánchez (2023).

### Mecanización, siembra y manejo del cultivo

El experimento inició en mayo del 2019, cuando se sembró el primer ciclo de cebolla variedad “Álvora” durante el primer semestre del año, mientras que el segundo ciclo se sembró en abril del 2020 manteniendo la misma variedad.

Las parcelas establecidas con el cultivo de la cebolla recibieron tres fertilizaciones con fórmula  $\text{N} - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{K}_2\text{O}$  distribuidas según la etapa fenológica: 1) 12-24-12 30 días después del trasplante (ddt), 2) 12-11-18 a los 60 ddt, y 3) 19-4-19 a los 90 ddt, para un total de 173 kg de N, 59 kg P y 164 kg de K por hectárea por ciclo. También se realizaron prácticas de control de malezas mediante la aplicación de herbicidas preemergentes: Pendimetalina ( $2 \text{ L ha}^{-1}$ ) aplicado 2 días después del trasplante; Linurón ( $1 \text{ kg ha}^{-1}$ )

y Oxifluren ( $200 \text{ mL ha}^{-1}$ ) ambos aplicados a los 30 días después del trasplante.

La labranza convencional para el cultivo de la cebolla consistió en un subsolado a 50 cm de profundidad en dirección transversal a la pendiente. Dicho subsolador se compuso de 7 picos, con 320 mm de espaciado entre picos, 1920 mm de largo y un peso de 530 kg, el cual se pasó a una velocidad de avance de  $6 \text{ km h}^{-1}$ . Posteriormente se utilizó un arado de disco a favor de pendiente, con una velocidad de pase de  $10 \text{ km h}^{-1}$ , y seguidamente se utilizó el rotador, a favor de pendiente para afinar el suelo. Estas operaciones de labranza fueron realizadas con un tractor Lamborghini® R3.105, con un peso de 4067 kg y una potencia máxima de 102 CV y 2300 rpm. El tractor no usaba ningún tipo de lastre en las llantas, taco de tipo R1 y presión de 40 psi. Finalmente se elaboraron los surcos por medio de un arado de vertedera de tipo universal tirado por un caballo (Figura 1A).

Se establecieron tres tratamientos de labranza mecanizada, donde se mantuvo el subsolado y arado inicial, pero reemplazando el rotador (RD) por una rastra rotativa (RR) o un palín mecánico (PM). Se mantuvo un tratamiento con rotador (el cual sirvió como control) para comparar con la labranza común que desarrolla el productor. Una descripción más detallada sobre los implementos de labranza empleados

se puede encontrar en el trabajo realizado por Marín-Araya y Villatoro-Sánchez (2023).

El área de cada repetición (una parcela de 240 m<sup>2</sup>) fue cubierta por 2 a 3 pases adyacentes del implemento respectivo, la cantidad dependió del ancho de pase de cada uno de los implementos. En este caso, PM solamente necesitó 2 pases, mientras que RR y RD requirió de 3 pases.

### Diseño experimental y muestreo

El diseño experimental utilizado en el presente ensayo fue de bloques completos al azar, con tres repeticiones para cada tratamiento de mecanización, con una parcela de 240 m<sup>2</sup> como una unidad experimental. Las muestras para cuantificar la pérdida de sedimento como consecuencia de la cosecha del cultivo fueron colectadas al final de cada ciclo del cultivo de la cebolla (en el momento de la cosecha), y consistió en tomar el sedimento pegado alrededor de los bulbos de las cebollas cosechadas (Figura 2). Para esto se cosecharon 12 cebollas a lo largo de 1,25 m lineales, se sacudieron y el sedimento remanente fue colectado en una bolsa con la ayuda de una brocha (Figura 2). En este caso, se tomaron tres puntos al azar por parcela (para un total de 36 cebollas evaluadas) y se confeccionó una muestra compuesta por cada repetición (para un total de 9 muestras compuestas por ciclo). Para cada muestra recolectada, se determinó su peso en campo (g) mediante una balanza granataria portátil, y posteriormente se determinó su porcentaje de humedad gravimétrica (*w*) siguiendo los lineamientos de Topp y Ferré (2002) en el laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (CIA-UCR).

Las muestras compuestas fueron procesadas en el laboratorio de suelos y foliares del CIA-UCR. Se realizó un análisis químico completo (pH, acidez, Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, Fe, Mn) donde se utilizó la solución extractora KCl – Olsen modificado (Díaz-Romeu y Hunter 1978), y se determinó el contenido de nitrógeno y carbono orgánico (CO) mediante un auto analizador de C por combustión seca (Horneck y Miller 1998).



Figura 2. Proceso de cuantificación de los sedimentos que se pierden por labores de cosecha en el cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.) obtenidos en un Andisol de Tierra Blanca, Cartago.

El dato de materia orgánica (MO) se calculó a partir de los valores de C, multiplicando dichos valores por una constante de 1,43 para obtener el resultado de MO.

Adicionalmente, mediante muestras no alteradas (colectadas en cilindros) se determinó la densidad aparente del suelo en cada una de las unidades experimentales siguiendo los lineamientos de Grossman y Reinsch (2002).

Con los datos de peso de muestra en campo ( $M_w$ ) y su correspondiente porcentaje de humedad gravimétrica (*w*), se determinó la masa de sólidos ( $M_s$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$M_s = \frac{M_w}{1 + \frac{w}{100}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dichos valores de masa de sólidos permitieron calcular la masa de suelo que se pierde por la cosecha de la cebolla, y tomando en cuenta la densidad de plantas y el área de las parcelas, se pudo calcular la tasa de pérdida de sedimentos por ciclo ( $\text{Ton ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$ ).

También, se calculó la cantidad de elementos (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn) y MO que salen del sitio de siembra como sedimentos adheridos al bulbo, a partir de los valores de obtenidos de análisis químicos y la cantidad de sedimento mediante los siguientes procedimientos:

1. Se transformó la masa de sedimento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en volumen ( $\text{L ha}^{-1}$ ) con la correspondiente densidad aparente del suelo ( $\text{Mg m}^{-3}$  o  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ) mediante la siguiente igualdad:

$$\text{Sedimento} \left( \frac{\text{L}}{\text{ha}} \right) = \text{sedimento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) * \frac{1}{\text{densidad aparente}} \left( \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ kg}} \right) * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \quad \text{Ecuación 2}$$

Esto con el objetivo de facilitar los cálculos, ya que los análisis químicos de suelo que se hacen de rutina en Costa Rica (Corrales *et al.* 2005) expresan los contenidos de elementos por unidad de volumen ( $\text{cmol}_{(+)} \text{ L}^{-1}$ ,  $\text{mg L}^{-1}$ ) o bien como un porcentaje total.

2. Si la concentración del elemento fue expresada en  $\text{cmol}_{(+)} \text{ L}^{-1}$  (Ca, Mg, K) se calculó la cantidad del elemento mediante su correspondiente masa equivalente ( $ME_{(g)}$ ), que resultó de dividir su masa molar por la carga correspondiente. El cálculo final se realizó de esta forma:

$$\text{Elemento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) = \text{sedimento} \left( \frac{\text{L}}{\text{ha}} \right) * \text{concentración} \left( \frac{\text{cmol}_{(+)}}{\text{L}} \right) * \frac{0.01 \text{ mol}_{(+)}}{1 \text{ cmol}_{(+)}} * \frac{ME_{(g)}}{\text{mol}_{(+)}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \quad \text{Ecuación 3}$$

3. Si la concentración (P, Fe, Cu, Zn, Mn) se expresó en unidades de ppm ( $\text{mg L}^{-1}$ ) se calculó la cantidad de elemento mediante la siguiente igualdad:

$$\text{Elemento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) = \text{sedimento} \left( \frac{\text{L}}{\text{ha}} \right) * \text{Concentración} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \quad \text{Ecuación 4}$$

4. Si la concentración (N, MO) se expresó en unidades de porcentaje (%) se calculó la cantidad de elemento mediante la siguiente igualdad:

$$\text{Elemento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) = \text{sedimento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) * \text{Concentración} \left( \frac{x \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

### Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante un modelo lineal generalizado (GLM), con una estructura factorial que incluyó los factores: Ciclo de cultivo (C), Implemento de labranza (I) y una interacción entre factores (C x I), con el bloque como factor aleatorio. Para la separación de medias se utilizó el método HSD-Tukey con un  $p$ -value < 0,05. Se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianzas a través de la inspección visual de la distribución de los residuos obtenidos de los modelos ajustados (normal QQ Wally plots y Wally plots) para las variables de respuesta evaluadas siguiendo los lineamientos descritos por Kozak y Piepho (2018).

Todos estos procedimientos anteriores se realizaron mediante el programa estadístico R Studio (R v. 4.0.4, 2021-02-15) “Lost Library Book” (R Studio Team 2015).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Pérdida de suelo por cosecha del cultivo (SLCH) de cebolla en Andisoles

Un componente que se ha estudiado muy poco dentro de los procesos de erosión y pérdida de suelo es la masa de sedimentos que se sale del suelo por la cosecha de cultivos hortícolas. Los resultados obtenidos para la pérdida de suelo por cosecha del cultivo (SLHC por sus siglas en inglés) en función de los implementos de labranza (Figura 3), muestran una tendencia a la reducción en la cantidad de sedimento con la rastra rotativa ( $0,60 \pm 0,47$  Ton  $ha^{-1}$ ), seguida por el palín mecánico ( $0,87 \pm 0,55$  Ton  $ha^{-1}$ ), y el rotador ( $1,05 \pm 0,46$  Ton  $ha^{-1}$ ) siendo el tratamiento que registró mayor cantidad de sedimento adherido al bulbo, sin diferencias significativas entre los tres tratamientos evaluados (Tabla 1; Figura 3).

Una posible causa de esta tendencia fue un problema biótico que se presentó en un sector de la plantación. Debido al diseño del ensayo, una repetición con la rastra rotativa y otra repetición con el palín mecánico coincidieron con un sector donde las plantas presentaron clorosis, un crecimiento reducido y mortalidad (Figura 4). Esta condición afectó el tamaño de los bulbos y de forma indirecta, la cantidad de sedimento colectado en dichas unidades experimentales, en concordancia con lo reportado por Isabirye *et al.* (2007) donde menores rendimientos del camote (*Ipomoea batatas* L.) representaron menores cantidades de sedimentos perdidos como SLCH.

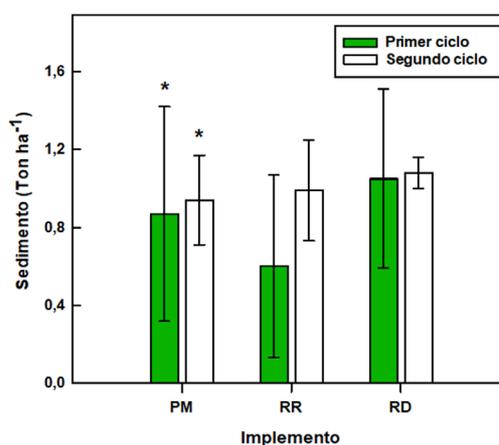


Figura 3. Pérdida de sedimentos por la cosecha del cultivo de cebolla, como respuesta al efecto de tres implementos de labranza en ciclos de producción no continuos en un Andisol de Tierra Blanca, Cartago. Barras de error como error estándar. \* Sin diferencias significativas ( $p$ -value > 0,05) entre las medias por los factores evaluados en el modelo (Tabla 2).

Tabla 1. Resumen del modelo lineal generalizado (GLM) obtenido para la pérdida de sedimento por cosecha de los bulbos de cebolla en un Andisol de Tierra Blanca, Cartago.

Fuente de variación	SC <sup>†</sup>	gl <sup>†</sup>	CM <sup>†</sup>	F <sup>†</sup>	p-value
Ciclo (C)	0,12	1	0,12	0,28	0,6056
Implemento (I)	0,23	2	0,11	0,26	0,7718
C x I	0,11	2	0,06	0,13	0,8765
Error	5,18	12	0,43		
Total	5,64	17			

† SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio; F: Factor F.

En el segundo ciclo de cultivo, la menor cantidad de sedimento colectado se obtuvo con el palín mecánico ( $0,94 \pm 0,23$  Ton ha<sup>-1</sup>), seguido por la rastra rotativa ( $0,99 \pm 0,26$  Ton ha<sup>-1</sup>) y el rotador ( $1,08 \pm 0,08$  Ton ha<sup>-1</sup>). Tampoco se presentaron diferencias significativas entre los implementos de labranza ( $p > 0,05$ ) para este ciclo de cultivo (Tabla 1; Figura 3).



Figura 4. Daño abiótico en el cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.), que generó reducción de crecimiento, mortalidad de las plantas y espacios vacíos en las parcelas evaluadas en el presente estudio. Tierra Blanca, Cartago.

En un estudio realizado en las tierras altas de Tanzania (1400-1600 msnm), Mwango *et al.* (2015) reportaron pérdidas de sedimentos por la cosecha de cebolla de hasta 3,0 Ton ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup> cultivadas en Entisoles y Ultisoles, mientras que Antoneli *et al.* (2021) obtuvieron valores de 3,35 Ton ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup> en Ultisoles de las montañas de Papuã en Paraná, Brasil. Todos estos valores mencionados fueron superiores a los máximos obtenidos en el presente estudio (1,05-1,08 Ton ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup>) en los Andisoles de Tierra Blanca de Cartago. Estas diferencias se deben probablemente a un menor contenido de arcilla en texturas francas o franco arenosas características de los Andisoles (Alvarado *et al.* 2001), las cuales exhiben una menor expresión de las fuerzas de adhesión y cohesión de las partículas del suelo (Nanzzyo *et al.* 1993), y por ende una menor cantidad de sedimento adherido al bulbo de la cebolla en comparación con suelos de texturas arcillosas (Antoneli *et al.* 2021).

Aunque no se encontró diferencias significativas entre los implementos de labranza evaluados, los valores obtenidos de SLCH fueron similares a los resultados de otros trabajos en donde la labranza y el cultivo presentan un efecto importante sobre la cantidad final de sedimento perdido por labores de cosecha, incluyendo el sedimento adherido al producto (Ruyschaert *et al.* 2004, 2006, y 2007, Thomaz y Bereze 2021, Kuhwald *et al.* 2022).

Una mayor alteración del suelo por labranza mecanizada podría tener un efecto en la cantidad de sedimento adherido al bulbo de la cebolla, el cual se podría atribuir a dos posibles causas: 1) un incremento en la densidad de los pelos radicales, y 2) un aumento en el rendimiento del cultivo (Oshunsanya *et al.* 2018). En ese sentido, la labranza modifica la estructura del suelo e incrementa la porosidad al separar los agregados, creando espacios que facilitan el crecimiento y desarrollo radicular (Büchi *et al.* 2017). Dicho incremento en la cantidad de raíces permite una mayor cantidad de partículas de suelo adheridas al cultivo (Oshunsanya *et al.*

2018); lo cual no se vio reflejado en los resultados obtenidos en presente estudio.

### Pérdida de nutrientes por la cosecha del cultivo de cebolla

Uno de los mayores impactos de la erosión del suelo es la pérdida irreversible de elementos esenciales para el crecimiento vegetal (Bertsch 1995, Alewell *et al.* 2020). Los sedimentos que salen del sembradío llevan consigo una cantidad importante de nutrientes, los cuales pueden encontrarse en distintas formas: 1) nutrientes intercambiables (adsorbidos a las partículas coloides) y 2) nutrientes en cantidades totales (en este caso, las intercambiables y no intercambiables).

Los valores obtenidos para N, P, y K se detallan en la Figura 5. No se encontró diferencias significativas asociadas a los factores Ciclo (C), Implemento (I), o su interacción (C x I) para los contenidos de N, mientras que los elementos P y K presentaron diferencias asociadas solamente al factor C (Tabla 2;  $p$ -value <0,05). Estas diferencias se pudieron asociar con la variabilidad en la temperatura, la evapotranspiración y la precipitación pluvial en ambos ciclos de cultivo, donde observó un incremento en la magnitud de las lluvias durante los meses de mayo, junio y septiembre del segundo ciclo de cultivo (Figura 6), lo cual pudo haber tenido un efecto en el crecimiento de la cebolla y la dinámica de los elementos en el suelo, lo que de forma indirecta podría afectar la cantidad de sedimento adherido al bulbo.

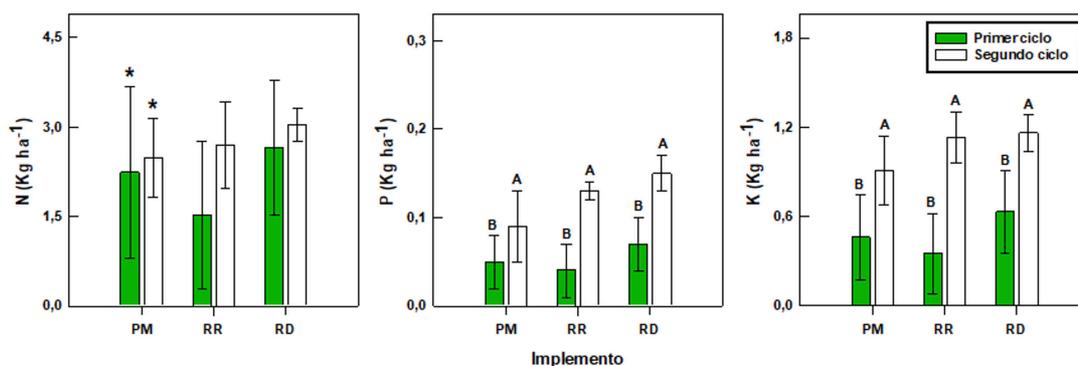


Figura 5. Pérdida de macronutrientes (N, P, K) por la cosecha del cultivo de cebolla como respuesta al efecto de tres implementos de labranza en ciclos de producción no continuos, en un Andisol de Tierra Blanca, Cartago. Barras de error como error estándar. \* Sin diferencias significativas ( $p$ -value >0,05) entre las medias por los factores evaluados (Tabla 2). Letras distintas denotan diferencias significativas ( $p$ -value <0,05) entre las medias para el factor Ciclo (C) evaluado en el modelo (Tabla 2). Los valores de P y K corresponden a cantidades intercambiables, mientras que el N corresponde a N total. P analizado como  $\text{PO}_4^-$ .

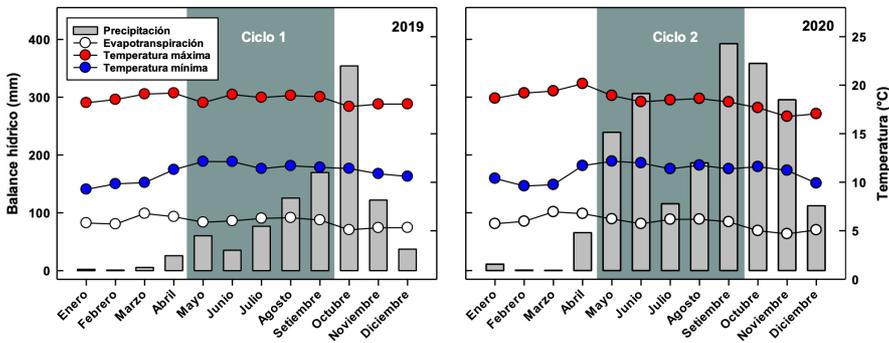


Figura 6. Dinámica de las variables climáticas determinadas para el sitio de estudio en Tierra Blanca de Cartago, durante los dos ciclos del cultivo de la cebolla (2019-2020).

En un ciclo de cultivo de cebolla, se pueden perder hasta  $3,04 \pm 0,27$  kg de N,  $0,15 \pm 0,02$  kg de P, y  $1,16 \pm 0,12$  kg de K por hectárea (Figura 5). Un aspecto importante para considerar es la naturaleza de dichas cantidades, donde el N corresponde a una cantidad total, mientras que el P y K corresponden solamente a la fracción intercambiable (extraída con KCl-Olsen; Bertsch *et al.* 2005), por lo que las pérdidas de P y K como SLCH podrían ser significativamente mayores.

Al respecto, Fallas-Corrales (2013) encontró contenidos totales de P en cinco Andisoles de Costa Rica entre  $760 - 2009$  mg kg<sup>-1</sup> P, lo que podría representar una pérdida total entre  $1,48 - 3,93$  kg ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup> de P (10 – 26 veces más que los obtenidos en el presente estudio) si se considera en el cálculo los valores máximos de sedimentos obtenidos en las parcelas de cebolla evaluadas en ambos ciclos. De forma similar al P, las cantidades de K que se podrían perder como sedimentos durante la cosecha de cebolla podrían ser hasta 3 - 8 veces mayores ( $3,07 - 9,58$  kg ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup> de K, si consideramos los contenidos totales de K en los Andisoles, como los reportados por Molina *et al.* (1986) para seis *Andepts* de Costa Rica (actualmente Andisoles) los cuales variaron entre  $1575 - 4250$  mg k kg<sup>-1</sup>.

Los resultados obtenidos para el Ca y el Mg se detallan en la Figura 7. No se encontraron diferencias significativas asociadas al

implemento de labranza, el ciclo de cultivo o su interacción para el Ca, mientras que en el caso del Mg se observó diferencias significativas asociadas al factor ciclo de cultivo (Tabla 2;  $p$ -value  $<0,05$ ). Se encontró valores máximos de pérdida de nutrientes por cosecha para estos dos elementos de hasta  $2,28 \pm 0,07$  kg de Ca y  $0,33 \pm 0,02$  kg de Mg por hectárea por ciclo.

Finalmente, las cantidades de Fe, Cu, Zn y Mn que se pierden por labores de cosecha se resumen en la Figura 8. No se encontraron diferencias significativas asociadas al implemento de labranza, el ciclo de cultivo o su interacción para los cuatro microelementos (Tabla 3;  $p$ -value  $>0,05$ ). Se encontró valores máximos de pérdida de hasta  $0,23 \pm 0,10$  kg de Fe,  $0,03 \pm 0,01$  kg de Cu,  $0,02 \pm 0,01$  kg de Zn y  $0,07 \pm 0,04$  kg de Mn por hectárea por ciclo de cultivo de la cebolla. Dichos valores resultaron significativamente más bajos comparación con los obtenidos para el N, K, y Ca (Figuras 5 y 7). Sin embargo, estas cantidades representan la fracción intercambiable de los elementos en el suelo (Bertsch *et al.* 2005), por lo que es esperar que la pérdida total sea aún mayor.

Tabla 2. Resumen del modelo lineal generalizado (GLM) obtenido para la pérdida de macronutrientes por cosecha de los bulbos de cebolla en un Andisol de Tierra Blanca, Cartago.

Fuente de variación	SC <sup>†</sup>	gl <sup>†</sup>	CM <sup>†</sup>	F <sup>†</sup>	<i>p</i> -value
<b>N (kg ha<sup>-1</sup>)</b>					
Ciclo (C)	1,59	1	1,59	0,54	0,4772
Implemento (I)	1,68	2	0,84	0,28	0,7577
C x I	0,75	2	0,37	0,13	0,8819
Error	35,43	12	2,95		
Total	39,44	17			
<b>P (kg ha<sup>-1</sup>)<sup>‡</sup></b>					
Ciclo (C)	0,02	1	0,02	9,56	<b>0,0093</b>
Implemento (I)	0,0043	2	0,00	0,9	0,4334
C x I	0,0022	2	0,00	0,45	0,6464
Error	0,03	12	0,00		
Total	0,06	17			
<b>K (kg ha<sup>-1</sup>)</b>					
Ciclo (C)	1,55	1	1,55	9,27	<b>0,0102</b>
Implemento (I)	0,14	2	0,07	0,42	0,6691
C x I	0,09	2	0,04	0,27	0,7692
Error	2,01	12	0,17		
Total	3,79	17			
<b>Ca (kg ha<sup>-1</sup>)</b>					
Ciclo (C)	2,06	1	2,06	2,15	0,1685
Implemento (I)	1,12	2	0,56	0,58	0,5731
C x I	0,48	2	0,24	0,25	0,7814
Error	11,51	12	0,96		
Total	15,17	17			
<b>Mg (kg ha<sup>-1</sup>)</b>					
Ciclo (C)	0,07	1	0,07	4,87	<b>0,0475</b>
Implemento (I)	0,02	2	0,01	0,55	0,5921
C x I	0,01	2	0,00	0,17	0,8448
Error	0,18	12	0,01		
Total	0,27	17			

<sup>†</sup> SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio; F: Factor F.

<sup>‡</sup> P como forma de fosfato (PO<sub>4</sub><sup>-</sup>).

Tabla 3. Resumen del modelo lineal generalizado (GLM) obtenido para la pérdida de microelementos por cosecha de los bulbos de cebolla en un Andisol de Tierra Blanca, Cartago.

Fuente de variación	SC†	gl†	CM†	F†	<i>p</i> -value
<b>Fe (kg ha<sup>-1</sup>)</b>					
Ciclo (C)	0,010	1	0,01000	0,31	0,585
Implemento (I)	0,010	2	0,01000	0,32	0,734
C x I	0,010	2	0,00250	0,12	0,885
Error	0,240	12	0,02000		
Total	0,270	17			
<b>Cu (kg ha<sup>-1</sup>)</b>					
Ciclo (C)	0,0005	1	0,00048	1,81	0,204
Implemento (I)	0,0002	2	0,00009	0,33	0,722
C x I	0,0002	2	0,00007	0,27	0,764
Error	0,0032	12	0,00027		
Total	0,0040	17			
<b>Zn (kg ha<sup>-1</sup>)</b>					
Ciclo (C)	0,00012	1	0,00012	2,40	0,147
Implemento (I)	0,00003	2	0,00002	0,35	0,712
C x I	0,00003	2	0,00002	0,35	0,711
Error	0,00058	12	0,00005		
Total	0,00076	17			
<b>Mn (kg ha<sup>-1</sup>)</b>					
Ciclo (C)	0,0007	1	0,00071	0,37	0,556
Implemento (I)	0,0014	2	0,00071	0,37	0,700
C x I	0,0009	2	0,00042	0,22	0,805
Error	0,0200	12	0,00190		
Total	0,0300	17			

† SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio; F: Factor F.

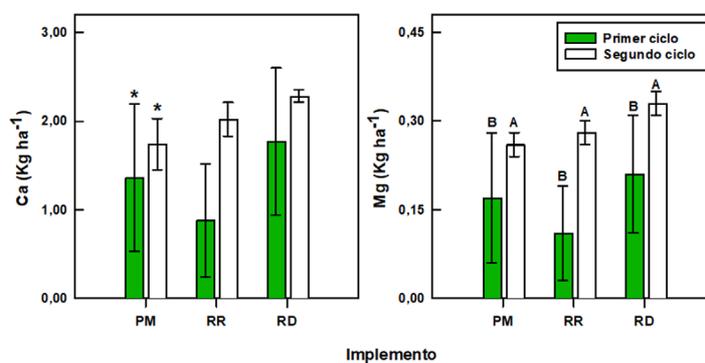


Figura 7. Pérdida de cationes (Ca y Mg) por la cosecha del cultivo de cebolla como respuesta al efecto de tres implementos de labranza en ciclos de producción no continuos, en un Andisol de Tierra Blanca, Cartago. Barras de error como error estándar. \* Sin diferencias significativas ( $p$ -value $>0,05$ ) entre las medias por los factores evaluados (Tabla 2). Letras distintas denotan diferencias significativas ( $p$ -value $<0,05$ ) entre las medias para el factor Ciclo (C) evaluado en el modelo (Tabla 2). Los valores de Ca y Mg corresponden a cantidades intercambiables.

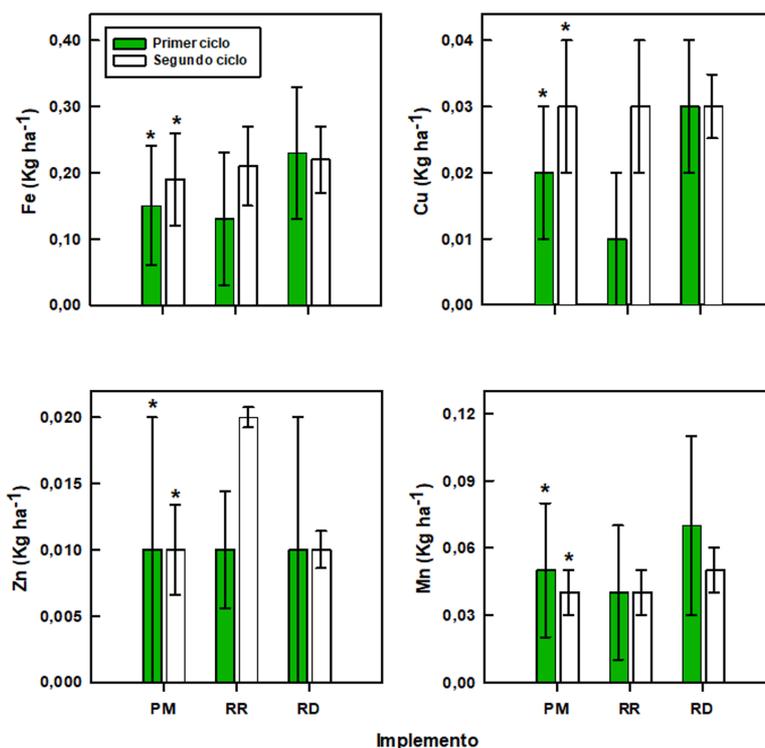


Figura 8. Pérdida de micronutrientes (Fe, Cu, Zn, y Mn) por la cosecha del cultivo de cebolla como respuesta al efecto de tres implementos de labranza en ciclos de producción no continuos, en un Andisol de Tierra Blanca, Cartago. Barras de error como error estándar. \*Sin diferencias significativas ( $p$ -value $>0,05$ ) entre las medias por los factores evaluados en el modelo (Tabla 2).

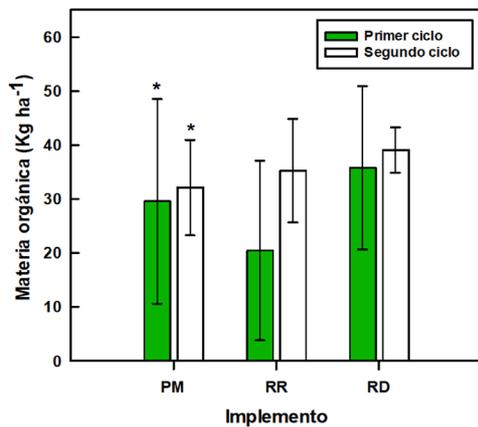


Figura 9. Pérdida de materia orgánica del suelo por la cosecha del cultivo de cebolla en respuesta al efecto de tres implementos de labranza durante ciclos de producción no continuos, en un Andisol de Tierra Blanca, Cartago. Barras de error como error estándar. \*Sin diferencias significativas ( $p$ -value  $>0,05$ ) entre las medias por los factores evaluados en el modelo (Tabla 2).

### Pérdida de materia orgánica por labores de cosecha del cultivo de cebolla

Comúnmente, la pérdida de suelo por procesos erosivos (naturales y antrópicos) se asocia con la pérdida de la capa más fértil que es capaz de sustentar la producción agrícola. Sin embargo, un componente normalmente olvidado en los estudios de erosión y pérdida de suelo es el contenido de materia orgánica (MO) que se pierde por estos fenómenos, promovido en gran medida por la conversión de ecosistemas a agroecosistemas (Lal 2019).

En el presente estudio, se cuantificó las pérdidas totales de la materia orgánica que salen del sembradío por la cosecha. Las cantidades de materia orgánica obtenidos se detallan en la Figura 9. No se encontró diferencias significativas asociadas a los dos factores evaluados y su interacción (Tabla 4;  $p$ -value  $> 0,05$ ).

Tabla 4. Resumen del modelo lineal generalizado (GLM) obtenido para la pérdida de materia orgánica por cosecha de bulbos de la cebolla en un Andisol de Tierra Blanca, Cartago.

Fuente de variación	SC <sup>†</sup>	gl <sup>†</sup>	CM <sup>†</sup>	F <sup>†</sup>	$p$ -value
Ciclo (C)	212,99	1	212,99	0,41	0,5363
Implemento (I)	288,97	2	144,49	0,27	0,7642
C x I	141,34	2	70,67	0,13	0,8755
Error	6305,33	12	525,44		
Total	6948,63	17			

† SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio; F: Factor F.

En un ciclo de cebolla se puede perder valores de MO entre  $20,43 \pm 16,61$  y  $39,06 \pm 4,21$  kg de materia orgánica por hectárea (Figura 9), donde dichos valores representan respectivamente 0,02 y 0,04% de la MO total cuantificada en los primeros 20 cm de profundidad de este suelo. Pese a que estas cantidades se pudiesen considerar como muy bajas, dicha pérdida repercute

no solamente en la pérdida de materia total del suelo, sino también en el componente fertilidad de suelo (Bertsch 1995), así como en propiedades físicas como el desarrollo y estabilidad de los agregados estructurales del suelo, su porosidad y subsecuentes fenómenos de retención y conducción de agua, así como la aireación del suelo (Hartge *et al.* 2016).

Muchos de los estudios sobre pérdida de suelo por cosecha del cultivo (SLCH) se enfocan en la pérdida de masa como sedimentos que salen adheridos al cultivo (Ruyschaert *et al.* 2007, Mwangi *et al.* 2015, Oshunsanya *et al.* 2018, Antoneli *et al.* 2021, Thomaz y Bereze 2021, Kuhwald *et al.* 2022), sin contemplar la posible salida no solamente de nutrientes sino de materia orgánica de los sitios de siembra y sus implicaciones en la calidad y salud del suelo, por lo cual no se tienen valores de comparación con los obtenidos en el presente estudio.

Sin embargo, las pérdidas de carbono orgánico del suelo (SOC) por procesos erosivos son considerables, alcanzando valores globales de hasta 5,7 Pg año<sup>-1</sup> (5,7 x 10<sup>15</sup> g año<sup>-1</sup>) los cuales contribuyen de forma significativa tanto a la degradación del suelo como a las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Lal 2019).

Un aspecto importante por considerar es el papel de la materia orgánica en la génesis de los Andisoles, donde la interacción entre la materia orgánica y minerales nano cristalinos como la alofana, imogolita y ferrihidrita produce complejos órgano-minerales resistentes a la degradación y descomposición, lo que resulta en la estabilización de dicha materia orgánica (Shoji *et al.* 1993, Buol *et al.* 2011). Por tanto, la pérdida de estos materiales orgánicos (sujeta a cambios en otros factores formadores como el clima) podría repercutir en los procesos pedogenéticos y la evolución del suelo hacia taxones más alterados como Inceptisoles, Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles (Shoji *et al.* 1993), reduciendo gradualmente la capacidad potencial de producción hortícola en las tierras altas de Cartago.

### **Implicaciones del SLCH en el manejo y conservación del recurso suelo en Costa Rica**

Los Andisoles son el tercer grupo taxonómico más abundante a nivel nacional, con una cobertura del 15,9% de la superficie del país (Mata *et al.* 2020). Debido a sus propiedades físicas particulares (texturas francas, baja densidad aparente) son suelos muy fáciles de mecanizar, lo cual incrementa la susceptibilidad a la pérdida

por erosión hídrica y eólica (Buol *et al.* 2011). Aparte del poder erosivo de la lluvia (Vahrson 1990), la erosión por labranza es un fenómeno de suma importancia en suelos derivados de cenizas volcánicas, con un potencial de remoción del suelo considerable (hasta 192 kg m<sup>-1</sup>) en sitios cuya pendiente se encuentre entre 5 - 35% (Mehuys *et al.* 2009).

En el presente trabajo se determinaron cantidades significativas de suelo removido del sembradío por cosecha de cebolla (entre 0,59 ± 0,47 y 1,08 ± 0,078 Ton ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup>), las cuales podrían representar un aporte importante a las actuales tasas de erosión reportadas para Andisoles de la zona alta de Cartago, las cuales varían entre 0,7 y 14 Ton ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup> (Castillo 2012) considerándose como erosión ligera a moderada según la clasificación propuesta por FAO (1979). No obstante, en esta región se han obtenido tasas elevadas de erosión pluvial, superiores a 50 Ton ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Lianes *et al.* 2009), y valoraciones de erosión moderadas a severas (Ramírez *et al.* 2008). Sin embargo, dichas tasas no incluyen ni el aporte de la erosión por labranza mecanizada (Mehuys *et al.* 2009, Tiessen *et al.* 2010) o el sedimento exportado por la cosecha del cultivo de la cebolla (Antoneli *et al.* 2021).

Los resultados de SLCH obtenidos en el presente estudio son pioneros no solamente en Costa Rica, sino también a un nivel regional más amplio (América Central y el Caribe), en los cuales se cuantifica no solamente la pérdida de sedimento adherido al bulbo de la cebolla, sino también la pérdida de materia orgánica y elementos esenciales que se pierden de forma irreversible del sembradío; una información novedosa y útil en comparación con los estudios tradicionales de SLCH (Oshunsanya *et al.* 2018, Antoneli *et al.* 2021, Thomaz y Bereze 2021, Kuhwald *et al.* 2022).

Estos valores tienen serias implicaciones en el potencial agrícola de los Andisoles, ya que la pérdida de sedimentos por procesos erosivos no solamente genera una pérdida de la masa de la capa arable, sino también la salida irreversible de enormes cantidades de nutrientes

tanto adicionados como fertilizante como los contenidos naturales en el suelo, visibilizando la problemática de los procesos de erosión en la degradación del suelo y sus implicaciones en la agricultura y el medio ambiente (Lal 2001). Esto anterior resulta de suma importancia para el manejo de los Andisoles, ya que estos suelos que cubre una gran cantidad del paisaje agrícola del territorio Centroamericano (Buol *et al.* 2011, Alvarado 2022).

En adición a las prácticas recomendadas para el manejo y conservación del suelo en la zona alta de Cartago (Ramírez *et al.* 2008, Lianes *et al.* 2009, Mehuys *et al.* 2009), se debe explorar soluciones para evitar la salida del sedimento de la finca por la cosecha del cultivo. Por ejemplo, evaluar la factibilidad del lavado del bulbo *in situ* previo al secado de la cebolla, impidiendo que los sedimentos salgan del sitio de siembra.

Esto anterior representa una gran ventada de oportunidad para el desarrollo de estudios sobre erosión por SLCH, en adición a estudios más complejos que involucren el aporte de la erosividad de la lluvia (Vahrson 1990) o la pérdida de suelo por labranza mecanizada (Mehuys *et al.* 2009, Marín-Araya 2022), los cuales no solamente visibilicen esta problemática sobre la degradación de los suelos en la zona alta de Cartago, sino también desarrollen soluciones prácticas para la mitigación de esta problemática, incluyendo a otros cultivos de importancia hortícola en la región como la papa (*Solanum tuberosum* L.) y la zanahoria (*Daucus carota* subsp. *Sativus* Hoffm.).

En adición, se debería considerar otras posibles estrategias de manejo y conservación de suelos, como la rotación de cultivos con especies de la familia *Poaceae*. Estos sistemas de rotación han demostrado tener efectos positivos en las propiedades físicas del suelo, mejorando la estructuración e incrementando el contenido de carbono y otros nutrimentos esenciales (Zani *et al.* 2020), así como la mitigación de la erosión de suelos en sistemas agrícolas (Boincean y Dent 2019).

## CONCLUSIONES

Bajo las condiciones agroclimáticas de las tierras altas de Cartago, se pueden perder cantidades de sedimentos (adheridos al bulbo) de entre 0,6 y 1,1 Ton ha<sup>-1</sup> en un ciclo de cultivo de cebolla, de forma indiferente del implemento de labranza que se utilice para preparar el terreno previo a la siembra del cultivo. Dichas cantidades podrían incrementar si se realiza más de dos ciclos de producción de cebolla por año.

En esos sedimentos que salen por cosecha del cultivo (SLCH), se pueden perder macronutrientes, microelementos, y materia orgánica (MO) los cuales salen del sitio de siembra de forma irreversible. En el caso del N y el K, pueden salir respectivamente cantidades de hasta 3 y 1,2 kg ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup>, y la salida de MO puede llegar a valores de 39 kg ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup>.

Un aspecto importante para la interpretación de estas cantidades perdidas es la naturaleza del análisis químico de laboratorio que se realizó al sedimento, ya que si se solamente se analiza cantidades intercambiables (con soluciones extractoras KCl-Olsen o Mehlich III), las pérdidas de nutrimentos por cosecha del cultivo pueden ser considerablemente más grandes (hasta 10 veces mayores).

Se recomienda continuar con este tipo de estudios sobre SLCH no solamente en el cultivo de cebolla, sino también en otros cultivos hortícolas como la papa y la zanahoria, explorando otras metodologías de análisis químico que permitan cuantificar las cantidades totales de elementos en los sedimentos colectados.

## AGRADECIMIENTOS

A Don Roberto Aragón Sánchez y al Ing. Agr. Roberto Aragón Soto por la colaboración para hacer posible la ejecución del proyecto y por ayudar con los diferentes implementos.

## LITERATURA CITADA

- Alewel, C; Ringeval, B, Ballabio, C; Robinson, DA; Panagos, P; Borrelli, P. 2020. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nature Communications* 11(1):4546.
- Alfaro, EJ. 2002. Some characteristics of the annual precipitation cycle in Central America and their relationships with its surrounding tropical oceans. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 9(2):88-103.
- Alvarado, A. 2022. Suelos de Centroamérica. San José, Costa Rica, Editoriales Universidades Públicas Costarricenses. 362 p.
- Alvarado, A; Bertsch, F; Bornemisza, E; Cabalceta, G; Forsythe, W; Henríquez, C; Mata RA; Molina, E; Salas, R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo y Centro de Investigaciones Agronómicas-Universidad de Costa Rica. 111 p.
- Alvarado, A; Mata, R. 2016. Soils of Costa Rica: an agroecological approach. Chapter 4. *In* Kappelle M (ed.). *Costa Rican Ecosystems*. Chicago, USA, University of Chicago Press. p. 64-93.
- Antoneli, V; de Paula, EC; Bednarz, JA; Rodrigo-Comino, J; Cerdà, A; Pulido, M. 2021. Soil and water losses along the cultivation cycle of onion in Irati, Brazil. *Catena* 204:105439.
- Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 164 p.
- Bertsch, F. 2006. El recurso tierra en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 30(1):133-156.
- Bertsch, F; Bejarano, JA; Corrales, M. 2005. Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen modificado y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(3):137-142.
- Boincean, B; Dent, D. 2019. Crop Rotation. *In* *Farming the Black Earth*. Springer, Cham, Switzerland. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22533-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22533-9_5)
- Büchi, L; Wendling, M; Amossé, C; Jeangros, B; Sina, S; Charles, R. 2017. Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland. *Soil and Tillage Research* 174:120-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.002>
- Buol, SW; Southard, RJ; Graham, RC; McDaniel, PA. 2011. Soil genesis and classification. 6 ed. Chichester, UK, John Wiley & Sons. p. 543.
- Castillo, M. 2012. Determinación y cuantificación de la tasa de erosión en un ciclo del cultivo de papa en la zona de Pacayas de Alvarado, Cartago. Tesis Lic. Sede Regional de Turrialba, Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. 111 p.
- Cerretelli, S; Castellanos, E; González-Mollinedo, S; Lopez, E; Ospina, A; Haggar, J. 2023. A scenario modelling approach to assess management impacts on soil erosion in coffee systems in Central America. *Catena* 228:107182.
- Corrales, M; Bertsch, F; Bejarano, JA. 2005. Los laboratorios de análisis de suelos y foliares en Costa Rica: Informe del comité de laboratorios de análisis de suelos, plantas y aguas. *Agronomía Costarricense* 29(3):125-135.
- Díaz-Romeu, R; Hunter, A. 1978. Metodología de muestreo de suelo, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 61 p.
- Fallas-Corrales, RA. 2013. Avaliação e calibração de extratores de fósforo em três diferentes ordens de solo da Costa Rica. Tesis M.Sc. Piracicaba, Brasil, Universidade de Sao Paulo. 100 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1979. A provisional methodology for soil degradation assessment. Rome, Italy. s. p.
- Govers, G; Lobb, D; Quine, T. 1999. Tillage erosion and translocation: emergence of a new paradigm in soil erosion research. *Soil and Tillage Research* 51:167-174.
- Grossman, RB; Reinsch, TG. 2002. 2.1 Bulk Density and Linear Extensibility. *In* Dane, JH; Topp, GC (eds.). *Methods of soil analysis, part 4 – physical methods*. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America. p. 201-228. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.e9>
- Han-Qing, YU; Li, Y; Zhou, N; Chappell, A; Li, X-Y; Poesen, J. 2016. Soil nutrient loss due to tuber crop harvesting and its environmental impact in the North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture* 15(7):1612-1624.
- Hartge, KH; Horn, R; Horton, R; Bachmann, J; Peth, S. 2016. *Essential soil physics. An introduction to soil processes, structure, and mechanics*. Stuttgart, Germany, Schweizerbart Science Publishers. s. p.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. San Diego, CA, Academic Press. 771 p.
- Horneck, DA; Miller, RO. 1998. Determination of total nitrogen in plant tissue. *In* Kalra, YP (ed.). *Handbook of reference methods for plant analysis*. Boca Raton, FL, Soil and Plant Analysis Council Inc. and CRC Press. p. 75-83.
- Isabirye, M; Ruyschaert, G; Poesen, J; Magunda, MK; Deckers, J. 2007. Soil losses due to cassava and sweet potato harvesting: a case study from low input traditional agriculture. *Soil and Tillage Research* 92(1-2):96-103.
- Kozak, M; Piepho, HP. 2018. What's normal anyway? Residual plots are more telling than significance tests when checking ANOVA assumptions. *Journal of Agronomy and Crop Science* 204(1):86-98. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12220>

- Kuhwald, M; Busche, F; Saggau, P; Duttmann, R. 2022. Is soil loss due to crop harvesting the most disregarded soil erosion process? A review of harvest erosion. *Soil and Tillage Research* 215:105213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105213>
- Lal, R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development* 12(6):519-539.
- Lal, R. 2012. Climate change and soil degradation mitigation by sustainable management of soils and other natural resources. *Agricultural Research* 1:199-212.
- Lal, R. 2019. Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Soil and Tillage Research* 188:35-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.001>
- Lianes, E; Marchamalo, M; Roldán, M. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(2):217-235. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v33i2.6722>
- Marín-Araya, S. 2022. Valoración de la erosión en el suelo mediante fotogrametría bajo el uso de tres implementos de labranza en cebolla, Tierra Blanca de Cartago. Tesis M.Sc. Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos. Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 118 p.
- Marín-Araya, S; Villatoro-Sánchez, M. 2023. Efecto de tres implementos de labranza sobre propiedades físicas de un suelo Andisol en Tierra Blanca, Cartago. *Agronomía Costarricense* 47(2):95-110. DOI: <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v47i2.56135>
- Mata, R; Rosales, A; Sandoval, D; Vindas E; Alemán, B. 2020 Mapa de suelos de Costa Rica (Ordenes) Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. Escala 1:200.000. San José, Costa Rica.
- Mehuys, GR; Tiessen, KH; Villatoro, M; Sancho, F; Lobb, DA. 2009. Erosión por labranza con arado de disco en suelos volcánicos de ladera en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(2):205-215.
- Molina, E; Bertsch, F; Cordero, A; Alvarado, A. 1986. Potasio en Andepts de Costa Rica. I. Formas en el suelo. *Turrialba* 36(3):281-288.
- Mwango, SB; Msanya, BM; Mtakwa, PW; Kimaro, DN; Deckers, J; Poesen, J; Lilanga, S; Sanga, R; Mujib, A. 2015. Soil Loss due to Crop Harvesting in Usambara Mountains, Tanzania: The Case of Carrot, Onion and Potato. *International Journal of Plant & Soil Science* 4(1):18-28. DOI: <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2015/12479>
- Nanzyo, M; Shoji, S; Dahlgren, R. 1993. Physical characteristics of volcanic ash soils. In Shoji, S; Nanzyo, M; Dahlgren, SR (eds.). *Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science* (21). Amsterdam, The Netherlands, Elsevier. p. 189-208.
- Oshunsanya, S; Yu, H; Li, Y. 2018. Soil loss due to root crop harvesting increases with tillage operations. *Soil & Tillage Research* 181:93-101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.003>
- R Studio Team. 2015. R Studio: Integrated Development for R. Boston: R Studio. Consultado 23 mar. 2024. Disponible en Inc. <http://www.rstudio.com>
- Ramírez, L; Alvarado, A; Pujol, R; Brenes, LG. 2008. Caracterización física de la cuenca media del Río Reventado, Cartago, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 32(2):73-92.
- Ruyschaert, G; Poesen, J; Verstraeten, G; Govers, G. 2004. Soil loss due to crop harvesting: Significance and determining factors. *Progress in Physical Geography* 28(4):467-4501. DOI: <https://doi.org/10.1191/0309133304pp421oa>
- Ruyschaert, G; Poesen, J; Verstraeten, G; Govers, G. 2006. Soil losses due to mechanized potato harvesting. *Soil and Tillage Research* 86(1):52-72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.016>
- Ruyschaert, G; Poesen, J; Verstraeten, G; Govers, G. 2007. Soil loss due to harvesting of various crop types in contrasting agro-ecological environments. *Agriculture, ecosystems & environment* 120(2-4):153-165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.08.012>
- Shoji, S; Dahlgren, R; Nanzyo, M. 1993. Genesis of volcanic ash soils. In Shoji, S; Nanzyo, M; Dahlgren, SR (eds.). *Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science* (21). Amsterdam, The Netherlands, Elsevier. p. 37-72.
- Solano, J; Villalobos, R. 2001. Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfico climático de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 8(1):26-39.
- Thomaz, EL; Berezé, J. 2021. Soil loss due to crop harvest in Southern Brazil: effect of potato morphology. *Plant and Soil* 468(1):67-76. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05114-5>
- Tiessen, KHD; Sancho, F; Lobb, DA; Mehuys, GR. 2010. Assessment of tillage translocation and erosion by the disk plow on steepland Andisols in Costa Rica. *Journal of Soil and Water Conservation* 65(5):316-328.
- Topp, G; Ferré, P. 2002. The soil solution phase. In Dane, JH; Topp, C (eds.). *Methods of soil analysis: Part 4 Physical Methods*, 5.4. SSSA, Madison, Wisconsin. p. 417-545.
- Vahrson, WG. 1990. El potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 14(1):15-24.
- Villatoro-Sánchez, M; Le Bissonnais, Y; Moussa, R; Rapidel, B. 2015. Temporal dynamics of runoff and soil loss on a plot scale under a coffee plantation on steep soil (Ultisol), Costa Rica. *Journal of Hydrology* 523:409-426. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.058>

- Zani, CF; Gowing, J; Abbott, GD; Taylor, JA; Lopez–Capel, E; Cooper, J. 2020. Grazed temporary grass–clover leys in crop rotations can have a positive impact on soil quality under both conventional and organic agricultural systems. *European Journal of Soil Science* 72(4):1513-1529. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13002>
- Zehetner, F; Miller, WP. 2006. Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *Catena* 65(3):201-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.10.003>





## ASSESSING TWO METHODS FOR AGROCHEMICAL APPLICATION (TRACTOR-BASED AND UAV) IN RICE FIELDS

Esteban Arroyo-Mejías<sup>1</sup>, Isaac Venegas-Méndez<sup>2</sup>, M. Melissa Rojas-Downing<sup>3\*</sup>,  
Alejandra María Rojas-González<sup>4</sup>

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; spray boom; efficiency; rice; plant growth regulator.

**Palabras clave:** vehículo aéreo no tripulado; spray boom; eficiencia; arroz; regulador de crecimiento.

Recibido: 30/04/24

Aceptado: 23/07/24

### ABSTRACT

**Introduction.** Rice is one of the world's most consumed grains in the world and is the most cultivated annual crop in Costa Rica. During rice's growth, some kernel characteristics can be enhanced by using plant growth regulators (PGR), usually sprayed over the crop with a tractor-based spray boom (SB). Recently, the use of Unmanned aerial vehicle (UAV) sprayers, in PGR applications, has become more common. However, the lack of efficiency compared with conventional methods (as SB) urges research development. **Objective.** To compare spraying efficiency of SB and UAV using a PGR over rice (*Oryza sativa*). **Materials and methods.** Three treatments of different volumes with SB (SB100=100 L ha<sup>-1</sup>, SB150=150 L ha<sup>-1</sup> and SB200=200 L ha<sup>-1</sup>), three treatments with UAV (D10=10 L ha<sup>-1</sup>, D20=20 L ha<sup>-1</sup> and D30=30 L ha<sup>-1</sup>) and one control (no spray application) were conducted in a rice field located in Pavones,

Guanacaste, Costa Rica. Five repetitions were carried out in a completely randomized design for all treatments with different PGR rates and considering spraying quality (coverage, uniformity and droplet density), rice yield, and rice milling quality as efficiency parameters. **Results and discussion.** SB and UAV treatments did not present statistical differences in rice milling quality and yield. Considering the spray quality for SB, SB100 complied with the required droplet density (more than 20 drops cm<sup>-2</sup>), while being the treatment with the lowest water use. As for spray quality in UAV treatments, neither had the minimum droplet density required (7.44 - 17.4 drops cm<sup>-2</sup>), in addition to a poor uniformity performance with high values of coefficient of variation (48.49 - 57.77%). **Conclusion.** After evaluating the efficiencies of SB and UAV treatments, SB100 is the most efficient method based only on the spray quality parameter, since rice milling quality and yield did not present statistical differences.

\* Corresponding author.  
Email: maria.rojasdowning@ucr.ac.cr

1 Independent researcher, Puntarenas, Costa Rica.  
 0009-0006-9311-549X.

2 Independent researcher, Guanacaste, Costa Rica.  
 0009-0000-4718-3914.

3 Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería de Biosistemas, San José, Costa Rica.

 0000-0002-3443-3985.

4 Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería de Biosistemas, San José, Costa Rica.

 0000-0001-7984-7789.

## RESUMEN

**Evaluación de dos métodos para aplicaciones agroquímicas (spray boom y dron) en el cultivo del arroz. Introducción.** El arroz es de los granos más consumidos en el mundo y el cultivo anual más producido en Costa Rica. Durante el crecimiento del arroz, algunas características del grano pueden mejorarse mediante reguladores de crecimiento (PGR), usualmente aplicados con spray boom montado en tractor (SB). Recientemente, ha aumentado el uso de drones para aplicaciones de PGR. Sin embargo, escasez de comparaciones de eficiencia con métodos convencionales (como SB) hace necesario el desarrollo de investigaciones. **Objetivo.** Comparar la eficiencia de aplicación entre un SB y un dron usando un PGR sobre arroz (*Oryza sativa*). **Materiales y métodos.** Tres tratamientos de diferentes volúmenes con SB (SB100=100 L ha<sup>-1</sup>, SB150=150 L ha<sup>-1</sup> and SB200=200 L ha<sup>-1</sup>), con dron (D10=10 L ha<sup>-1</sup>, D20=20 L ha<sup>-1</sup> and D30=30 L ha<sup>-1</sup>) y un control se aplicaron

en un campo arrocero en Pavones, Guanacaste, Costa Rica. Se realizaron cinco repeticiones en un diseño completamente aleatorio para todos los tratamientos con diferentes tasas de PGR y tomando como parámetros de eficiencia la calidad de aplicación (cobertura, uniformidad y densidad de gotas), el rendimiento del arroz, y la calidad molinera. **Resultados y discusión.** Los tratamientos con SB y dron no presentaron diferencias estadísticas en calidad molinera y rendimiento del arroz. En cuanto a la calidad de aplicación de SB, SB100 cumplió con los requerimientos de densidad de gotas (mayor a 20 gotas cm<sup>-2</sup>) siendo el tratamiento con menor uso de agua. Considerando la calidad de aplicación de dron, ningún tratamiento cumplió con densidad de gotas requerida (7,44-17,4 gotas cm<sup>-2</sup>) sumado a una baja uniformidad (48,49-57,77%). **Conclusión.** Después de evaluar eficiencias de los tratamientos con dron y SB, SB100 resultó en el método más eficiente basado únicamente en el parámetro de calidad de aplicación, ya que no se presentaron diferencias estadísticas en calidad molinera y rendimiento del arroz.

## 1. INTRODUCTION

Rice, the second most cultivated crop globally after wheat (*Triticum aestivum*), has an annual production of 517.60 million tons (FAO 2023) and represents 53.20% of annual crop production in Costa Rica (INEC 2023). Plant growth regulators (PGR) can be broadly important by improving and helping the growth of the plant (Alcántara *et al.* 2019). Within PGRs highlights abscisic acid (ABA) which is a phytohormone that aids in plant and fruit development by ripening acceleration (Ramírez *et al.* 2019), promotion of grain yield and quality in rice (Chen *et al.* 2019) and response to water stress inducing stomatal closure (Matsuda *et al.* 2016).

Previous studies demonstrate that ABA increases rice yields and improves milling quality. Flores (2019) and Solera (2019) obtained higher rice yields in 28.8% and 8.96%, respectively,

with higher percentages of whole kernel yield and fewer percentages of broken kernel yield in treatments with ABA compared to treatments without it. While Chen *et al.* (2019) also indicated an increase in grain yield and milled rice ratio while using ABA plus sucrose in rice, compared to treatments without ABA applied. In addition, Qin *et al.* (2021) indicated that genes involved in starch synthesis and grain filling in rice were activated by ABA. Therefore, the starch content in rice is higher when ABA is applied (Chen *et al.* 2019).

The application of PGR is usually sprayed. The spraying conventional methods used in Costa Rica are: 1) backpack sprayer for small areas, 2) planes or helicopters for areas with obstacles or heterogeneous and 3) tractor-based spray boom (SB) for large areas (Jiménez Salas 2015). However, soil compaction, destruction of rice fields where the tractor's tires go through

(Gómez and Rodríguez 2019), high consumption of water and fossil fuels and deposition drifts (Wang *et al.* 2018), are involved during tractor-based SB operations.

While comparisons of conventional methods with new spraying methods focused on parameters such as productive yield and rice quality are rare, research on SB is usually centered on structural changes such as nozzle variations (Matilde *et al.* 2018) or air generators addition (Lamare *et al.* 2022) and their effects on spray cover or uniformity (Foqué *et al.* 2013). Lamare *et al.* (2022) used a SB with an air-assisted mechanism to produce a forced airflow that blows the droplets at different speeds over the crop. Different bar heights and nozzle spacing and their effect on drift and deposition were evaluated. They concluded that a 0.60 m bar height configuration and nozzle spacing derived the highest deposition and drift reduction. Also, the air assistance, which primarily function was to avoid drift, did not significantly affect those parameters.

Typical volumes for agrochemical spraying in arable crops are between 25 and 200 L ha<sup>-1</sup> (Foqué *et al.* 2013). However, this author used higher volumes in a SB with air assistance to evaluate their off-target deposition. Results showed that the air assistance did not present significant differences in the results, and the higher the volume, the higher the off-target deposition, with the lowest volume being the treatment with less drift among the ones compared (Foqué *et al.* 2013).

In the study of Wang *et al.* (2019), the spray uniformity of a SB, UAV, and two backpack sprayers was analyzed using the coefficient of variation (CV) which lower values indicate better uniformity (Zhang *et al.* 2020). Considering a spraying capacity of 300 L ha<sup>-1</sup>, 10 L ha<sup>-1</sup>, and 75 L ha<sup>-1</sup> for the SB, UAV, and backpack sprayers, respectively, it resulted in a better uniformity for the SB with a CV of 32.1% against the CV of 87.2% for the UAV, and 84.4% and 81.2% for the two backpack sprayers. Conversely, Matilde *et al.* (2018) analyzed the spray

coverage of a SB with volumes of 130 L ha<sup>-1</sup> and 90 L ha<sup>-1</sup>, resulting in higher coverage for the highest volume with a covered area of 20% against 15%, respectively.

Technological advances might enhance the efficiency of agrochemical spraying, as alternatives have been presented recently with the use of UAVs in this sector. However, in the same way as SB, research is focused on aspects such as the height of application, drifts (Woldt *et al.* 2018), or the influence of meteorological conditions (Wang *et al.* 2018) in UAV operations. While comparisons with other methods are lacking, there is a need to create standards for this equipment.

According to Li *et al.* (2019), flight height above 3.00 m and below 1.50 m contributes to spray drift and, nowadays, the UAV spray capacity is in a range of 11 L ha<sup>-1</sup> to 30 L ha<sup>-1</sup>. That agrees with research by Woldt *et al.* (2018), who concluded that the best uniformity was obtained at 2.00 m flight height with a CV of 7.00% for the MG-1 model and 3.00 m height with a CV of 15.50% for the V6A model.

The flight height at which the UAV spraying would not be affected by climate conditions as wind speed (and the spray drift would not be increased) was studied by Wang *et al.* (2018). This resulted in the recommendation of a 2.50 m flight height at wind speeds of around 3 m s<sup>-1</sup> to reach that purpose. Although, some researchers, such as Zhang *et al.* (2020), concluded superior heights up to 4 m for the highest coverage with 12-15 L ha<sup>-1</sup> volumes.

Research in UAVs and their comparison with conventional tractor-based spraying methods promotes sustainable agricultural development by reducing water and fossil fuel consumption, reducing workable time in agriculture (Wang *et al.* 2019), and subsequent cost reduction. All while encouraging technological innovation (Ahmad *et al.* 2021).

While studies have been conducted on SB and UAV sprayers, research on these methods focuses mainly on the effect on spray distribution due to changes in the equipment characteristics.

The results from these studies are useful for future research but need to cover other important parameters involved in crop spraying, as intended with the present methodology, which includes the effect of the spraying method on milling quality and rice yield, in addition to spray quality.

These parameters represent the main aspects to consider while performing a rice agricultural activity for commercial purposes. In this sense, rice milling quality and rice yield focus on the grain weight and the kernel quality obtained, and therefore, the profitability of the activity, while spraying quality is centered on the optimization of agrochemical use. Therefore, this research aimed to compare spraying efficiency of SB and a UAV using a PGR over rice (*Oryza sativa*).

The rice importance and need of research on comparison between spraying methods underscores the significance of our study's focused on improving rice cultivation efficiency. The potential benefits of our findings, which could lead to the development of more efficient and sustainable rice cultivation practices, are significant for the rice industry, benefiting both farmers and consumers.

## 2. MATERIALS AND METHODS

The study was conducted between September and December of 2022 using 1.50 ha of a rice field located in Pavones, Costa Rica (10°0'13,84" N 85°12'24,73" O). Before the rice planting, 2 L ha<sup>-1</sup> of herbicides were applied over the field, the soil surface was plowed twice, and the soil was fertilized with 135 kg ha<sup>-1</sup> of fertilizer formula NPK:10-30-10. The rice variety cultivated was a SENUMISA 20 FL sowed with a rice planter in a sandy loam soil with a row spacing of 17 cm.

After rice planting and just before germination, 2-3 L ha<sup>-1</sup> of herbicide was used as weed prevention. The soil was fertilized again with 135 kg ha<sup>-1</sup> of fertilizer formula NPK:26-0-26 after 15, 25 and 45 days of germination. Additionally, 45-55 days after germination, two applications of pyrethroid insecticide and

copper oxychloride-based fungicide were applied directly to rice ears.

The SB and UAV spray methods were assessed to determine their effect on spray quality, rice yield, and rice milling quality while using a commercial PGR. This PGR is a systemic agrochemical, with a composition of 200 g kg<sup>-1</sup> of ABA and a 60 g ha<sup>-1</sup> dose in the liquid mixed. The rice milling quality and rice yield were evaluated since grain weight and the kernel quality are of important consideration in the characterization of the product and the economic benefits of the activity, while spraying quality is centered on the optimization of agrochemical and water use.

There were three treatments per spray method, with five repetitions each, for a total of 35 experimental units in a completely randomized design. Every experimental unit was set to 8 m x 5 m, but the total sprayed area was 9 m x 8 m to avoid any result conditioned by the border effect. Additionally, there was a spacing of approximately 12 m between blocks to prevent drift spraying from affecting neighboring experimental units. Moreover, one control was carried out consisting of five experimental units with the same characteristics of the entire rice field without any spray application.

A Jacto SB (Brazil, Pompéia) (Figure 1) with 12 m width and 600 L capacity mounted in a John Deere 4500 (United States, Illinois) tractor was employed. The treatments comprised three spray volumes, defined as SB100, SB150, and SB200, for 100, 150, and 200 L ha<sup>-1</sup>, respectively. Each treatment had a PGR dose of 60 g ha<sup>-1</sup>, which means 600 mg L<sup>-1</sup> for SB100, 400 mg L<sup>-1</sup> for SB150 and 300 mg L<sup>-1</sup> for SB200. Tractor speed during spray studies is recommended to be at 1.50 and 2.50 m s<sup>-1</sup> (Dou *et al.* 2021), which matches with the 1.70 m s<sup>-1</sup> set for this research and commonly used by operators in this region (Table 1). A calibration was performed beforehand to reach the volumes selected, and the pressures were set at 70 psi for SB100, 125 psi for S150, and 450 psi for SB200. Moreover, the bar height used was 0.60 m over the crop canopy.

Table 1. Spray methods and their characteristics.

Spray method	Spray Boom (SB)			Unmanned aerial vehicle (UAV)		
	SB100	SB150	SB200	D10	D20	D30
Treatment	SB100	SB150	SB200	D10	D20	D30
Volume (L ha <sup>-1</sup> )	100	150	200	10	20	30
PGR rate (mg L <sup>-1</sup> )	600	400	300	6.000	3.000	2.000
Spraying speed (m s <sup>-1</sup> )	1.70	1.70	1.70	6.06	5.33	4.61
Spraying height (m)	0.60	0.60	0.60	2.00	2.00	2.00



Figure 1. Tractor and Spray Boom (SB) used during spraying.

For the UAV method, a 10 L capacity DJI Agras MG-1P UAV (China, Shenzhen) (Figure 2) was used. The treatments comprise three spray volumes, defined as D10, D20, and D30, for 10, 20, and 30 L ha<sup>-1</sup>, respectively. Each treatment had a PGR dose of 60 g ha<sup>-1</sup>, which means 6,000 mg L<sup>-1</sup> for D10, 3,000 mg L<sup>-1</sup> for D20 and 2,000 mg L<sup>-1</sup> for D30. The UAV flight height was set at 2.00 m and the speed was 6.06 m s<sup>-1</sup> for D10, 5.33 m s<sup>-1</sup> for D20, and 4.61 m s<sup>-1</sup> for D30 (Table 1).

The spraying was conducted during milky stage. To identify it, approximately 100 panicles were tested resulting in around 24 being in milky stage. The crop harvest was manual, using a structure with wooden support and horizontal bars (Figure 3), especially made for that purpose. The rice grains were separated from the plant by hitting it on the wooden structure three times on each side of the panicle and then recollected in plastic canvas located right below. Ultimately, grains were placed in classified bags according to treatments.



Figure 2. Unmanned aerial vehicle (UAV) used during spraying.



Figure 3. Wooden structure used to separate grains from the panicles.

## 2.1 Parameters evaluation

All evaluated parameters and measurement procedures were the same for SB and UAV spraying, which are explained below.

### 2.1.1 Spray quality

Spray quality was measured by considering the percentage and drop count of the covered area and uniformity. The coverage percentage and drop counting were estimated using two water-sensitive papers (WSP) attached to a wooden stick and placed at canopy height on the experimental units treated. Four out of five experimental units for each treatment were used since the amount of WSP available was 50 papers, enough to analyze the coverage percentage and drop count, statistically. After each application, the WPS were photographed, and the software ArcMap 10.8 was used to analyze the image and obtain the percentage of area covered. A subsequent drop count was conducted to determine droplet density in drops  $\text{cm}^{-2}$  units.

According to FAO, (Portuguez 2019) and Syngenta Crop Protection AG (Zhu *et al.* 2011), droplet density must be at least 20 drops  $\text{cm}^{-2}$  in the case of any systemic agrochemical (as the PGR used in this study). Finally, the uniformity was measured using the coefficient of variation

(CV) which lower CV values indicate better uniformity (Zhang *et al.* 2020).

### 2.1.2 Rice yield

The rice yield of all treatments and the control were measured based on husked rice with impurities. After harvest, the rice obtained was packed in pouches labeled according to the experimental unit. A digital scale T-Scale MBW-300 model with  $\pm 20$  g precision was used. Also, the average yield was compared to the average yield in the Chorotega region and Costa Rica over the last 11 years, being 4,001.25  $\text{kg ha}^{-1}$  and 4,210.75  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectively (CONARROZ 2019, CONARROZ 2023, INEC 2017).

### 2.1.3 Rice Milling Quality

After rice harvest, a sub-sample of 4 kg of each experimental unit (Figure 4) was separated in paper bags and dried for rice milling quality tests following the technical regulation (Decreto N°. 34487, 2008). Chalkiness (CH), damaged kernels (DK), stack yield (SY), semolina yield (SeY), small broken yield (sbY), large broken yield (LBY), whole kernel yield (WKY), broken kernel yield (BKY), and commercial rice yield (RY) represented milling quality.



Figure 4. Samples for milling quality tests.

## 2.2 Statistical analysis

After confirming data normality using the Shapiro-Wilks test, an analysis of variance ANOVA was performed. To compare means, Tukey's test was carried out. If no normality is found by the Shapiro-Wilks test, based on the number of treatments compared, the Kruskal Wallis or Wilcoxon test was performed to identify variances, and the Dunn test was applied to compare means. All statistical analyzes were applied separately for SB and UAV results since, at first, it was desire to define the optimal treatments for each method and after that the statistical analysis was performed on the chosen treatments. The Infostat program 2020 (Di Rienzo *et al.* 2018) was used for the statistical analysis of the results.

## 2.3 Optimal treatment selection

First, the optimal treatment by spraying method (SB and UAV) was determined by comparing the results of the parameters selected for evaluation (spray quality, rice yield, and rice milling quality). In both methods, if the treatments present high and statistically different rice yield and rice milling quality, high coverage, high uniformity and/or reach the recommended droplet density were considered as optimal.

Water consumption is also considered since is an important part of spraying labor and helped in the decision making. Water consumption resulted from spray volume is a characteristic that not only affects the hydric resource but also affects the activity costs, fuel and energy consumption and working time. In this case, if the parameters results are inconclusive or not enough for optimal treatment selection, the treatments with lower water use were represented with an added positive advantage.

After determining the optimal treatments by method, they were compared according to the parameters (spray quality, rice yield, and rice milling quality) by a statistical analysis, which had been presented previously. Everything was

conducted to identify the optimal treatment for SB or UAV applications and select the optimal spray method for this labor, showing at the same time the possible advantages and disadvantages of both.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Optimal spray treatment with SB

#### 3.1.1 SB spray quality

The quality was determined based on the covered area and CV. The covered area was analyzed based on the percentage covered and drops fallen in WSP. The percentage of covered area was also necessary for calculating the CV. The variance analysis was performed, resulting in a *p*-value of 0.0009, indicating the existence of significant differences between treatments.

The subsequent Tukey test showed that SB100 and SB200 coverage were significantly different. Results in Table 2 demonstrate that as spray volume increases, so does the covered area. This was expected and agreed with the results of authors such as Matilde *et al.* (2018), who indicated greater coverage with greater spray volumes in all crop levels.

The CV results are also presented in Table 2, with SB200 being the lowest with 30.92%. However, according to Wang *et al.* (2019), Holterman *et al.* (2018), and Kluza *et al.* (2019), the desired CV for agrochemical spraying is 10.00% or lower, and none of the three treatments reached this level. With the greatest percentage of covered area and lowest CV (thus resulting in the optimal spray quality) SB200 was a more efficient treatment. However, the drop count performed in all WPS shows that all treatments are helpful for systemic agrochemical spraying, since the minimum droplet density required is 20 drops cm<sup>-2</sup> (Portuguez 2019).

Table 2. Average coverage and coefficient of variation (CV) of the three Spray Boom (SB) treatments.

Treatment	Average coverage (%)	Standard Deviation (%)	Droplet density (drops cm <sup>-2</sup> )	Standard Deviation (drops cm <sup>-2</sup> )	CV (%)	Tukey*
SB100	21.20	8.79	171.63	85.62	41.46	A
SB150	37.52	14.71	406.81	131.87	39.20	A B
SB200	51.19	15.82	460.20	102.96	30.92	B

\*Different letters denote significant differences between treatments.

The low uniformity could be caused by the irregular surface where the tractor advances, resulting in drastic movements and changes in the SB bar and nozzles. Despite that, studies as Wang *et al.* (2019) obtained a similar CV value of 32.1% with a 300 L ha<sup>-1</sup> volume. In this case, a treatment as SB200 resulted in a lower CV probably due to high nozzle pressure (31 bar) compared to the low nozzle pressure (4 bar) used by Wang *et al.* (2019). Also, the coverage obtained in this research is similar to the results of another study (Borger *et al.* 2013), whose coverage results were 32% using 150 L ha<sup>-1</sup> volume, 24% with 110 L ha<sup>-1</sup> volume and 20% with 90 L ha<sup>-1</sup>.

Even though SB200 presented the required droplet density and the optimal results in coverage and CV, SB100 also performed the droplet density required for systemic agrochemicals. SB100 has the advantage of reducing water by 100% compared to SB200 and a more concentrated mixture of the water and PGR sprayed. In that sense, it is important to select both treatments and compare them with the optimal UAV treatments to look for differences in all the parameters studied.

### 3.1.2 SB rice yield

The ANOVA test showed no significant differences in this parameter between treatments and control ( $p = 0.3634$ ;  $\alpha = 0.05$ ). In this case, despite SB200 having the greatest value, the

average yield does not increase while increasing the spray volume (Figure 5). Moreover, even though the averages in rice yield seem to have differences (with 783 kg ha<sup>-1</sup> between maximum and minimum values), this is explained by the noticeable differences in standard deviations. For example, while SB200 has the greatest average in rice yield with 3504 kg ha<sup>-1</sup>, it also has a 929.60 kg ha<sup>-1</sup> standard deviation. This means that some values are extremely high, increasing the dispersion of data but not enough to make a difference compared to the average of the other treatments and control.

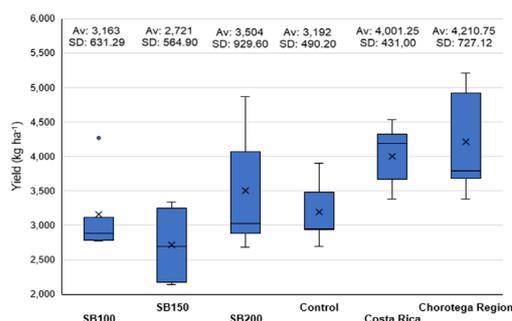


Figure 5. National and regional yields compared to the yield obtained with Spray Boom (SB) treatments (CONARROZ 2019, CONARROZ 2022, CONARROZ 2023, INEC 2017).

Furthermore, comparing the average yield of SB200 (which is the highest among the SB treatments) with the average yield in Costa Rica and the Chorotega region over the last 11 years (CONARROZ 2019, CONARROZ 2023, INEC 2017), resulted in 12.43% and 16.78% less performance, respectively. These results disagree with what was found by Flores (2019), who applied 150 and 300 mg L<sup>-1</sup> of ABA in rice and obtained a 17.74 and 29.49% higher yield, respectively, compared to the control without ABA. This situation may be due to the use of irrigation in the rice field, the use of a backpack sprayer which the operator could focused on the entire plant since the areas were small, and the application of adjuvants, bio-stimulants and another PGR, which differs from this research.

The previous statement is in accordance with the results obtained by Chen *et al.* (2019), who demonstrated the use of ABA with sucrose addition resulted in an increment of 15.7% of grain yield compared to the control without ABA and sucrose, while treatments with the use of ABA alone did not present a statistically significant difference compared to the control. This may suggest that in order to increase yield in rice with ABA, it is necessary to be accompanied with a complement.

Additionally, the low results compared to the national and regional yields suggested that an external factor may have caused a possible adverse affectation in this parameter. Based on

the milling quality results, the damaged kernel parameter had a low value (3.56%), indicating low damaged product due to pests or diseases, which leads to the assumption that a possible negative effect on rice yield results could be caused by environmental factors, like deficient soil conditions.

Rice yield is an important factor in rice production's profitability, and it was demonstrated that the three spray volumes evaluated with SB and the characteristics presented did not enhance this parameter. Considering the rice yield, the lack of significant differences between treatments and control and the low yield obtained compared to national and regional yields, the selection of the optimal treatment for SB was not accomplished.

### 3.1.3 SB rice milling quality

The variance analysis showed no significant difference in the milling tests between treatments and control ( $p = 0.6584-0.8908$ ;  $\alpha = 0.05$ ). Considering that all results had a similar performance, the commercial rice yield (RY) was be used (Table 3). The RY is the amount of whole kernel and large broken rice, which is obtained from a test sample of rice in chaff, without impurities (<1.5%) and dry (<13% moisture). The results showed no trend for RY related to the volumes. Therefore, the yield does not increase while increasing the spray volume (Table 3).

Table 3. Commercial rice yield (RY) average values obtained in the milling test of rice sprayed with three Spray Boom (SB) treatments and the control (C).

Treatment	Average (%)	Standard Deviation (%)	Min (%)	Max (%)
SB100	65.28	2.31	62.00	67.80
SB150	64.12	3.05	58.90	66.50
SB200	65.04	2.28	63.40	69.00
C	65.88	3.14	61.30	69.20

Besides not having a significant difference in RY between treatments, the average values were similar, with a maximum difference of just 1.80%. Moreover, the lack of differences is evident when the standard deviations are similar and low, with an average of just 2.70%.

The average percentages of the three treatments of each milling quality parameter were compared to the results of a previous study in Costa Rica who used the same technical

regulation for rice milling quality test (Rojas 2012). As shown in Table 4, the results for damaged kernels (DK), stack yield (SY), semolina yield (SeY), whole kernel yield (WKY), and broken kernel yield (BKY) were similar to those found by Rojas (2012), with a range of difference between -2.41% and 2.62%, while chalkiness (CH) was the parameter with the most difference being 7.97% higher in this research, followed by small broken yield (sbY) with 5.32% less than Rojas (2012).

Table 4. Milling quality comparison between Spray Boom (SB) treatments and other studies.

Milling test	SB treatments results (%)	(Rojas 2012) results (%)	(Reyes <i>et al.</i> 2020) results (%)	(Flores 2019) results (%)	(Solera 2019) results (%)	(Chen <i>et al.</i> 2019) results (%)
CH	12.47	4.50	-	-	-	11.40
DK	3.56	2.48	-	-	-	-
SY	68.17	65.55	68.70	71.72	-	≈67.00
SeY	11.06	13.47	9.34	-	-	-
sbY	3.35	8.67	-	-	-	-
LBY	18.07	-	-	-	-	-
WKY	46.65	44.90	61.45	63.91	61.50	≈60.00
BKY	21.43	22.84	7.27	7.81	7.29	-

CH = Chalkiness, DK = damaged kernels, SY = stack yield, SeY = semolina yield, sbY= small broken yield, LBY = large broken kernel yield, WKY = whole kernel yield and BKY = broken kernel yield.

Similar results in SY have been shown by other studies with differences of 0.53% (Reyes *et al.* 2020), 3.55% (Flores 2019), and around 1.17% (Chen *et al.* 2019) compared to this study. However, BKY, in studies where ABA is involved, is around 7.00-8.00% which is about 14.00-13.00% lower than the BKY obtained with the SB treatments of this study and the study by Rojas (2012).

This situation may be caused by different practices during rice production. Flores (2019) obtained improvement in rice milling quality while using ABA in comparison with the control,

but they applied bio-stimulants and other PGR to the rice, which was not the case for this research. Chen *et al.* (2019) used around 30 g L<sup>-1</sup> of ABA and analyzed the effect of ABA plus sucrose and showed an increase in SY and WKY with statistical differences compared to the treatments using only sucrose or ABA and compared to the control.

The rice milling quality is quite importance in the presentation and characterization of the rice distribution. However, the three spray volumes and the characteristics presented in the methodology did not enhance kernel

quality. The lack of significant differences between treatments and control and the similarities with other studies do not allow the selection of the optimal treatment for SB based on rice milling quality.

### 3.2 Optimal spray treatment with UAV

#### 3.2.1 UAV spray quality

A Kruskal Wallis test was performed, providing a  $p$ -value of 0.0152, indicating significant

differences between treatments. After that, the Dunn test indicated no significant differences between D20 and D30 ( $p = 0.1884$ ) and significant differences between D10 and D30 ( $p = 0.0259$ ) and D10 and D20 ( $p = 0.0023$ ).

When comparing those pairs (Table 5), D20 shows a greater covered area with 6.11% and, in the same way, it has the lowest CV (48.49%), indicating the best uniformity among the three treatments. Even though it was the lowest CV (as explained before) this CV value is higher than the 10.00% or lower required.

Table 5. Average coverage and coefficient of variation (CV) of the three unmanned aerial vehicle (UAV) treatments.

Treatment	Average coverage (%)	Standard Deviation (%)	Droplet density (drops cm <sup>-2</sup> )	Standard Deviation (drops cm <sup>-2</sup> )	CV (%)
D10	2.35	1.33	7.44	4.25	56.64
D20	6.11	2.96	15.38	7.42	48.49
D30	4.41	2.55	17.4	15.53	57.77

The CV values obtained in all treatments were better than the ones obtained by Wang *et al.* (2019), who used a 10 L ha<sup>-1</sup> volume and obtained a 2.20% of covered area and 87.20% of CV. The possible cause of the differences is the flight height set at 1.0 m by Wang *et al.* (2019), which differs from this research and according to Li *et al.* (2019) a flight height below 1.5 m may contribute to spray drift in UAV. Despite that, the CV was too high in both cases, demonstrating that UAVs present low spraying uniformity.

Finally, the drop count performed in the WPS confirmed the lack of spray quality with this UAV, resulting in a droplet density below 20 drops cm<sup>-2</sup>, as recommended for systemic agrochemicals in all UAV treatments. Also, according to Jeevan *et al.* (2023), higher spray volumes result in better coverage and droplet density while spraying, which was not the case for these

results. Cedeño *et al.* (2020) state that air flux produced by UAV propellers can affect and distribute the agrochemicals to different depths lower than canopy levels. In this case, different spray volumes produce different drop sizes, and this air flux could affect the drop distribution.

Although all treatments had poor performance, D20 is considered the most efficient due to its higher uniformity compared to D10 and D30. Because it had the highest coverage percentage with significant differences with D10 and, as with all UAV treatments, it has low water consumption. D20 will be considered in the final comparison with SB treatments.

#### 3.2.2 UAV rice yield

The average results in Figure 6 tend to increase yield while decreasing spray volumes, with D10 being the treatment with the highest

yield. However, the variance analysis showed no significant differences between the treatments and the control ( $p = 0.2415$ ;  $\alpha = 0.05$ ).

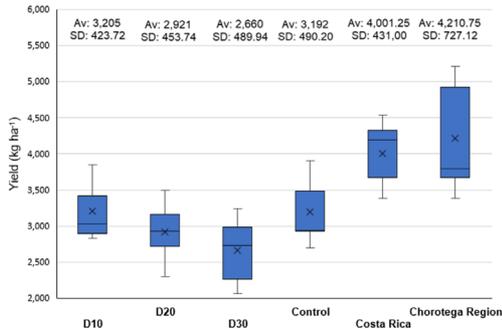


Figure 6. National and regional yields compared to the yield obtained with unmanned aerial vehicle (UAV) treatments (CONARROZ 2019, CONARROZ 2022, CONARROZ 2023, INEC 2017).

The maximum difference in average yield between D10 and D30 is 545 kg ha<sup>-1</sup>, but the average standard deviation is 464.40 kg ha<sup>-1</sup>. Some results with high yield values made the D10 average higher, increasing the dispersion, but not enough to make the average significantly different than other treatments.

When the average rice yield of D10 (which is the highest among the UAV treatments) was compared to the average rice yield in the Costa Rican and Chorotega regions (CONARROZ 2019, CONARROZ 2023, INEC 2017) over the past 11 years (Figure 6), it is shown that the rice produced were lower by 19.90% and 23.89%, respectively. These results differed from Flores (2019), who applied ABA in rice and obtained a 17.74 and 29.49% higher yield, respectively, compared to the control without ABA. The difference in results may be influenced by the conditions of each experiment, since Flores (2019) implemented a different spray method (backpack sprayer), an irrigation system and adjuvants, bio-stimulants and other PGR. Moreover, UAV

treatments had PGR rates up to 6,000 mg L<sup>-1</sup>, while Flores (2019) applied 150 and 300 mg L<sup>-1</sup> in the experimentation.

The need to apply ABA with a complement was recommended by Solera (2019), who indicated that it is important to include other nutrients, especially phosphorus. Moreover, Chen *et al.* (2019) showed that ABA can enhance, with significant statistical differences, the grain yield when use together with sucrose.

Furthermore, the averages rice yield indicated poor production in comparison with the national and regional yields and suggest that external factors caused possible negative effects on the rice studied. In the same way as the SB rice yield analysis, the low damaged kernel (3.97%) suggests that pests, microorganisms, or diseases did not play a big part in the low values obtained. It is possible that low availability of nutrients in the soil affected the grain filling in the last rice production stage or either other environmental factors avoided a higher rice yield.

Due to the lack of significant differences between treatments and control and the poor yield results compared to the National and Regional average, it is concluded that the three spray volumes used with UAV, and the characteristics presented did not improve rice yield. Then, it was not possible to choose the optimal UAV treatment based on this parameter.

### 3.2.3 UAV rice milling quality

The ANOVA test and Kruskal Wallis test (for those data sets with no normality) reported no significant differences between treatments and control in all milling quality parameters (ANOVA:  $p = 0.5928-0.9968$ ;  $F = 0.02-0.65$ ; KW:  $p = 0.8792-0.9583$ ;  $H = 0.31$ ;  $\alpha = 0.05$ ). Considering that all results had a similar performance, RY will be used (Table 6). When analyzing RY, it was noted that the treatment averages were similar, with maximum differences as low as 0.7%, and presented an average standard deviation of 2.44%, which clarifies the few disparities between treatments.

Table 6. Commercial rice yield (RY) average values obtained in the milling test of rice sprayed with three unmanned aerial vehicle (UAV) treatments and the control (C).

Treatment	Average (%)	Standard Deviation (%)	Min (%)	Max (%)
D10	65.72	2.26	62.10	67.70
D20	65.18	2.64	62.80	69.10
D30	65.60	1.73	63.60	67.70
C	65.88	3.14	61.30	69.20

The average percentages of the three treatments of each milling quality parameter were compared to the results of a previous study conducted by Rojas (2012), who used the same technical regulation for rice milling tests. As shown in Table 7, the results for damaged kernels (DK), stack yield (SY), semolina yield (SeY), whole kernel yield (WKY), and broken kernel yield (BKY) were similar to those found by Rojas (2012), with a range of difference between -2.86% and 3.75%. Chalkiness (CH) was the parameter with the most difference being 6.96% higher in this research, followed by small broken yield (sbY) with 5.48% less than Rojas (2012).

Table 7. Milling quality comparison between unmanned aerial vehicle (UAV) treatments and other studies results.

Milling test	UAV treatments results (%)	(Rojas 2012) results (%)	(Reyes <i>et al.</i> 2020) results (%)	(Flores 2019) results (%)	(Solera 2019) results (%)	(Chen <i>et al.</i> 2019) results (%)
CH	11.46	4.50	-	-	-	11.40
DK	3.97	2.48	-	-	-	-
SY	68.69	65.55	68.70	71.72	-	≈67.00
SeY	10.70	13.47	9,34	-	-	-
sbY	3.19	8.67	-	-	-	-
LBY	16.79	-	-	-	-	-
WKY	48.65	44.90	-	63.91	61.50	≈60.00
BKY	19.98	22.84	7.27	7.81	7.29	-

CH = Chalkiness, DK = damaged kernels, SY = stack yield, SeY = semolina yield, sbY= small broken yield, LBY = large broken kernel yield, WKY = whole kernel yield and BKY = broken kernel yield.

The comparison with other studies suggests similarities with that found in present research for SY, having differences of 0.01% (Reyes *et al.* 2020), 3.03% (Flores 2019), and around 1.69% (Chen *et al.* 2019). However, BKY, in studies where ABA is involved, was around 7.00-8.00% which is about 13.00-12.00% lower than the BKY obtained with the UAV treatments. The differences in BKY and WKY may be due to

the use of sucrose by Chen *et al.* (2019) and the use of bio-stimulants and another PGR by Flores (2019). Both studies indicated an enhancement in the rice milling quality test carried out, compared to the treatments without the application of ABA.

The lack of significant differences between treatments and control, the similarities with results reported by Rojas (2012) and the

poor milling quality compared to other studies with ABA involved concluded that the three spray volumes and the characteristics presented did not improve rice quality. Therefore, it was not possible to choose the optimal UAV treatment based on rice milling quality parameters.

### 3.3 Selection of the most efficient spraying treatment and method

To determine if either SB or UAV is the optimal agrochemical spray method, all

parameters are compared between the most efficient treatments of each method. Table 8 summarizes the parameters results of the most efficient UAV and SB treatments. In this case, a trend to increase rice yield while increasing the spray volume was observed with SB200 having the greatest rice yield. However, differences in average yield were not enough to be considered significant, confirmed statistically. Rice milling quality was also compared statistically, and there were no significant differences between treatments in this parameter.

Table 8. Summary of the parameters studied in agrochemical spraying for SB100, SB200, and D20 treatments.

Parameter	Characteristics	Treatments		
		D20	SB100	SB200
Spray quality	Average coverage (%)	6.11	21.20	51.19
	Droplet density (drops cm <sup>-2</sup> )	15.39	171.64	460.20
	CV (%)	48.49	41.46	30.92
Rice yield	Average yield (kg ha <sup>-1</sup> )	2.921	3.163	3.504
Milling quality	RY average (%)	65.18	65.28	65.04

The most efficient method and treatment selection were based on the spray quality parameter. As presented before, SB200 and SB100 have significant differences in coverage percentage. After performing the Wilcoxon test, significant differences were found between treatments ( $W = 40$ ;  $p = 0.0019$  for D20:SB100 and  $W = 36$ ;  $p = 0.0002$  for D20:SB200).

It was concluded that SB200 is the optimal treatment for agrochemical spraying. As shown in Table 8, SB200 has the lowest CV, confirming this treatment as the most efficient in uniformity. However, its CV = 30.92%, was not nearly as close as required for international standards

(CV  $\leq$  10.00%). In the case of the percentage of coverage and droplet density, SB200 was also the treatment with better results. It presented a CV lower in 10.54% and 17.57% compared to SB100 and D20, respectively, and the droplet density exceeded what is required (460.20 drops cm<sup>-2</sup>). Additionally, it is important to point out that D20 did not present the droplet density necessary for systemic agrochemicals (> 20 drops cm<sup>-2</sup>).

As for SB100, the drop density surpassed what is required (171.64 drops cm<sup>-2</sup>) and, despite having inferior uniformity (CV = 41.46%) compared with SB200 (CV = 30.92%), it advantages SB200 in water consumption, which is beneficial

for the environment and people's basic needs, especially in drought prone areas where rice is grown. Reduction in water consumption, also represents a reduction in working hours, lower financial expenses, decrease of fuel consumption, lower tractor driving on rice, and a higher concentration of the agrochemicals in the water sprayed.

The SB100 uniformity weakness could be reduced with some changes and research in aspects like dosing nozzles, bar height, and tractor trajectory. Some research indicate that low uniformity could be the result of the effect of irregularities in the field, which causes abrupt movements in the tractor, changing the bar and nozzles height. This negative effect could be countered with the use of SB with suspensions or with the addition of suspensions to the existing equipment (Cui *et al.* 2019).

Even though it is possible to reach maximum water savings and avoid total crop damage with UAV, the low coverage makes its use difficult due to the lack of reliability with systemic and non-systemic agrochemicals. The use of the latest UAVs or the search for coverage improvement in the currently used UAVs would be beneficial since this equipment is cheaper and incurs fewer financial expenses than mounted sprayers.

The fact that rice yield seemed to have been negatively affected by some factors beyond this research scope, does not allow the linkage between parameters. Thus, it is important to continue the study of spraying with different variables or ranges, different locations, wider areas to facilitate equipment maneuverability and the use of adjuvants in the agrochemical mixture.

#### 4. CONCLUSIONS

This research made possible to study the performance of a conventional (SB) and a modern method (UAV) for agrochemical spraying according to spray quality, rice yield, and rice milling quality parameters. The results are useful not only for PGR or systemic agrochemicals, but

they can be considered for any kind of agrochemical to be sprayed.

With the methodology implemented and the rice field characteristics, significant differences in rice yield and rice milling quality were not found for UAV and SB. Thus, the selection of the most efficient spraying method was based entirely on spray quality parameter.

SB200 was selected as the most efficient treatment for agrochemical spraying since it presented the best results in all spray quality terms, compared to SB100 and D20, with a coverage 30.00% higher than SB100 and 45.08% higher than D20, an adequate droplet density of 460.20 drops  $\text{cm}^{-2}$  and being the treatment with the greatest uniformity (CV=30.92%) between the treatments compared.

SB100 exceeds the droplet density required (171.64 drops  $\text{cm}^{-2}$ ) and has a water consumption of 100% less than SB200. However, having a CV 10.55% higher than SB200 and lower coverage with significant differences resulted in a poor performance in the spray quality parameter. Therefore, it is necessary to improve the characteristics of the equipment that affects negatively the spraying.

The D20 treatment has considerable advantages over any SB treatment, such as low water consumption with 80 L  $\text{ha}^{-1}$  less than SB100, low storage space needed, fuel consumption is not necessary, the UAV operator has minimum exposure to agrochemicals, and there is no damage to the field contrary to what happens with a SB mounted on a tractor. However, the low uniformity (CV=48.49%) and low coverage (6.11% and 15.39 drops  $\text{cm}^{-2}$ ) in the spraying indicate that D20 does not comply with the necessary characteristics of agrochemical spraying of 20 drops  $\text{cm}^{-2}$  for systemic agrochemical and a 10.00% or lower CV ruling out D20 as the most efficient treatment. Nevertheless, working on UAV spraying improvement could lead to an advancement in the search of implementation of new technologies for the increase in agriculture efficiency.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This article is derived from the final dissertation titled “Evaluación de la eficiencia de la aplicación de un regulador de crecimiento en arroz (*Oryza sativa*) para diferentes volúmenes de aplicación de dron y “spray boom” of the University of Costa Rica (UCR).

This research was made with the support of rice producer Oscar Venegas, the collaboration of Max Villalobos Acuña and the grain laboratory of the Center for Research in Grains and Seeds (CIGRAS) of the UCR.

## LITERATURE CITED

- Ahmad, F; Khaliq, A; Qiu, B; Sultan, M; Ma, J. 2021. Advancements of spraying technology in agriculture. *In* Technology in Agriculture, Chapter 2: BoD-Books on Demand. 18 p.
- Alcántara, J; Godoy, A; Alcántara, D; Sánchez, R. 2019. Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *NOVA* 17(32):109-129.
- Borger, C; Reithmuller, G; Ashworth, M; Minkey, D; Hashem, A; Powles, S. 2013. Increased carrier volume improves preemergence control of rigid ryegrass (*Lolium rigidum*) in zero-tillage seeding systems. *Weed Technology* 27(4):649-655.
- Cedeño, K; Mero, G; Vera, A; Reyna, L. 2020. Evaluación de la distribución de gotas en la pulverización de plaguicida en maíz por el método tradicional y por dron. *Agricultura y Silvicultura, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador*. p. 65-78.
- Chen, T; Li, G; Rezaul, M; Fu, W; Feng, B; Tao, L; Fu, G. 2019. Abscisic acid synergizes with sucrose to enhance grain yield and quality of rice by improving the source-sink relationship. *BMC plant biology* 19(525):1-17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2126-y>
- CONARROZ (Corporación Arrocería Nacional, Costa Rica). 2019. Informe estadístico periodo 2017-2018. Corporación Arrocería Nacional Costa Rica (online). Consulted on 8 may. 2023. Available at [https://www.conarroz.com/userfile/file/INFORME\\_ANUAL\\_ESTADISTICO\\_PERIODO\\_2017\\_2018.pdf](https://www.conarroz.com/userfile/file/INFORME_ANUAL_ESTADISTICO_PERIODO_2017_2018.pdf)
- CONARROZ (Corporación Arrocería Nacional, Costa Rica). 2023. Informe anual estadístico periodo 2021-2022. Corporación arrocería nacional Costa Rica (online). Consulted on 4 July. 2024. Available at <https://conarroz.com/userfile/file/InformeAnualEstad%C3%ADstico21-22final.pdf>
- Cui, L; Xue, X; Le, F; Mao, H; Ding, S. 2019. Design and experiment of electro hydraulic active suspension for controlling the rolling motion of spray boom. *Int J Agric & Biol Eng* 12(4):72-81. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191204.4648>
- Decreto N°. 34487, 2008. Reglamento Técnico RTCR 406:2007. Arroz en Granza. Especificaciones y Métodos de Análisis para la Comercialización e Industrialización. Diario Oficial La Gaceta. Costa Rica. 7 may.
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; González, L; Tablada, M; Robledo, CW. 2018. *Infostat* (Versión 2020). Centro de Transferencia Infostat. <https://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=15>
- Dou, H; Wang, S; Zhai, C; Chen, L; Wang, X; Zhao, X. 2021. A LiDAR Sensor-Based Spray Boom Height Detection Method and the Corresponding Experimental Validation. *Sensors* 21(6):1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21062107>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2023. World Food Situation (online). Consulted on 12 jul. 2023. Available at <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/>
- Flores, L. 2019. Efecto del ácido abscísico, aplicado en el momento del llenado de grano, sobre el rendimiento y calidad molinera de arroz (*Oryza sativa* L.), en la costa de la Región Lambayeque, Perú. Tesis Lic. Lambayeque, Perú, Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo. 177 p.
- Foqué, D; Pieters, J; Nuyttens, D. 2013. Effect of spray angle and spray volume on deposition of a medium droplet spray with air support in ivy pot plants, *Society of chemical industry* 70:427-439. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.3584>
- Gómez, N; Rodríguez, J. 2019. Degradación del suelo por compactación en función de la distribución del peso en los ejes de los tractores agrícolas. *Yulök Revista de Innovación Académica* 3(2):44-50.
- Holterman, H; Van de Zande, J; Van Velde P. 2018. Optimizing sprayer boom design for bedgrown crops. *Agrosystems Research* 137:123-130.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, Costa Rica). 2017. Cuadro 1.2.6 Costa Rica, Área sembrada de arroz y producción según región y cantón, por período agrícola, 2011/2012 - 2014/2015 (online). Consulted on 12 may. 2023. Available at <https://inec.cr/busqueda?searchtext=arroz&page=2>
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, Costa Rica). 2023. Granos básicos son el 78% los cultivos anuales (online). Consulted on 20 set. 2023. Available at <https://inec.cr/noticias/granos-basicos-son-el-78-los-cultivos-anuales>

- Jeevan, N; Pazhanivelan, S; Kumaraperumal, R; Ragunath, K; Murali, P; Sritharan, N; Karthikkumar, A; anikandan, S. 2023. Effect of different spray volumes on deposition characteristics of a fuel-operated UAV sprayer using herbicides in transplanted rice (*Oryza sativa*). Indian Journal of Agricultural Sciences 93(7):720-725.
- Jiménez Salas, M. 2015. Manual de buenas prácticas agrícolas del cultivo del arroz. San José, Costa Rica, Servicio Fitosanitario del Estado. 79 p.
- Kluza, P; Kuna, I; Parafiniuk, S. 2019. Modeling and Prediction of the Uniformity of Spray Liquid Coverage from Flat Fan Spray Nozzles. Sustainability 11(23):1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11236716>
- Lamare, A; Zwervaegher, I; Nuyttens, D; Balsari, P; Marucco, P; Grella, M; Caffini, A; Mylonas, N; Fountas, S; Douzals, J. 2022. Performance of a Prototype Boom Sprayer for Bed-Grown Carrots Based on Canopy Deposition Optimization, Ground Losses and Spray Drift Potential Mitigation in Semi-Field Conditions. Appl, Sci 12(9):4462. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12094462>
- Li, X; Andaloro, J; Lang, E; Pan, Y. 2019. Best Management Practices for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Application of Insecticide Products on Rice. ASABE 2019 Annual International Meeting. DOI: <https://doi.org/10.13031/aim.201901493>
- Matilde, M; Ponce, M; Vázquez, J; Guilino, F; Merani, V; Palancar, T; Balbuena, R. 2018. Aplicación de agroquímicos en cultivos de soja (*Glycine max* L. Merr). Evaluación del efecto de diferentes técnicas sobre la eficiencia de distribución. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata 117(1):77-88.
- Matsuda, S; Takano, S; Sato, M; Furukawa, K; Nagasawa, H; Yoshikawa, S; Kasuga, J; Tokuji, Y; Yazaki, K; Nakazono, M; Takamura, I; Kato, K. 2016. Rice Stomatal Closure Requires Guard Cell Plasma Membrane ATP-Binding Cassette Transporter RCN1/OsABC5. Molecular plant 9(3):417-427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2015.12.007>
- Portuguez, R. 2019. Cobertura sinónimo de eficiencia en la calidad de herbicidas en la caña de azúcar. Grecia, Costa Rica, Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar. 36 p.
- Qin, P; Zhang, G; Hu, B; Wu, J; Chen, W; Ren, Z; Liu, Y; Xie, J; Yuan, H; Tu, B; Ma, B; Wang, Y; Ye, L; Li, L; Xiang, C; Li, S. 2021. Leaf-derived ABA regulates rice seed development via a transporter-mediated and temperature-sensitive mechanism. SciencesAdvances 7(3):1-12. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc8873>
- Ramírez, H; Mancera, L; Zermeño, A; Jasso, D; Villarreal, J. 2019. Efecto del ácido abscísico sobre fenotipo y calidad del fruto en vid Shiraz. Ecosistemas y recursos agropecuarios 6(16):153-158.
- Reyes, W; Zamora, B; Cobos, F; Espinoza, F. 2020. Calidad molinera de 40 líneas avanzadas f6 de arroz (*Oryza sp.*) cultivadas en dos zonas arroceras del Ecuador, Journal of science and research 5:267-274. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4429290>
- Rojas, S. 2012. Evaluación de la calidad del arroz en granza (*Oryza sativa*) almacenado en silo de compañía arrocería industrial planta industrial Río Claro. Tesis Lic. San Pedro, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 151 p.
- Solera, E. 2019. Evaluación de la eficacia del regulador fisiológico InGrain 20 SG (S-acido abscísico 20%) en el cultivo de arroz (*Oryza sativa*). Costa Rica, Servicio Fitosanitario del Estado. s. p.
- Wang, J; Lan, Y; Zhang, J; Zhang, Y; Wen, S; Yao, W; Deng, J. 2018. Drift and deposition of pesticide applied by UAV on pineapple plants under different meteorological conditions. International Journal of Agricultural and Biological Engineering 11(6):5-12.
- Wang, J; Lan, Y; Yuan, H; Qi, H; Chen, P; Ouyang, F; Han, Y. 2019. Comparison of Spray Deposition, Control Efficacy on Wheat Aphids and Working Efficiency in the Wheat Field of the Unmanned Aerial Vehicle with Boom Sprayer and Two Conventional Knapsack Sprayers. Applied science 9(2):218. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9020218>
- Woldt, W; Martin, D; Latheef, M; Kruger, G; Wright, R; McMechan, J; Proctor, C; Jackson-Ziems, T. 2018. Field evaluation of commercially available small unmanned aircraft crop spray systems, ASABE 2018 Annual International Meeting, Detroit, Michigan, Estados Unidos. DOI: <https://doi.org/10.13031/aim.201801143>
- Zhang, X; Song, X; Qin, Z; Zhang B; Wei, J; Li, Y; Wu, J. 2020. Effects of spray parameters of drone on the droplet deposition in sugarcane canopy. Sugar Tech 22(4):583-588. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00792-z>
- Zhu, H; Salyani, M; Fox, R. 2011. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution. Computers and Electronics in Agriculture 76(1):38-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.003>





## EFFECTO DE PRÁCTICAS DE AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN EL SISTEMA MILPA EN YUCATÁN, MÉXICO

Carlos Aldair Gamboa-Cimé<sup>1</sup>, José Bernardino Castillo-Caamal<sup>2/\*</sup>, Rodolfo Vilchis-Ramos<sup>3</sup>,  
Jorge Santiago Santos-Flores<sup>4</sup>, Alan García-Lira<sup>5</sup>

**Palabras clave:** maíz; rendimiento; cultivos intercalados; estiércol ovino; agricultura de conservación.

**Keywords:** maize; yield; intercrops; sheep manure; conservation agriculture.

**Recibido:** 13/03/24

**Aceptado:** 11/06/24

### RESUMEN

**Introducción.** El cambio en el uso del suelo en la Península de Yucatán ha impactado en la vegetación, con influencia en el sistema milpa que depende de dicho recurso, y en consecuencia, disminuyen la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos. La agricultura de conservación (AC) con diversificación de cultivos, labranza cero y cobertura del suelo, es una opción para mejorar la producción sustentable de alimentos. **Objetivo.** Evaluar el efecto de tres tratamientos con prácticas de AC en el rendimiento y componentes del grano de maíz (*Zea mays* L.) en la milpa. **Materiales y métodos.** El experimento se estableció en Yaxcabá, Yucatán. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con un control y tres tratamientos; T1 (control): Maíz, frijol ib o frijol lima, calabaza +

fertilización con fosfato diamónico (DAP), T2: Maíz, frijol ib o frijol lima, calabaza + fertilización con estiércol ovino (EO), T3: Maíz, lenteja de milpa o frijol gandúl, calabaza + fertilización con EO y T4: Maíz, frijol terciopelo + EO. Se aplicó 100 kg ha<sup>-1</sup> de DAP en T1, en los demás tratamientos 4 t ha<sup>-1</sup> de EO. Se sembró maíz de la raza Tuxpeño. Las variables dependientes fueron número de plantas, número de mazorcas, humedad del grano, coeficiente de desgrane y rendimiento de grano. **Resultados.** El número de plantas, humedad del grano y coeficiente de desgrane fueron similares ( $p>0,05$ ) en todos los tratamientos. En el número de mazorcas y rendimiento de grano hubo significancia ( $p\leq 0,05$ ) con un valor mayor de ambas variables en T2, el cual incrementó en 3,500 el número de mazorcas y 327 kg ha<sup>-1</sup> el rendimiento de grano, respecto a T1. **Conclusión.** Con el tratamiento T2 se pudo

\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: jose.castillo@correo.uady.mx

1 Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.  
 0009-0009-9043-9837.

2 Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.  
 0000-0002-1697-1915.

3 International Maize and Wheat Improvement Center, Texcoco, México.

 0009-0002-5966-1500.

4 Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.

 0000-0003-1766-2599.

5 Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.

 0000-0002-8135-1173.

incrementar el número de mazorcas y rendimiento de grano de maíz en la milpa desde el primer ciclo de cultivo al establecerse prácticas de AC.

## ABSTRACT

**Effect of conservation agriculture practices on maize production in the milpa system in Yucatán, México. Introduction.** The change in land use in the Yucatan Peninsula has impacted the vegetation, and affecting on the milpa system that depends on that resource, and consequently, soil fertility and crop yields decrease. The conservation agriculture (CA) with crop diversification, minimum tillage and soil cover, is an option to improve sustainable food production. **Objective.** Evaluate the effect of four treatments with CA practices on the yield of maize (*Zea mays* L.) and their components. **Materials and methods.** The experiment was established in Yaxcabá, Yucatán, México. A randomized complete block experimental design

with one control and three treatments were evaluated; T1 (control): Maize, frijol ib or lima bean, squash + fertilized with diammonium phosphate (DAP), T2: Maize, frijol ib or lima bean, squash + fertilized with sheep manure (SM), T3: Maize, pigeon pea, squash + SM and T4: Maize, velvet bean + SM. In T1 was applied 100 kg ha<sup>-1</sup> of DAP and the other treatments 4 t ha<sup>-1</sup> of SM. Maize of the Tuxpeño landrace was sowed. The depend variables were number of plants, number of cobs, maize kernel moisture, shelling coefficient and maize grain yield. **Results.** The number of plants, kernel, moisture and shelling coefficient were similar ( $p>0.05$ ) in all treatments. There was significance difference in the number of cobs and grain yield ( $p\leq 0.05$ ). The highest value of both variables was obtained in T2, which increased the number of cobs by 3.500 and the grain yield by 327 kg ha<sup>-1</sup>, compared to T1. **Conclusion.** In treatment T2, the number of cobs and grain yield of the corn from the milpa can be increased from the first crop cycle when CA practices are established.

## INTRODUCCIÓN

La milpa es un sistema agroforestal de Mesoamérica que ha estado vigente por al menos 5000 años (Mariaca 2015). Es la principal fuente de alimentos para las familias de las comunidades rurales del sur y oriente de Yucatán. De la milpa se obtiene el maíz (*Zea mays* L.) como alimento principal, y se asocia con diferentes especies de leguminosas (*Phaseolus vulgaris* L., *Phaseolus lunatus* L. y *Vigna* spp.) y calabazas (*Cucurbita moschata* Duch, *Cucurbita argyrosperma* Huber y *Cucurbita pepo* L.) (Terán y Rassmussen 2009). Se puede incrementar la diversidad con otras especies como el camote (*Ipomea batatas* L.), la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) (Moya y Ku 2001) y una amplia variedad de hierbas comestibles y plantas silvestres (Linares y Bye 2011).

En Yucatán, por la pedregosidad y poca profundidad del suelo, es prácticamente imposible el uso de maquinaria agrícola o de animales para labores de labranza (Pérez 1981), por lo que la agricultura de roza, tumba y quema (RTQ) ha sido la más adaptada al sistema para aprovechar los recursos naturales de la zona y es bajo la cual se trabaja la milpa (Nigh y Diemont 2013).

La fertilidad del suelo tiende a mejorar después de la quema con la adición de cenizas provenientes de la vegetación previamente rozada y tumbada (Arita 2020), lo que permite cultivar en el lugar por los siguientes tres años, pues la materia orgánica y los minerales que proveen la fertilidad tienden a disminuir después de ese tiempo, y con ella el rendimiento del maíz y los cultivos asociados (Pool y Hernández 1995). Para evitar la degradación del suelo, es necesario permitir el descanso del monte por períodos largos, de 40 años o más (Fonteyne *et al.* 2023).

Desde hace cuatro décadas, y hasta la actualidad, ha existido una fuerte presión sobre la vegetación de la selva de Yucatán, ocasionada el cambio de uso del suelo que implica la reducción de superficies de selva y espacios disponibles para el establecimiento de las milpas (Pérez 1981, Pool 2001, Rodríguez *et al.* 2016). Esto ha forzado a incrementar el tiempo de cultivo sobre un mismo suelo hasta por 10 años o más, y ha reducido del tiempo de descanso a dos o seis años, lo que impide al suelo recuperar su fertilidad completamente al agotarse las reservas de nutrientes, desencadenando efectos secundarios negativos como la pérdida de la fertilidad del suelo, disminución de la biodiversidad cultivada e incremento de poblaciones de plagas y arvenses, que en conjunto contribuyen a la baja productividad del maíz (Castillo *et al.* 2023).

Ante esta problemática, en la agricultura de RTQ en Yucatán se ha recurrido al uso de fertilizantes y herbicidas (Bautista *et al.* 2005, Polanco *et al.* 2019, Uuh *et al.* 2024) que, si bien son una solución rápida y efectiva para mejorar la producción, muchas veces se encuentran fuera de alcance para los productores debido a los costos elevados para su adquisición (Ortíz *et al.* 2014). Además, el uso de estos insumos resulta perjudicial para el ambiente y la salud humana debido a la alta toxicidad y persistencia en el suelo de sus compuestos (Polanco *et al.* 2019).

El principal objetivo de la milpa es abastecer de alimentos y otros materiales básicos a las familias para el autoconsumo (Mariaca 2015), por lo que es conveniente el estudio de nuevos modelos de agricultura que mejoren los procesos productivos campesinos apegados al contexto social y cultural de los territorios (Castillo *et al.* 2021). Lo anterior solo es posible partiendo de una base filosófica y científica de los antecedentes históricos locales que dirijan la toma de decisiones (Hernández 1988).

Desde hace más de tres décadas, se ha expandido alrededor del mundo, por medio de organizaciones nacionales e internacionales, el concepto de agricultura de conservación (AC) y

se ha promovido como un modelo revolucionario de agricultura para la conservación del suelo, principalmente en países de América Latina. La AC, se basa en tres principios: 1) la labranza cero, 2) cobertura permanente en el suelo y 3) diversificación de cultivos. Esto ha presentado efectos positivos en la agricultura en términos de rendimiento, sostenibilidad, facilitación del trabajo y adaptación al sistema productivo (Friedrich *et al.* 2012).

En este sentido, se sabe que la sustentabilidad de la milpa se ha logrado a partir de dos principios fundamentales: 1) la diversificación del sistema y 2) el mantenimiento de la calidad del suelo (Martínez *et al.* 2020), por lo que fortalecer la milpa a través del manejo agroecológico con prácticas de AC es una opción para conservar y mejorar el recurso edáfico en sus componentes físicos, químicos y biológicos. En consecuencia, mejora la producción de maíz en milpas con periodos de descanso cortos o suelos de uso continuo en condiciones de temporal. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de prácticas de agricultura de conservación con la incorporación de tres leguminosas y el uso de estiércol de ovino en sistemas de producción sobre los componentes del rendimiento del cultivo de maíz en la milpa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en un predio con cinco años de descanso, ubicado en las coordenadas 20°31'46,59" N, 88°41'18,59" W, en la localidad de Yaxunah, Yaxcabá, Yucatán (Figura 1), con un clima cálido-subhúmedo (Aw<sup>1</sup>), temperatura media anual de 26°C y precipitación pluvial de 1300 mm (INEGI 2010). El suelo de las unidades experimentales es Cambisol, con relieve plano y ligeras afloraciones de roca madre. El experimento se realizó en el ciclo primavera-verano del 2022.

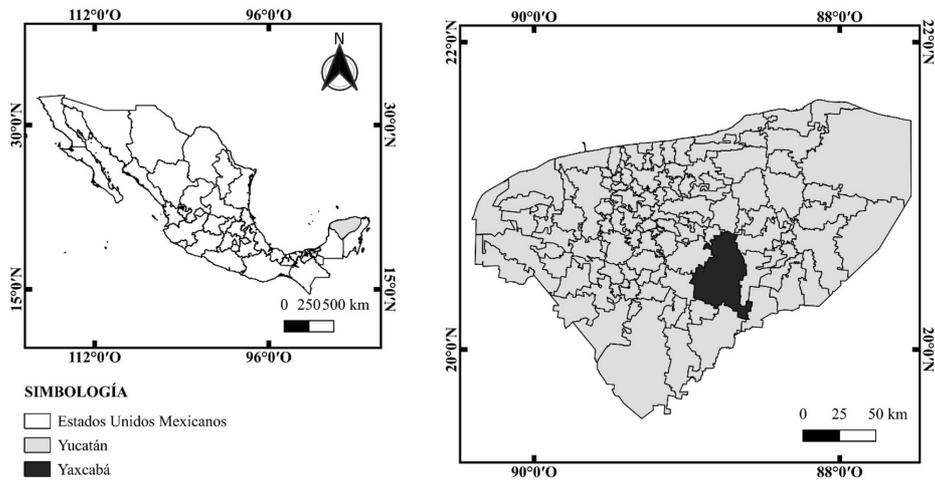


Figura 1. Ubicación geográfica del sitio de estudio.

### Diseño experimental

Se establecieron unidades experimentales de 54 m<sup>2</sup> (6 x 9 m), con un área útil de 32 m<sup>2</sup> (4 x 8

m) en un diseño de bloques completos al azar, con cuatro tratamientos (Tabla 1) y cinco repeticiones.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos aplicados para la producción de maíz en Yaxunah, Yaxcabá, Yucatán.

Tratamiento	Clave**	Cultivos intercalados	Fuente de fertilización*
T1	MI, DAP	Maíz, frijol ib o frijol lima, calabaza	DAP
T2	MI, EO	Maíz, frijol ib o frijol lima, calabaza	EO
T3	MLC, EO	Maíz, lenteja o gandúl, calabaza	EO
T4	MMB, EO	Maíz, frijol terciopelo	EO

\* DAP: fosfato diamónico, EO: estiércol ovino.

\*\* MI, DAP: Maíz, frijol lima, calabaza, fosfato diamónico; MI, EO: Maíz, frijol lima, calabaza, estiércol ovino; MLC, EO: Maíz, lenteja o gandul, calabaza, estiércol ovino; MMB, EO: Maíz, Mucuna, estiércol ovino.

### Establecimiento de los cultivos

La vegetación del terreno fue cortada manualmente y quemada previo al establecimiento de los cultivos para eliminar la vegetación secundaria, lo cual implicó la ausencia de rastrojo para este primer ciclo. La preparación del suelo fue tradicional, sin labranza. La siembra se

realizó de manera manual con un palo sembrador de acuerdo con los tratamientos (Tabla 1). Los arreglos topológicos fueron; 1,0 m entre hileras y 0,5 m entre plantas para el maíz (*Zea mays* L.) de la raza Tuxpeño; 1,5 m entre hileras y 1,5 m entre plantas para el frijol ib (*Phaseolus lunatus*), lenteja (*Cajanus cajan* L.) y frijol terciopelo (*Mucuna* sp.); 3,0 metros entre hileras y 3,0 metros entre

plantas para la calabaza (*C. moschata*). Se depositaron dos semillas por cepa para cada cultivo. La siembra de maíz, frijol ib, lenteja y calabaza fue simultánea realizada el 24 de junio de 2022. El frijol terciopelo se sembró 30 días después de la siembra del maíz para reducir el efecto negativo en el rendimiento del maíz debido a la competencia por el N del suelo entre la fabácea y la gramínea (Castillo y Caamal 2011). Se realizaron deshierbas manuales para eliminar las arvenses y mantener el cultivo libre de competencia durante el periodo crítico. Fue innecesario el uso de agroquímicos para el control de plagas.

### Aplicación de estiércol y fertilizante

Cuando las plantas en el tratamiento T1 alcanzaron la etapa V6, se aplicó fosfato diamónico (DAP), depositando de manera manual 5 g sobre la superficie de cada cepa, equivalente a una dosis de 100 kg ha<sup>-1</sup>. Se seleccionó ese fertilizante por ser usado comúnmente por productores milperos de la región (Moya *et al.* 2003) debido a la limitada disponibilidad de P soluble en suelos calcaeos como los de Yucatán (Ramírez *et al.* 2019).

En los tratamientos T2, T3 y T4 se aplicó (al momento de la siembra) 0,2 kg de estiércol maduro de ovino de manera manual localizado sobre la cepa de siembra, equivalente a una dosis de 4 t ha<sup>-1</sup>. El estiércol utilizado fue recolectado y retirado de los corrales, se almacenó durante un período mínimo de cuatro meses, después fue embolsado y transportado para la aplicación en los tratamientos correspondientes. Se ha reportado que el mismo tipo de estiércol, colectado en condiciones ambientales y de manejo productivo similares, aporta alrededor de 137 kg de N, 20 kg de P y 64 kg de K (Parsons *et al.* 2009).

### VARIABLES DE RESPUESTA

En el área útil de las unidades experimentales se registraron las variables número de plantas, número de mazorcas y rendimiento de grano. El conteo de plantas y la cosecha de mazorcas se realizó cuando la planta alcanzó la madurez fisiológica. Las mazorcas se cosecharon de manera manual, libres de brácteas. Para obtener el coeficiente de desgrane se extrajeron submuestras de

10 mazorcas seleccionadas aleatoriamente de la cosecha en cada unidad experimental (Triomphe 2011), se desgranaron manualmente y se dividió el peso total del grano entre el peso del grano con el hueso de la mazorca, el valor se multiplicó por cien para transformarlo a porcentaje. El contenido de humedad en el grano se midió con un determinador John Deere® SW08120, para los granos obtenidos de las submuestras.

El rendimiento de grano se determinó ajustando la humedad a 14% con la metodología propuesta por Triomphe (2011), la cual consistió en multiplicar el peso total de las mazorcas cosechadas en la unidad experimental por el coeficiente de desgrane de su respectiva submuestra para obtener el peso total de grano en el área útil, posteriormente, se multiplicó por el factor de corrección de humedad (FCH) que se determinó con la siguiente ecuación.

$$FCH = (100 - H\%)/86 \quad (1)$$

Donde  $H\%$  es el contenido de humedad del grano determinado en las submuestras.

El número de plantas, mazorcas y rendimiento de grano estimado en el área de la parcela útil se transformó a rendimiento por hectárea multiplicando los valores obtenidos por el factor de corrección de área (FCA) que se obtuvo de la siguiente manera:

$$FCA = \frac{10,000}{\text{Superficie del área útil}} \quad (2)$$

Donde *Superficie del área útil* es el área expresada en metros cuadrados.

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se aplicaron pruebas de normalidad Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas Bartlett (Tabla 2). Se realizaron los análisis de varianzas y se aplicaron pruebas de rango múltiple de medias de Duncan ( $p < 0,05$ ) de acuerdo con el diseño experimental, mediante el lenguaje de programación R (R Core Team 2023).

Tabla 2. Pruebas de normalidad Shapiro-Wilk y homocedasticidad de Bartlett para las variables de los componentes del rendimiento de grano de maíz.

Variable	Shapiro-Wilk		Bartlett	
	Valor W	Valor P	K cuadrada de Bartlett	Valor P
Plantas ha <sup>-1</sup>	0,951	0,390	6,162	0,104
Mazorcas ha <sup>-1</sup>	0,966	0,670	7,610	0,054
Coefficiente de desgrane (%)	0,927	0,136	3,583	0,310
Humedad del grano (%)	0,940	0,244	4,879	0,180
Rendimiento de grano (kg ha <sup>-1</sup> )	0,949	0,366	6,034	0,110

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza indicó valores sin diferencia significativa ( $p>0,05$ ) entre

tratamientos para las variables de número de plantas (Figura 2), coeficiente de desgrane y contenido de humedad (Figura 3).

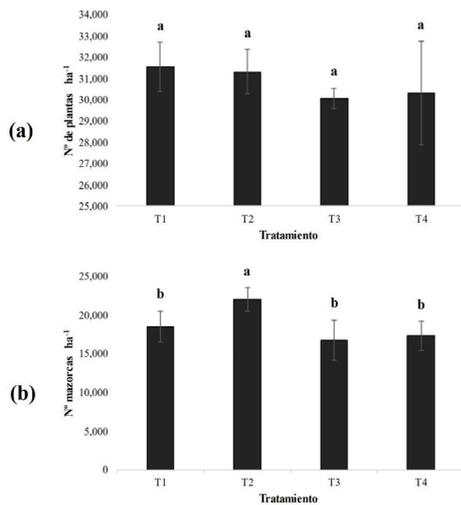


Figura 2. Valor promedio de plantas de maíz (a) y producción de mazorcas (b) por hectárea con tratamientos de agricultura de conservación en el ciclo Primavera-Verano 2022 en Yaxunah, Yaxcabá, Yucatán, México. Letras diferentes en las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos ( $p < 0,05$ ). Líneas verticales en las barras indican el error estándar.

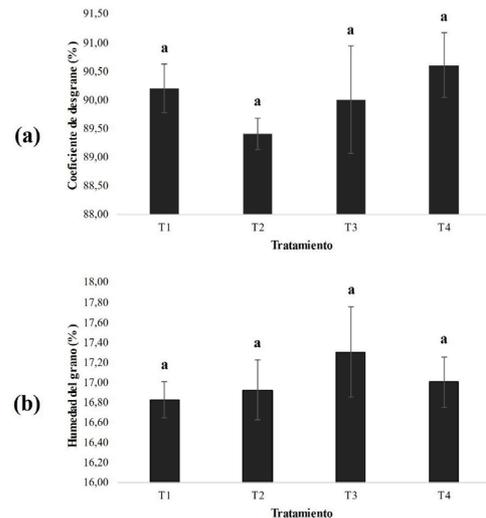


Figura 3. Valor promedio del coeficiente de desgrane (a) y contenido de humedad (b) del grano de maíz con tratamientos de agricultura de conservación en el ciclo Primavera-Verano 2022 en Yaxunah, Yaxcabá, Yucatán, México. Letras iguales en las barras indican sin diferencia significativa entre los tratamientos ( $p > 0,05$ ). Líneas verticales en las barras indican el error estándar.

En este trabajo se presentó el mayor número de plantas en el tratamiento T2, seguido de T4 y T3; con la misma tendencia se manifestaron los rendimientos de grano (Tabla 3). Resultados similares a los de este experimento fueron reportados por Ayala *et al.* (2009) donde el número de plantas de maíz por unidad experimental fue igual tanto en la siembra intercalada

con frijol terciopelo como con frijol espada (*Canavalia ensiformis*) con y sin aplicación de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) en el tercer ciclo del cultivo, aunque difiere con el rendimiento de grano de maíz, el cual fue similar entre los tratamientos sin seguir una tendencia como la que se mencionó anteriormente.

Tabla 3. Análisis de varianza para las variables de los componentes del rendimiento de grano de maíz.

Variable	Tratamiento	Media	Valor de F	Valor de P
Plantas ha <sup>-1</sup>	MI, DAP	31 563	0,40	0,75
	MI, EO	31 313		
	MLC, EO	30 063		
	MMB, EO	30 313		
Mazorcas ha <sup>-1</sup>	MI, DAP	18 500	8,2	0,003
	MI, EO	22 000		
	MLC, EO	16 750		
	MMB, EO	17 313		
Coeficiente de desgrane (%)	MI, DAP	90,2	0,81	0,51
	MI, EO	90,0		
	MLC, EO	89,4		
	MMB, EO	90,6		
Humedad del grano (%)	MI, DAP	16,82	0,39	0,761
	MI, EO	16,92		
	MLC, EO	17,3		
	MMB, EO	17,0		
Rendimiento de grano (kg ha <sup>-1</sup> )	MI, DAP	1 510	3,42	0,05
	MI, EO	1 183		
	MLC, EO	1 144		
	MMB, EO	1 355		

MI,DAP: Maíz, frijol lima, calabaza, fosfato diamónico; MI,EO: Maíz, frijol lima, calabaza, estiércol ovino; MLC, EO: Maíz, lenteja o gandul, calabaza, estiércol ovino; MMB,EO: Maíz, Mucuna, estiércol ovino.  
Prueba de rangos múltiples de Duncan  $p < 0,05$ .

El mayor número de mazorcas (22 000) se registró en el tratamiento T2, el cual fue diferente ( $p < 0,05$ ) al resto de los tratamientos (Figura 2). La producción de mazorcas en los tratamientos T1, T3 y T4 fue similar ( $p > 0,05$ ). En T1 se obtuvo una producción de 18 500 mazorcas, T3 y T4 presentaron 16 750 y 17 313 mazorcas, respectivamente (Tabla 3).

Se conoce que el estiércol de ovino en la dosis utilizada en este experimento tiene potencial para incrementar el número de mazorcas (Parsons *et al.* 2009). En condiciones similares, se ha reportado que la producción de mazorcas por hectárea, con las mismas dosis de estiércol y DAP en monocultivos de maíz, presenta valores sin diferencia significativa (Cough *et al.* 2022,

Itzá 2024), sin embargo, el uso de estiércol favoreció el rendimiento de mazorcas.

Que el número de mazorcas haya sido diferente significativamente (incluso entre tratamientos que recibieron fertilización con estiércol) se debe al número de plantas por hectárea reportadas al momento de la cosecha, ya que de él derivan otros componentes clave como el número de mazorcas, granos por mazorca y peso promedio del grano, que al final determinan rendimiento de grano de maíz (Nielsen 2023).

El mayor rendimiento de grano (1510 kg ha<sup>-1</sup>) se obtuvo en el tratamiento T2, presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) respecto a T1 y T3; donde estos dos tratamientos resultaron similares estadísticamente ( $p > 0,05$ ) con 1183 y 1144 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabla 3). El tratamiento T4 presentó un rendimiento de 1355 kg ha<sup>-1</sup> similar a todos los tratamientos (Figura 4).

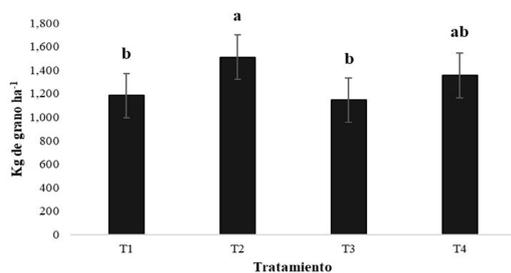


Figura 4. Rendimiento promedio de grano de maíz en una hectárea con tratamientos de agricultura de conservación en el ciclo Primavera-Verano 2022 en Yaxunah, Yaxcabá, Yucatán, México. Letras diferentes en las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos ( $p < 0,05$ ). Líneas verticales en las barras indican el error estándar.

El rendimiento de grano que se obtuvo con los diferentes tratamientos superó la media estatal registrada en el mismo año del experimento, el cual según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2022) fue de 970 kg ha<sup>-1</sup>.

Al comparar T1 con T2 y T4 se observaron incrementos en el rendimiento de grano y número de mazorcas (Tabla 3). No se manifestaron los efectos de las leguminosas y su capacidad para la fijación biológica de nitrógeno, ya que se ha demostrado que el rendimiento de maíz intercalado con frijol ib o frijol terciopelo se mantiene similar en comparación con el monocultivo, al menos hasta el tercer ciclo (Castillo *et al.* 2010). El incremento en el rendimiento se atribuye a las fuentes nutricionales utilizadas, ya que estos resultados coinciden con la investigación de Parsons *et al.* (2009), quienes reportaron incrementos en dicha variable al aplicar 4 t ha<sup>-1</sup> de estiércol en un cultivo de maíz en comparación con un control sin fertilización. Por su parte, Couoh *et al.* (2022) reportaron una mejor producción de mazorcas y grano de maíz al utilizar la misma cantidad de estiércol en contraste con el DAP.

El maíz es un cultivo que requiere alrededor de 19,5 kg de N y 7,2 kg de P por hectárea para producir una tonelada de grano, de los cuales 12,7 y 5,6 kg t<sup>-1</sup>, respectivamente, son destinados principalmente para el desarrollo del grano (Castellanos *et al.* 2020a). El contenido de nitrógeno del suelo registrado en la zona donde se realizó el experimento es de 74 kg ha<sup>-1</sup>, al adicionar el DAP con 18 kg de nitrógeno, sugiere que existe el potencial para alcanzar 2,3 t ha<sup>-1</sup> de grano considerando que la eficiencia en el uso del N es alrededor del 50-80% (Danso y Eskew 2005). El aprovechamiento del N (nutriente importante para la producción de grano) es influenciado por las fuentes nutrimentales utilizadas en los tratamientos.

La quema de la milpa favorece la producción la producción de maíz hasta por tres ciclos consecutivos (Pool y Hernández 1995) debido a que la adición de cenizas propicia la disponibilidad de P para los cultivos (Mariaca *et al.* 1995). Se ha reportado que en milpas con períodos de descanso cortos y suelos Cambisoles, (similares a la de este experimento), las reservas de P en el suelo después la quema y un ciclo de cultivo de maíz, frijol y calabaza es de 17,28 kg ha<sup>-1</sup>, mientras que después del mismo cultivo, en un suelo libre de

manejo con fuego la reserva de P es menor; con un contenido de 7,56 kg ha<sup>-1</sup> (Ebel 2018).

Según la curva de absorción de N y P, la necesidad de estos elementos incrementa cuando el maíz alcanza la etapa V6 (Castellanos *et al.* 2020a). Es a partir de esta etapa que comienzan a ocurrir cambios fisiológicos en la planta que determinan el rendimiento final, como la diferenciación de mazorcas y formación de granos potenciales que definen el rendimiento final de grano (Castellanos *et al.* 2020b). El estiércol tiene un alto contenido de macronutrientes, cuyo N total y otros nutrimentos se encuentra en forma orgánica. Estos se liberan lentamente en el sistema, lo que disminuye las pérdidas (Sosa y García 2018) y permite una mayor disponibilidad de nutrientes durante las diferentes etapas del cultivo, entre ellas las más demandantes de N (V6-R1). Por el contrario alrededor del 50-80% del N de los fertilizantes inorgánicos se pierde por volatilización o lixiviación (Danso y Eskew 2005). Por lo anterior, la liberación lenta y paulatina de N y otros nutrientes, pudo ser responsable de que el cultivo de maíz presentara mejores rendimientos en los tratamientos T2 y T4 en comparación con T1. Sin embargo, no fue así en el tratamiento T3, el cual inexplicablemente presentó menor rendimiento a pesar de haberse utilizado el estiércol en la misma dosis también.

La reducción del rendimiento de grano de maíz en el tratamiento T3 (a pesar de haber recibido estiércol como fertilizante) se debió a una interferencia de la leguminosa, ya que la siembra de ambos cultivos fue simultánea. Esto coincide con lo descrito por Zayas *et al.* (2010) quienes reportaron en una siembra intercalada de *C. cajan* y maíz, un rendimiento de grano 980 kg ha<sup>-1</sup> inferior al testigo en monocultivo, mientras que la siembra de la leguminosa 60 días después de la siembra del maíz incrementó 1406 kg ha<sup>-1</sup> el rendimiento.

Al utilizar estiércol como complemento nutrimental, desde el primer ciclo de cultivo, incrementó el rendimiento, como se observó en el tratamiento T2. Esto representa una ventaja para los agricultores, ya que el uso continuo y racional

de estiércol en la agricultura permite conservar y mejorar diferentes propiedades del suelo con la adición de materia orgánica y minerales (Salazar *et al.* 2010, Trejo *et al.* 2013). Asimismo, permite reducir los costos de la producción al depender en menor medida de fertilizantes minerales (Vázquez 2003), además de que el estiércol es un subproducto de la producción animal que puede encontrarse fácilmente en los hogares rurales (Cuanalo y Guerra 2009, Cruz 2018).

## CONCLUSIONES

El rendimiento de grano de maíz se registró en un rango de 1144 a 1510 kg ha<sup>-1</sup>, valores superiores a la media estatal para el sistema milpa. El sistema basado en maíz, ib y calabaza con la aplicación de estiércol de ovino demostró potencial para incrementar la producción de maíz en el primer ciclo de cultivo al establecerse prácticas de agricultura de conservación. Las variables número de plantas, coeficiente de desgrane y contenido de humedad del grano no fueron afectadas por ninguno de los tratamientos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del International Maize and Wheat Improvement Center a través del proyecto “Plataforma de Investigación y validación de innovaciones agroecológicas para el sistema milpa en Peto Yucatán” como parte de la iniciativa CGIAR Excelente in Agronomy. Así como a la Fundación W.K. Kellogg, por el apoyo a través del proyecto “Construcción transdisciplinaria de un proceso de innovación social para la soberanía alimentaria sostenible en comunidades de Yaxcabá, Yucatán” Clave sistproy: FMVZ-2022-0003.

## LITERATURA CITADA

Arita, S. 2020. Efecto de la quema agrícola sobre las propiedades del suelo en una parcela de 20-25 años de barbecho en Yucatán, México. Tesis Lic. Yucatán, México, Universidad Autónoma de Yucatán. 88 p.

- Ayala, A; Krishnamurthy, L; Basulto, J. 2009. Leguminosas de cobertera para mejorar y sostener la productividad de maíz en el sur de Yucatán (en línea). *Terra Latinoamericana* 27(1):63-69. Consultado 13 de jun. 2024. Disponible en [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792009000100008&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792009000100008&script=sci_arttext)
- Bautista, F; García, J; Mizrahi, A. 2005. Diagnóstico campesino de la situación agrícola en Hocobá, Yucatán. *Terra latinoamericana* 23(4):571-580.
- Castellanos, J; Etchevers, J; Peña, M; García, S; Ortiz, I; Arango, A; Macías, J; Venegas, C. 2020a. Acumulación de biomasa y nutrientes. In Castellanos, J; Etchevers, J; Peña, M; García, S; Ortiz, I; Arango, A; Macías, J; Venegas, C (eds.). *¿Cómo crece y se nutre una planta de maíz?* 2 ed. s. l., Fertilab. 134 p.
- Castellanos, J; Etchevers, J; Peña, M; García, S; Ortiz, I; Arango, A; Macías, J; Venegas, C. 2020b. Desarrollo vegetativo. En: Castellanos, J; Etchevers, J; Peña, M; García, S; Ortiz, I; Arango, A; Macías, J; Venegas, C. (eds.). *¿Cómo crece y se nutre una planta de maíz?* 2 ed. s. l., Fertilab. 134 p.
- Castillo, E; Martín, E; López, G; Jiménez, J; Muñoz, G. 2021. Perspectivas del sistema milpa en Yucatán. *Bioagrociencias* 14(2):13-22. DOI: <http://dx.doi.org/10.56369/BAC.3912>
- Castillo, J; Caamal, J; Jiménez, J; Bautista, F; Amaya, M; Rodríguez, R. 2010. Evaluación de tres leguminosas como coberturas asociadas con maíz en el trópico subhúmedo. *Agronomía Mesoamericana* 21(1):39-50.
- Castillo, J; Caamal, J. 2011. Efecto de la fecha de siembra del frijol terciopelo (*Mucuna* sp.) como cultivo de cobertera en el rendimiento de maíz (en línea). *Tropical and subtropical Agroecosystems* 14(1):101-108. Consultado 13 jun. 2024. Disponible en <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/457/446>
- Castillo, J; López, A; Santos, J; Araujo, A. 2023. La importancia de la milpa en tiempos de Covid-19 (2004-2020). In Pech, R; Becerril, J (eds.). *Economía de Yucatán: más allá de la pandemia*. Ciudad de México, México, Miguel Ángel Porrúa. 232 p.
- Couoh, J; Castillo, J; Balam, B; Caamal, J. 2022. Biofertilizers for maize production in a milpa system on a Luvisol in Yucatán, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 25(3). DOI: <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.4225>
- Cruz, L. 2018. Análisis y valoración de las prácticas agropecuarias del solar en la comunidad de Kancabdzonot, Yaxcabá, Yucatán. Tesis Lic. Yucatán, México, Universidad Autónoma de Yucatán. 142 p.
- Cuanalo, H; Guerra, R. 2009. La estructura del grupo doméstico y del solar como ecosistemas en una comunidad mayense de Yucatán. X Simposio Internacional. V Congreso Anual de Agricultura Sostenible. s. l., s. p.
- Danso, S; Eskew, D. 2005. Aumento de la capacidad de fijación biológica del nitrógeno (en línea). *Agricultura y Alimentación, Boletín OIEA* 26(2):29-33. Consultado 23 jun. 2023. Disponible en [https://www.iaea.org/sites/default/files/26206882933\\_es.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/26206882933_es.pdf)
- Ebel, R. 2018. Effects of Slash-and-Burn-Farming and Fire-Free Management on a Cambisol in a Traditional Maya Farming System. *Ciencia ergo-sum* 25(2). DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v25n2a5>
- Fonteyne, S; Castillo, J; López, S; Van, J; Espidio, J; Osorio, L; Martínez, F; Odjo, S; Verhulst, N. 2023. Review of agronomic research on the milpa, the traditional polyculture system of Meoamérica. *Frontiers in Agronomy* 5(2023):1-16. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1115490>
- Friedrich, T; Derpsch, R; Kassam, A. 2012. Overview of the Global Spread of Conservation Agriculture. *Field Actions Science Reports* (en línea). Special Issue 6. Consultado 2 nov. 2023. Disponible en <https://journals.openedition.org/factsreports/1941>
- Hernández, E. 1988. La agricultura tradicional en México. *Comercio Exterior* 38(8):673-678.
- INEGI. 2010. Compendio de información geográfica municipal 2010. Yaxcabá, Yucatán, México. s. p.
- Itzá, G. 2024. Efecto de microorganismos de monte y enmiendas en la producción de maíz de temporal en Yucatán, México. Tesis Lic. Yucatán, México, Universidad Autónoma de Yucatán. 88 p.
- Linares, E; Bye, R. 2011. ¡La milpa no es solo maíz! En: Álvarez-Buylla, E; Carreón-García, A; San Vicente-Tello, A. (eds.). *Haciendo milpa. La protección de las semillas y la agricultura campesina*. México, Universidad Nacional Autónoma de México. 91 p.
- Mariaca, R. 2015. La milpa maya yucateca en el siglo XVI: Evidencias etnohistóricas y conjeturas (en línea). *Etnobiología* 13(1):1-25. Consultado 17 jun. 2024. Disponible en <https://revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/71/69>
- Mariaca, R; Hernández, E; Castillo, M; Moguel, O. 1995. Análisis estadístico de una milpa experimental de ocho años de cultivo continuo bajo roza-tumba-quema en Yucatán, México. In Hernández, E; Bello, B; Levy, T (eds.). *La Milpa en Yucatán: Un Sistema de Producción Agrícola Tradicional*. Tomo II. México, Colegio de Postgraduados. p. 339-368.
- Martínez, D; Sánchez, J; Rodríguez, M; Astier, M. 2020. Sustentabilidad de agroecosistemas de milpa en La Trinidad Ixtlán, Oaxaca. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 119(2):1-16. DOI: <https://doi.org/10.24215/16699513e048>

- Moya, X; Caamal, A; Ku, B; Chan, E; Armendáriz, I; Flores, J; Moguel, J; Noh, M; Rosales, M; Xool, J. 2003. La agricultura campesina de los mayas en Yucatán (en línea). LEISA Revista de Agroecología 19(0):7-17. Consultado 23 jun. 2024. Disponible en <https://leisa-al.org/web/revista/volumen-19-numero-0/la-agricultura-campesina-de-los-mayas-en-yucatan/>
- Moya, X; Ku, B. 2001. La milpa (kool) de los mayas yucatecos: cambiando para permanecer (en línea). LEISA Revista de Agroecología 16(3):17-19. Consultado 23 jun. 2024. Disponible en <https://leisa-al.org/web/revista/volumen-16-numero-03/la-milpa-kool-de-los-mayas-yucatecos-cambiando-para-permanecer/>
- Nielsen, R. 2023. Manejo del cultivo para lograr altos rendimientos. In Castellanos, J; Arévalo, J (eds.). Manual de producción de maíz. s. l., Intagri. 437 p.
- Nigh, R; Diemont, S. 2013. The Maya milpa: fire and the legacy of living soil. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11(s1):45-54. DOI: <https://doi.org/10.1890/120344>
- Ortíz, J; Sánchez, O; Ramos, J. 2014. Productive activities and management of the milpa in three communities of the municipality of Jesús Carranza, Veracruz, México (en línea). *Polibotánica* 38(19):173-191. Consultado 17 jun. 2024. Disponible en <https://polibotanica.mx/index.php/polibotanica/article/view/385/251>
- Parsons, D; Ramírez, L; Cherney, J; Ketterings, Q; Blake, R; Nicholson, C. 2009. Managing Maize Production in Shifting Cultivation Milpa Systems in Yucatan, Through Weed Control and Manure Application. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133(1-2):123-134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.05.011>
- Pérez, A. 1981. La agricultura milpera de los mayas de Yucatán. In Varguez, L (ed.). La milpa entre los mayas de Yucatán. México, Universidad de Yucatán. p. 1-28.
- Pool, L. 2001. Dinámica de la milpa en Yucatán. *Ecofronteras* (13):26-28. Consultado 18 mar. 2024. Disponible en <https://revistas.ecosur.mx/ecofronteras/index.php/eco/article/view/434/432>
- Pool, L; Hernández, E. 1995. Bases de la experimentación agrícola bajo roza-tumba- quema: el caso de milpa. In Hernández, E; Bello, B; Levy, S (eds.). La milpa en Yucatán: Un sistema de producción agrícola tradicional. México, Colegio de Postgraduados. p. 313-337.
- Polanco, A; Magaña, T; Cetz, J; Quintal, R. 2019. Use of carcinogenic agrochemicals in the agricultural region Yucatán, México (en línea). *Centro Agrícola* 46(2):72-83. Consultado 18 jun. 2024. Disponible en <http://cagricola.uclv.edu.cu/index.php/es/volumen-46-2019/no-2-abr-jun-2019/1153-uso-de-agroquimicos-cancerigenos-en-la-region-agricola-de-yucatan-mexico>
- Ramírez, J; Ramírez, G; Lozano, M; Arellano, F. 2019. Fertilidad del suelo en una milpa maya de Yucatán, México. *Revista del Centro de Graduados e Investigación. Instituto Tecnológico de Mérida* 34(78):255-259.
- R Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Consultado 17 jun. 2024. Disponible en <https://www.R-project.org/>
- Rodríguez, A; González, P; Flores, J; Nava, R; Dzib, L; Pérez, J; Thüerbeck, N; González, J. 2016. Milpas de las comunidades mayas y dinámica de uso del suelo en la Península de Yucatán. USAID, M-REDD+, The Nature Conservancy, Rainforest Alliance, Woods Hole Research, Espacios Naturales y Desarrollos Sustentables AC. Mérida, Yucatán, México, Centro Regional Universitario Península de Yucatán de la Universidad Autónoma Chapingo. 436 p.
- Salazar, E; Trejo, H; López, J; Vázquez, C; Serrato, J; Orona, I; Flores, J. 2010. Efecto residual de estiércol bovino sobre el rendimiento de maíz forrajero y propiedades del suelo (en línea). *Terra Latinoamericana* 28(4):381-390. Consultado 17 jun. 2024. Disponible en [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792010000400010](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000400010)
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2022. Anuario estadístico de la producción agrícola. Consultado 17 jun. 2024. Disponible en <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Sosa, B; García, Y. 2018. Eficiencia de uso del nitrógeno en maíz fertilizado de forma orgánica y mineral. *Agronomía Mesoamericana* 29(1):207-219. DOI: <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.27127>
- Terán, S; Rasmussen, C. 2009. La milpa de los mayas. 2ª ed. México, Universidad Nacional Autónoma de México. 395 p.
- Trejo, H; Salazar, E; López, J; Vázquez, C. 2013. Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(5):727-738. Consultado 17 jun. 2024. Disponible en [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342013000500006&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342013000500006&script=sci_arttext)
- Triomphe, B. 2011. Productividad en parcelas de maíz. En: Bautista, F; Palacio, J; Delfin, H; Páez, R; Carmona, E; Delgado, M. (eds.). Técnicas de muestro para manejadores de recursos naturales. 2 ed. México, Universidad Nacional Autónoma de México. p. 623-638.
- Uuh, J; Mex, R; Vázquez, K; Segura, M. 2024. Aspectos socio-ecológicos y de producción en la milpa de Tixméhuac, Yucatán. *Bioagrociencias* 17(1):86-96.

- Vázquez, R. 2003. Uso y manejo de estiércoles (en línea). *In* Salazar, E; Fortis, M; Vázquez, A; Vázquez, C (eds.). *Abonos orgánicos y plasticultura*. s. l., Facultad de Agricultura y zootecnia de la UJED. 86-108. Consultado 07 dic. 2023. Disponible en [https://www.smcsmx.org/files/books/abonos\\_org.pdf](https://www.smcsmx.org/files/books/abonos_org.pdf)
- Zayas, I; Leguizamón, C; López, J. 2010. Asociación maíz-Cajanus cajan en un alfiler de Paraguari. Manejos y aporte potencial de nitrógeno, fósforo y potasio. *Investigación Agraria* 12(1):23-28.



Agronomía Costarricense. Universidad de Costa Rica. Se encuentra licenciada con Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para mayor información escribir a [rac.cia@ucr.ac.cr](mailto:rac.cia@ucr.ac.cr)

## CALIDAD POSCOSECHA DEL ÑAME (*Dioscorea alata* L.) EN COSTA RICA: FACTORES QUE AFECTAN DURANTE EL CURADO Y ALMACENAMIENTO DEL TUBÉRCULO

Maricruz Ramírez-Sánchez<sup>1/\*</sup>, Johanny Castro-Chinchilla<sup>2</sup>, Marco Vinicio Sáenz-Murillo<sup>3</sup>,  
Gerardina Umaña-Rojas<sup>4</sup>

**Palabras clave:** tubérculos; poscosecha; estría; moho; pudrición; nematodo.

**Keywords:** tubers; postharvest; striae; mold; rot; nematode.

**Recibido:** 20/05/24

**Aceptado:** 02/07/24

### RESUMEN

**Introducción.** El ñame es un cultivo importante en varias regiones de Costa Rica. A pesar de ello, las pérdidas poscosecha son altas y no están cuantificadas. **Objetivo.** El estudio se realizó para determinar las causas del deterioro de calidad y pérdidas poscosecha en zonas productoras de ñame ubicadas en los cantones localizados en las provincias de Alajuela, Heredia y Limón. **Materiales y métodos.** Se determinó la calidad de los tubérculos en dos momentos del proceso poscosecha: 1) durante la etapa de curado (15 a 30 días a 25-30°C y 85% HR) y 2) al finalizar la simulación de envío a mercado (16°C y 85% HR durante 28 días). En ambas etapas se midieron las siguientes variables de calidad: peso; longitud; número de golpes por tubérculo y número de estrías abiertas o cerradas por

tubérculo; incidencia de moho superficial y de corte, pudrición externa e incidencia de pudrición por nematodos. **Resultados.** Al finalizar el curado, la presencia de estrías abiertas fue importante en algunas zonas (30% incidencia en San Carlos), la presencia de mohos superficiales y en corte de cosecha (hasta 21% incidencia de ambos factores en Upala), los daños por nematodos (35 % incidencia en Pococí), aunado a variaciones de tamaño (largo, ancho y peso) fueron factores importantes de pérdidas. Concluida la simulación de transporte, la presencia de daños por nematodos (hasta 35% incidencia), presencia de moho superficial (15% incidencia) y en el corte de cosecha (hasta 49% incidencia), y pudriciones externas (hasta 5% incidencia) fueron causas relevantes de pérdidas. **Conclusión.** Los resultados apuntan hacia la necesidad de hacer en las zonas de estudio, una revisión integral de

\* Autora para correspondencia. Correo electrónico: maricruz.ramirezsanchez@ucr.ac.cr

1 Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.  
 0000-0002-8933-7931.

2 Plant Pathology Laboratory, Fruit Research and Extension Center, Penn State University, Pennsylvania, USA.  
 0000-0003-4866-3295.

3 Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.

 0000-0001-6718-0622.

4 Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.

 0000-0002-6368-5225.

las prácticas de cultivo y poscosecha con el fin de reducir los factores causantes de los defectos de calidad identificados.

## ABSTRACT

### Postharvest quality of yam (*Dioscorea alata* L.) in Costa Rica: Factors that affect during curing and tuber storage. Introduction.

The yam is an important crop in several regions of Costa Rica. However, postharvest losses are high and not quantified. **Objective.** This study was conducted to determine the causes of quality deterioration and postharvest losses in yam-producing areas located in the provinces of Alajuela, Heredia, and Limón. **Materials and methods.** The quality of the tubers was determined at two postharvest stages: 1) during the curing stage (15 to 30 days at 25-30°C and 85% RH) and 2) at the end of the market shipping simulation (16°C and 85% RH for 28 days). The

following quality variables were measured in both stages: weight, length, number of impacts per tuber, number of open or closed striae per tuber, incidence of surface and cut mold, external rot, and incidence of nematode rot. **Results.** At the end of curing, the presence of open striae was significant in some areas (30% incidence in San Carlos), the presence of surface and cutting mold at harvest (up to 21% incidence of both factors in Upala), nematode damage (35% incidence in Pococi), along with size variations (length, width, and weight) were important factors contributing to losses. At the end of the transportation simulation, the presence of nematode damage (up to 35% incidence), surface mold (15% incidence), cutting mold (up to 49% incidence), and external rot (up to 5% incidence) were significant causes of losses. **Conclusion.** The results suggest that in the region of the study, a comprehensive review of cultivation and postharvest practices is necessary in order to reduce the factors causing the identified quality defects.

## INTRODUCCIÓN

Las raíces y tubérculos (incluido el ñame), son alimentos básicos en la dieta humana para millones de personas en África, Asia y América (FAO 2020a). Los principales países productores de ñame son Nigeria, Ghana, Costa de Marfil, Benín y Etiopía (FAO 2020b). En el 2018, en Etiopía y Ghana se tuvieron rendimientos de 29,9 y 17,5 ton ha<sup>-1</sup>, respectivamente, mientras que Costa Rica reportó 15 ton ha<sup>-1</sup> (FAO 2020b). En el 2019 el ñame fue el segundo producto de mayor exportación de Costa Rica (PROCOMER 2020). Los principales destinos para el período comprendido entre 2014 y 2019 fueron Estados Unidos, Puerto Rico, otras islas del Caribe y la Unión Europea, con un promedio anual de ingresos por exportaciones de US\$ 9,8 millones (PROCOMER 2020).

Las prácticas agronómicas y el manejo del cultivo del ñame en el campo, repercuten en la calidad final de los productos. Por ejemplo,

Castellanos *et al.* (2018) usaron el tutorado con espaldera simple y lograron mayor cantidad de tubérculos comerciables en comparación con un tutor por planta y una espaldera doble. Estos autores mencionan que se produce mayor cantidad de tubérculos comerciables con una densidad de siembra baja (14 285 plantas ha<sup>-1</sup>). Asimismo, Suja y Sreekumar (2014) al evaluar tres variedades bajo manejo convencional, tradicional y orgánico encontraron que bajo un manejo orgánico se obtuvo un mayor rendimiento (ton ha<sup>-1</sup>), pero sin diferencias en la calidad de los tubérculos en cuanto a materia seca, almidón, proteína, azúcares, azúcares reductores y fenoles en comparación con los otros dos sistemas.

En Brasil, Bertino *et al.* (2022) establecieron que el tutorado y una dosis de 120,7 kg ha<sup>-1</sup> de N promueven una productividad máxima, mientras que en África del Oeste Pouya *et al.* (2022) encontraron influencia en el rendimiento por la cantidad y distribución de lluvia, así como

el contenido de carbono en el suelo. Por otra parte, los resultados de Okongor *et al.* (2021) demostraron que la radiación solar es un predictor significativo de la producción de ñame, y sugieren que otros factores no climáticos tuvieron mayor influencia.

Por otro lado, el manejo poscosecha del ñame varía dependiendo de la tecnología disponible en el país productor y su mercado destino (tanto local como de exportación) (Lebot 2009). En Costa Rica, dicho manejo consiste comúnmente en los siguientes procesos: 1) lavado con agua a presión, 2) preselección manual, 3) secado mediante aire caliente, 4) etapa de curado, y 5) selección manual del producto de exportación y empaque. Según Okigbo (2003), las principales causas de deterioro poscosecha en este cultivo, son la pérdida de peso por deshidratación, brotación y el desarrollo de mohos o pudriciones provocadas por hongos, bacterias y nematodos, cuyas pérdidas pueden alcanzar entre 10% a 25%, las cuales se agravan cuando se producen heridas durante el manejo poscosecha (Aboagye-Nuamah *et al.* 2005). En adición a lo anterior, los procesos de oxidación en el tejido resultan de las heridas y la alta temperatura, o durante el empaque y el almacenamiento. Todos estos problemas se dan de manera más intensa cerca del daño o del corte, con un gradiente de desarrollo hacia la parte interna del tubérculo (Coelho Júnior *et al.* 2018).

A nivel mundial se han aislado patógenos que afectan el tubérculo de ñame tanto en campo como en su etapa poscosecha, entre ellos los hongos: *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp., *Cladosporium* spp., *Fusarium* spp., *Rhizopus* spp., *Curvularia* spp., *Rosellinia* sp., *Sphaerostilbe* sp., *Pestalotia* sp., *Choanephora* sp., *Lasiodiplodia theobromae*, *Amillaria mellea*, *Geotrichum candidum*, *Hendersonula toruloides*, *Macrophomina phaseolina*, *Mucor circinelloides*, *Fusarium equiseti*, *Aspergillus niger*, y *Colletotrichum alatae*; así como las bacterias: *Erwinia* spp. y *Serratia* sp. (Okigbo y Ikediugwu 2000, Amusa *et al.* 2003, Okigbo 2005, Okigbo y Ogonnaya 2006, Okigbo y Emeka 2010,

Sánchez-López *et al.* 2021, Ntui *et al.* 2021). En Costa Rica, López (2008) encontró la presencia de *Aspergillus* spp. y *Penicillium* spp. como hongos que atacan el tubérculo en poscosecha, mientras que Humphreys-Pereira *et al.* (2017) describieron al nematodo *Scutellonema bradys* como causante del síntoma de pudrición seca.

No obstante lo anterior y en consideración a la importancia de este cultivo en la economía local (Izquierdo 2023), en Costa Rica no se encuentra información actualizada sobre el impacto que tienen las prácticas agrícolas y de manejo poscosecha sobre la calidad final del ñame, por lo que el objetivo de este estudio fue caracterizar la calidad poscosecha y la cuantificación de los principales patógenos asociados al deterioro durante el curado y almacenamiento del tubérculo de ñame del trópico húmedo de Costa Rica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitios de estudio y material vegetal

El presente estudio, se realizó con tubérculos de ñame de la variedad “Diamantes 22” destinados para exportación. Las evaluaciones se hicieron en planta empacadora durante dos años (junio 2016-junio 2018). El material vegetal se cosechó en las zonas productoras de San Carlos, Los Chiles, Upala, Guatuso y San Ramón de la provincia de Alajuela, en Sarapiquí de la provincia de Heredia y en Pococí de la provincia de Limón. En Pococí se muestrearon cinco fincas. De acuerdo con la escala de zonas de vida de Holdridge (1982), Los Chiles, Upala y Pococí se ubican dentro del Bosque Húmedo Tropical, Sarapiquí en Bosque muy Húmedo Tropical, San Ramón en Bosque muy Húmedo Premontano, Guatuso en Bosque muy Húmedo Premontano Transición a Basal y San Carlos en Bosque Húmedo Tropical Transición a Perhúmedo. La altitud, y los promedios de temperatura y precipitación durante el estudio se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características morfológicas y climáticas de las zonas productoras de ñame en Costa Rica muestreadas durante junio 2016-junio 2018.

Zona	2016				2017				2018				
	Altitud (m)	Temperatura (°C)	DE*	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	DE*	Precipitación (mm)	DE*	Temperatura (°C)	DE*	Precipitación (mm)	DE*	
San Carlos	170,0	24,7	0,9	306,6	170,0	24,7	0,7	358,2	175,1	24,3	0,7	372,2	210,8
Los Chiles	40,0	25,7	1,0	176,1	124,3	25,6	0,8	193,2	137,7	25,0	0,7	215,2	134,9
Upala	43,0	26,0	1,1	188,8	157,2	25,7	0,8	242,8	148,5	25,3	0,8	236,2	131,7
Guatuso	250,0	25,6	0,8	324,1	70,8	25,3	0,5	344,9	211,1	25,4	0,7	291,0	188,3
San Ramón	292,0	22,2	0,9	115,9	91,0	21,7	0,6	175,4	146,4	21,7	0,5	89,5	74,6
Sarapiquí	178,0	25,6	0,8	257,3	153,6	25,5	0,8	260,9	135,8	24,8	0,8	377,1	278,8
Pococí	262,0	24,8	1,2	304,8	157,9	25,7	0,9	274,8	150,2	24,6	0,8	341,8	176,1

\*DE: Desviación estándar.

Se determinó la calidad de los tubérculos en dos momentos específicos del proceso poscosecha: 1) durante la etapa de curado, que corresponde al periodo de almacenamiento en planta empacadora por varios días para cicatrización previo a la selección y empaque, y 2) durante la simulación de envío a mercado (almacenamiento en frío). Las evaluaciones de ambos momentos se realizaron en periodos diferentes del año, por lo que corresponden a evaluaciones separadas. La cantidad de muestreos en los dos momentos se describen en la Tabla 2. En los ensayos de simulación de envío a mercado se evaluaron las mismas muestras en dos momentos: 1) recién empacadas y 2) posterior al periodo de almacenamiento. El almacenamiento simuló las condiciones y tiempo de envío a mercados internacionales al mantenerse en cámaras de refrigeración a una temperatura de 16°C con aproximadamente 85-90% HR durante 28 días, en el Laboratorio de Tecnología Poscosecha del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (LTP-CIA-UCR).

Tabla 2. Número de muestreos de tubérculos de ñame realizados en zonas productoras de Costa Rica durante el proceso de curado y almacenamiento.

Zona	Etapa curado	Etapa simulación de envío
San Carlos	1	1
Los Chiles	2	-
Upala	2	-
Guatuso	2	1
San Ramón	1	-
Sarapiquí	2	-
Pococí	7	5

### Evaluaciones durante etapa de curado

Se evaluaron un total de 50 tubérculos seleccionados al azar durante la etapa de curado (15 a 30 días a 25-30°C y 85% HR) en 17 lotes provenientes de las siete zonas de producción antes mencionadas (n=850). Se les midieron las siguientes variables de calidad: peso; longitud; número de golpes por tubérculo (descascarado en la superficie) y número de estrías abiertas

o cerradas por tubérculo; incidencia de moho superficial y de corte, pudrición externa e incidencia de pudrición por nematodos.

El número de lotes muestreados por región fue diferente debido a que algunas de las empacadoras visitadas procesan un volumen mayor de tubérculos durante el año y también reciben ñames de diversos productores, lo que facilitó el muestreo de una mayor cantidad de lotes. Por lo tanto, para las variables de calidad en las que se reporta incidencia, esta se basó en el total de ñames evaluados para cada una de las regiones productoras.

A continuación se detallan cada una de las variables de calidad y los métodos correspondientes:

**Peso del tubérculo (g):** Se determinó con una balanza digital (OHAUS ARC120, Parsippany, New Jersey, USA) con precisión de  $\pm 0,1$  g.

**Longitud del tubérculo (cm):** Se midió con regla graduada de 1 m desde la base del corte hasta el extremo distal.

**Daños mecánicos:** Se examinaron los tubérculos en busca de estrías abiertas, estrías cerradas y número de golpes por tubérculo. Como estría abierta se definió aquella grieta o estría no cicatrizada que por su conformación facilita la entrada de microorganismos, y como estría cerrada aquellas grietas cicatrizadas. Los golpes se definieron como los puntos de descascarado, consecuencia de la manipulación del tubérculo durante la cosecha, transporte y procesamiento poscosecha en la empacadora.

**Deformaciones:** Los tubérculos fueron examinados y se seleccionaron dentro de esta categoría aquellos que dificultan el empaque de estos en una caja de exportación debido a malformaciones. Se utilizó este criterio subjetivo debido a que las empacadoras visitadas no contaban con normas específicas para definir este parámetro de calidad.

**Hongos:** Se identificó la aparición de moho superficial y presente luego de un corte en el tubérculo (crecimiento de micelio y/o esporulación, sin necrosis evidente) así como pudrición

(necrosis evidente). Se contabilizó el número de tubérculos con desarrollo de micelio en el corte o superficie para todos los muestreos con el fin de obtener el porcentaje de incidencia.

**Nematodos:** Se identificaron daños externos y/o internos, en adición a pudrición interna que se asociaron con la presencia de nematodos. Para ello, se realizó un corte longitudinal y se determinó el número de ñames con pudrición interna o pudrición por nematodos, denominada por los productores como “carbón” la cual consistió en una pudrición seca de color oscuro. Se corroboró el nematodo como agente causal mediante análisis de estos tubérculos en el Laboratorio de Nematología del Centro de Investigación en Protección de Cultivos de la Universidad de Costa Rica (LN-CIPROC-UCR). Por último, se determinó la incidencia de estos daños como porcentaje, con base en conteos del número de ñames afectados en cada lote evaluado. Además de corroborarse la presencia de los nematodos, en el LN-CIPROC-UCR se realizaron extracciones de los nematodos a partir del tejido afectado, se identificó la especie presente y los resultados se reportan como el número de individuos por cada 100 g de tejido.

### Experimentos de simulación de envío a mercado

Para este ensayo se obtuvieron muestras de siete fincas productoras de ñame, ubicadas en tres regiones: Pococí (cinco fincas), Guatuso y San Carlos. En cada una de las cuatro plantas empacadoras tomadas como referencia se seleccionaron de forma aleatoria cinco cajas de tubérculos de aproximadamente 23 kg, empacados y listos para exportación. Se les determinaron las mismas variables mencionadas para la etapa de curado. También, se realizaron evaluaciones destructivas de calidad interna a cinco ñames por caja seleccionados al azar.

Posteriormente, los tubérculos fueron almacenados en cámaras de enfriamiento a 16°C durante 28 días, en el LTP-CIA-UCR. Al finalizar el tiempo de simulación de envío a mercado, se seleccionaron cinco tubérculos por caja, los

cuales fueron etiquetados y pesados antes del inicio del almacenamiento a 16°C para determinar el porcentaje de pérdida de peso.

En adición a lo anterior, se evaluó: la incidencia de moho sobre la superficie y sobre el corte, y la incidencia de pudrición externa en cada tubérculo evaluado. Se realizó un corte longitudinal para estimar la incidencia de síntomas internos por nematodos, pudriciones u otros defectos de calidad presentes en la pulpa. En los ñames que presentaron síntomas se tomaron segmentos de dos mm de la zona de avance para ser cultivados *in vitro* en un medio de cultivo papa dextrosa agar (PDA) acidificado. Una vez que se obtuvo crecimiento de microorganismos, se procedió con la identificación morfológica y molecular a nivel de género o especie. La identificación morfológica de los hongos se realizó en el Laboratorio de Tecnología Poscosecha del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (LTP-CIA-UCR). Para identificación molecular se analizaron las secuencias de ADN de las regiones de los espaciadores internos transcritos ITS1 e ITS2 en el Laboratorio de Técnicas Moleculares del Centro de Investigaciones en Protección de Cultivos de la Universidad de Costa Rica (LTM-CIPROC-UCR).

Para corroborar la presencia de nematodos, se colectaron 20 muestras con evidencia del síntoma de pudrición seca. La identificación y cuantificación se hizo en el Laboratorio de Nematología del Centro de Investigaciones en Protección de Cultivos de la Universidad de Costa Rica (LN-CIPROC-UCR).

### Análisis de datos

Debido a la variabilidad de las muestras obtenidas, los datos se analizaron mediante técnicas de estadística descriptiva. Para ello se utilizó el paquete “Agricolae” del programa estadístico R Studio (R v. 4.0.4, 2021-02-15) “Lost Library Book” (R StudioTeam 2015).

## RESULTADOS

### Defectos de calidad y enfermedades identificadas en los tubérculos de ñame

Al observar las muestras procedentes de las zonas de producción, se encontró diversidad en daños y defectos en los tubérculos. Los más comunes son los daños producto de los golpes (daño mecánico) que resultan en un descascarado (Figura 1A). También se encontraron daños en forma de estrías abiertas (Figura 1B) y cerradas o cicatrizadas (Figura 1C), las cuales se asocian a un déficit hídrico durante la formación del tubérculo u otro tipo de daño mecánico. No había un criterio uniforme entre empacadoras con respecto al ñame deformado, por lo que se definió como aquel que presentaba una malformación severa, la cual dificulta su acomodo en un empaque comercial (Figura 1D).

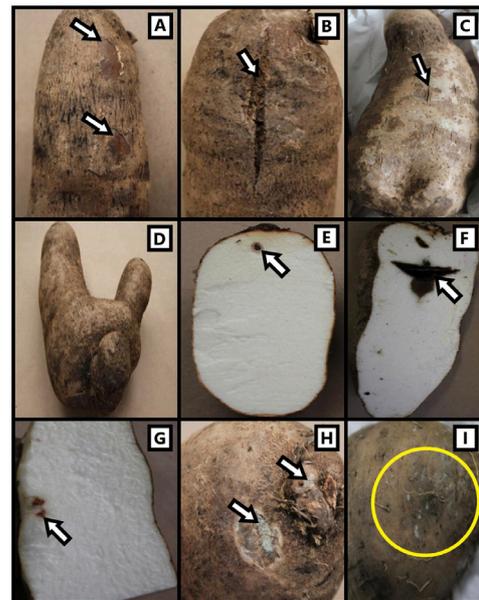


Figura 1. Principales defectos de calidad en ñames de la variedad Diamantes-22 procedentes de siete zonas de Costa Rica. A: Descascarado; B: Estría abierta; C: Estría cicatrizada; D: Deformación; E: Galería leve; F: Galería severa; G: Pudrición interna; H: Moho en corte; I: Moho superficial.

En adición a los daños externos mecánicos o fisiológicos del ñame, se evaluaron los daños internos. En ese sentido, las Figuras 1E y 1F muestran un síntoma leve y uno severo que se denominaron galerías internas. No se asoció la presencia de algún patógeno con los síntomas galería leve y galería severa, las cuales consistieron en galerías cicatrizadas en la pulpa de los tubérculos, sin la presencia de síntomas externos.

En la Figura 1G se muestra un avance de una lesión inolora y localizada que podría haberse originado durante la formación del ñame, conocida como pudrición interna, que inicia desde afuera hacia el interior de la pulpa. También se encontraron muestras de ñame con síntomas asociados al crecimiento de moho en el corte (Figura 1H) y del crecimiento de moho en la superficie del tubérculo (Figura 1I).

Por otro lado, se evaluaron los daños asociados con el desarrollo de patógenos. En la Figura 2 se presentan los aislamientos recuperados a partir de las pudriciones internas de los tubérculos, los cuales no mostraron algún microorganismo predominante que causara los daños observados. De los aislamientos realizados *in vitro*, únicamente *Penicillium* sp. tuvo una frecuencia del 53%, mientras que el resto presentaron frecuencias entre 2% y 10%. También se corroboró la presencia del nematodo *Scutellonema bradys* en ñames con pudrición seca interna, o “carbón” (Figura 3). El síntoma inicial consiste en áreas de

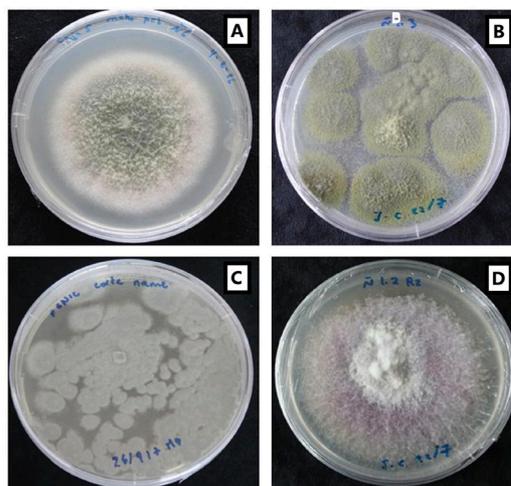


Figura 2. Colonias de microorganismos obtenidas de pudriciones internas de los tubérculos de ñame variedad Diamantes-22 procedentes de siete zonas de Costa Rica, empleadas para la identificación de los hongos *Talaromyces amestolkiae* (A); *Talaromyces pinophilus* (B); *Penicillium* sp. (C); *Fusarium oxysporum* (D).

color amarillento que posteriormente se tornan café claro a café oscuro y finalmente adquieren la característica coloración negra. Usualmente la pudrición profundiza hasta dos cm hacia el interior del tubérculo. Sin embargo, en síntomas con mayor grado de severidad se reporta que la profundidad puede ser mayor.

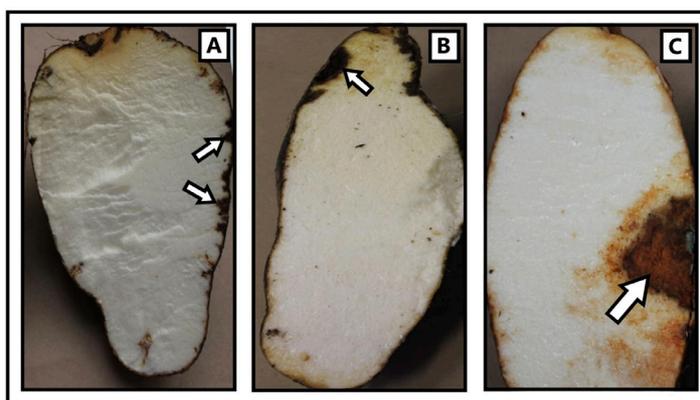


Figura 3. Síntomas leve (A), intermedio (B) y severo (C) del daño conocido como “carbón” ocasionado por *Scutellonema bradys* en tubérculos de ñame Diamantes-22 procedentes de siete zonas de Costa Rica.

En el total de muestras procesadas ( $n=20$ ), se encontró presencia de *S. bradys* en un promedio de 131023 nematodos en 100 g de tejido, con un máximo de 533200 y un mínimo de 210 nematodos en 100 g de tejido.

### Evaluaciones de calidad durante la etapa de curado

**Peso:** De forma general, los tubérculos muestreados durante la etapa de curado presentaron un peso promedio entre los 600-800 gramos (Figura 4), donde los valores menores de peso se obtuvieron en las muestras tomadas del cantón de San Ramón (550 g) y las muestras con mayor peso promedio (850 g) se reportaron en las procedentes del cantón de Pococí (Figura 4).

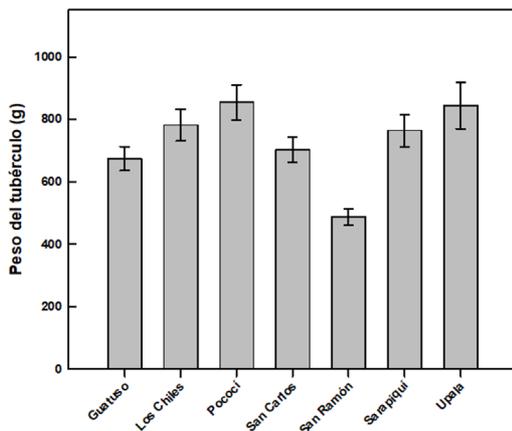


Figura 4. Peso promedio de ñames provenientes de zonas productoras de Costa Rica colectados durante la etapa de curado (junio 2016-junio 2018). Barras de error como error estándar.

**Longitud:** Los valores promedio obtenidos presentaron un rango de 14-22 cm (Figura 5). En las zonas de Sarapiquí y Pococí, las cuales se encuentran más cercanas al Caribe de Costa Rica, se cosecharon los ñames con mayor longitud (20-22 cm) (Figura 5).

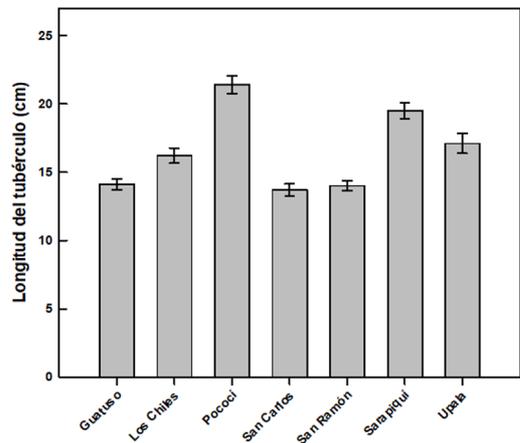


Figura 5. Longitud promedio de ñames provenientes de zonas productoras de Costa Rica colectados durante la etapa de curado (junio 2016-junio 2018). Barras de error como error estándar.

**Golpes:** Los ñames evaluados en la etapa de curado presentaron un promedio de uno a cinco golpes, representados como descascarado (datos no mostrados). Los originarios del cantón de San Carlos presentaron entre uno a dos golpes por ñame, lo que evidencia un menor daño mecánico en los procesos de cosecha y poscosecha. El porcentaje de ñames deformados se mantuvo entre 3% y 8%, con excepción de los del cantón de Guatuso, donde se obtuvo un 14% (datos no mostrados).

**Daños causados por hongos y nemátodos:** Estas variables se resumen en la Tabla 3, donde se destacan las diferencias entre zonas con respecto a la incidencia de estría abierta o estría cerrada. Sobresalen los ñames del cantón de San Carlos por la incidencia más alta de estría abierta con un 30%. En las variables de moho superficial y de corte, los ñames procedentes del cantón de Upala presentaron las mayores incidencias, con valores mayores a 20%. Llama la atención que los ñames cosechados en las fincas ubicadas en los cantones de Guatuso y San Carlos no presentaron síntomas de mohos (Tabla 3). Por otro lado, los ñames con mayor presencia de pudrición externa fueron obtenidos en el cantón Upala (7% de incidencia), seguido de los ñames aportados por las fincas del cantón San Ramón (4% de incidencia).

Tabla 3. Incidencia de estrías, moho, pudriciones y daño externo por nematodos en tubérculos de ñame muestreados al finalizar etapa de curado, provenientes de zonas productoras de Costa Rica (junio 2016-junio 2018).

Zona	Estría abierta	Moho superficial	Moho corte	Pudrición externa	Daño externo por nematodos
	Incidencia (%)				
Guatuso	3	0	0	2	0
Los Chiles	12	5	5	1	0
Pococí	6	1	10	1	3
San Carlos	30	0	0	0	2
San Ramón	2	6	6	4	2
Sarapiquí	7	3	3	2	3
Upala	9	21	21	7	0

En cuanto a la incidencia de daño externo por nematodos, se registraron valores muy bajos de incidencia (<3%) en los tubérculos cultivados en los cantones de San Carlos, San Ramón y Pococí, mientras que en los de los cantones de Guatuso, Los Chiles y Upala no presentaron síntomas durante la etapa de curado (Tabla 3).

#### Ensayos de simulación de envío a mercado

**Peso:** Los valores promedio de los pesos obtenidos en los productos seleccionados previo a su envío para exportación variaron entre 724-1044 gramos (Figura 6). Se observó una gran diversidad en los pesos de los ñames provenientes del cantón de Pococí, en los que sobresalen por el mayor peso los cosechados de las fincas 2 y 4 de Pococí, con valores promedio respectivos de 984,3 y 1044,2 g, respectivamente, mientras que en la finca 3 del mismo cantón se obtuvo un promedio de 724,3 g (Figura 6).

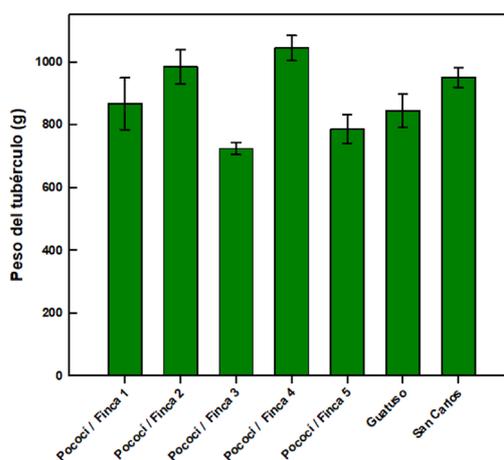


Figura 6. Peso promedio de ñames provenientes de zonas productoras de Costa Rica previo a simulación de envío (junio 2016-junio 2018). Barras de error como error estándar.

**Longitud:** Los ñames muestreados previo al envío a mercado presentaron una variación entre 18,8 y 27,0 cm de longitud (Figura 7), lo cual sugiere una selección relativamente uniforme en las plantas empacadoras. Los ñames que presentaron los mayores valores de longitud se obtuvieron del cantón de San Carlos con un promedio de 27,0 cm, mientras que los de menor longitud (18,8 cm en promedio) provenían del cantón de Guatuso.

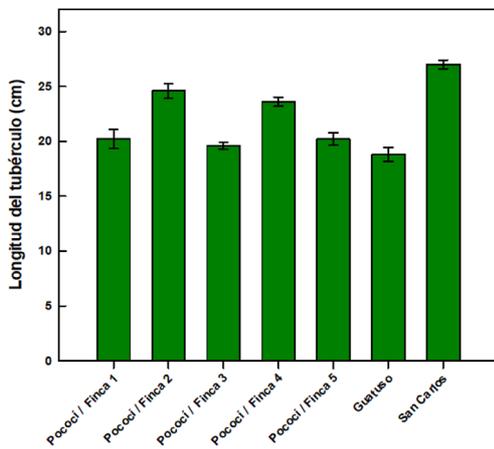


Figura 7. Largo promedio de ñames provenientes de zonas productoras de Costa Rica previo a la simulación de envío a mercado (junio 2016-junio 2018). Barras de error como error estándar.

**Daño mecánico:** En la etapa previa al envío a mercado, los tubérculos evaluados presentaron de 1 a 4 golpes entre las zonas evaluadas (Figura 8). De forma similar a lo visto en la variable peso (Figura 6), se observó una gran variabilidad en la cantidad de golpes (descascarado) en los ñames de las fincas que provenían del cantón Pococi.

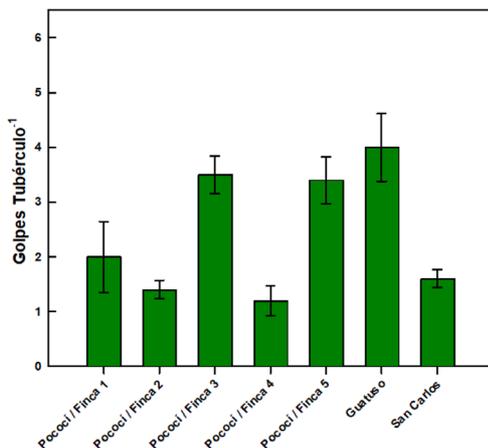


Figura 8. Promedio de golpes previo a simulación de envío, en ñames provenientes de zonas productoras de Costa Rica (junio 2016-junio 2018). Barras de error como error estándar.

### Daño causado por hongos y nemátodos:

En la Tabla 4 se muestran los valores de incidencia de moho superficial, moho en el corte y pudrición externa en ñames recién empacados y en la evaluación realizada al finalizar la simulación de envío de 28 días a 16°C. Se apreció que, en el ñame recién empacado de la mayoría de las fincas del cantón de Pococi, se evidenciaba el crecimiento de moho en el corte y en algunos casos, moho superficial y pudriciones, lo cual muestra la necesidad de mejorar el proceso de selección previo al empaque para garantizar una menor presión del inóculo. El moho normalmente se desarrolla durante el transporte e incrementa la incidencia de este defecto de calidad, como lo indican los datos registrados luego de 28 días de almacenamiento a 16°C y 85-90% HR con incidencias entre 26,1% y 49,6% (Tabla 4). También se advirtió un incremento en la incidencia de moho sobre la superficie de los tubérculos al finalizar el almacenamiento, donde únicamente en la finca 5 del cantón de Pococi y la del cantón de Guatuso no se presentó este defecto, mientras que en las demás fincas y regiones se obtuvieron valores entre 4,3% y 15,2%. Se encontró una mayor incidencia de pudriciones al finalizar el almacenamiento en comparación con los ñames recién empacados, alcanzándose como máximo un 4,7% en las fincas 3 y 4 del cantón Pococi.

Tabla 4. Incidencia de moho y pudrición en tubérculos de ñame recién empacados y luego de 28 días de almacenamiento a 16°C y 85-90% HR, provenientes de zonas productoras de Costa Rica (junio 2016-junio 2018).

Zona/Finca	Tubérculos recién empacados			Tubérculos 28 días después		
	Incidencia (%)					
	Moho superficial	Moho corte	Pudrición externa	Moho superficial	Moho corte	Pudrición externa
Pococi/ Finca 1	10,0	10,0	0,0	15,2	49,6	3,0
Pococi/ Finca 2	0,0	22,2	0,0	5,3	18,4	2,6
Pococi/ Finca 3	0,0	3,1	1,6	14,1	42,2	4,7
Pococi/ Finca 4	0,0	0,0	3,2	14,1	42,2	4,7
Pococi/ Finca 5	0,0	8,5	0,0	0,0	29,8	0,0
Guatuso	0,0	0,0	0,0	0,0	43,5	2,2
San Carlos	1,1	0,0	2,1	4,3	26,1	0,0

La incidencia de nematodos, galerías y pudriciones internas observadas en diferentes lotes de ñame recién empacados y luego del almacenamiento se detalla en la Tabla 5. Los nematodos se presentaron en los ñames provenientes de fincas del cantón Pococi. No se asoció la presencia de algún patógeno con los síntomas

conocidos como galería leve y galería severa (síntoma descrito en la Figura 1). Los ñames originarios del cantón San Carlos no presentaron incidencia de galerías leves ni severas. Por otro lado, la pudrición interna presentó una incidencia entre 1,8% y 19,4% luego de 28 días de almacenamiento (Tabla 5).

Tabla 5. Incidencia de nematodos, galerías y pudriciones internas en tubérculos de ñame recién empacados y luego de 28 días de almacenamiento a 16°C y 85-90% HR, provenientes de zonas productoras de Costa Rica (junio 2016-junio 2018).

Zona/Agricultor	Tubérculos recién empacados				Tubérculos 28 días después			
	Incidencia (%)							
	Nem*	GL*	GS*	P*	Nem*	GL*	GS*	P*
Pococi/ Finca 1	35,0	0,0	0,0	10,0	14,3	20,5	22,3	1,8
Pococi/ Finca 2	16,7	4,2	8,3	8,3	14,0	7,0	15,8	15,8
Pococi/ Finca 3	13,3	13,3	0,0	0,0	5,1	19,0	7,6	5,1
Pococi/ Finca 4	13,3	13,3	13,3	6,7	16,1	16,1	3,2	19,4
Pococi/ Finca 5	12,0	12,0	0,0	0,0	15,1	9,6	1,4	4,1
Guatuso	0,0	20,0	0,0	16,0	0,0	6,2	0,0	13,8
San Carlos	0,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	16,0

\*Nem= nematodos; GL= galería leve; GS= galería severa; P= pudrición interna.

**Pérdida de peso:** La pérdida de peso en el tubérculo posterior a 28 días de almacenamiento osciló entre 1% y 4,8% entre los lotes muestreados (Figura 9). Hubo diferencias de hasta un 3% en los muestreos de las fincas del cantón Pococí, lo que sugiere que los ñames presentaron problemas de calidad que incidieron en un aumento de la pérdida de peso. Los tubérculos provenientes del cantón San Carlos registraron un bajo porcentaje de pérdida de peso (Figura 9).

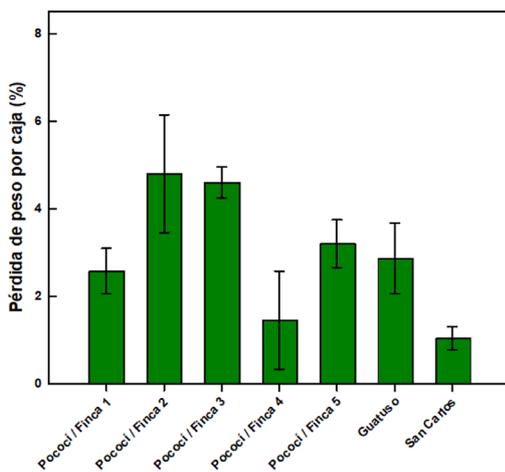


Figura 9. Porcentaje promedio de pérdida de peso en ñames provenientes de zonas productoras de Costa Rica almacenados durante 28 días a 16°C y 85-90% HR (junio 2016-junio 2018). Barras de error como error estándar.

## DISCUSIÓN

### Situación actual del manejo poscosecha del ñame en Costa Rica

El cultivo del ñame resulta de suma importancia en las economías locales de Costa Rica, donde no solamente representa una fuerte actividad económica, sino que también contribuye a la generación de empleo rural y en las plantas empacadoras; además, aporta a la visibilidad de los productos agrícolas costarricenses en los

mercados internacionales. La competitividad de los productos agrícolas en los mercados tanto nacionales como internacionales se puede ver comprometida por los defectos de calidad, en especial si estos no se manejan correctamente durante los procesos de cosecha y poscosecha.

Uno de los principales motivos por los que se hizo este estudio fue la necesidad de subsanar la falta de información actualizada, tanto científica como técnica sobre manejo y tecnología poscosecha en el cultivo del ñame en Costa Rica, la cual es fundamental para una mejora continua de la agroindustria del producto y sus repercusiones económicas.

En este estudio se identificaron diferencias de calidad entre los lotes de ñames muestreados de algunas de las zonas productoras del país, lo que demuestra que los agricultores realizan diferentes prácticas culturales en sus plantaciones y estas inciden en la calidad de los tubérculos al llegar a la planta empacadora. Los resultados obtenidos pretenden actualizar el estado del conocimiento sobre calidad poscosecha del ñame y puntualizar los factores principales a considerar, similar a lo reportado 23 años atrás para otras raíces y tubérculos producidos en Costa Rica (Segura *et al.* 2003).

### Factores principales de calidad poscosecha del ñame en las regiones productoras de Costa Rica

Los resultados mostraron que los principales defectos de calidad en ñames para exportación fueron las estrías abiertas. Dichas estrías, son heridas sobre la superficie del tubérculo que son consecuencia de: 1) daños físicos durante la cosecha, 2) manipulación durante el procesamiento en la empacadora, 3) estrés hídrico durante el periodo de crecimiento. El problema de las estrías en el tubérculo es que se convierten en un sitio de ingreso para diversos microorganismos, principalmente hongos asociados al desarrollo de mohos y pudriciones.

De acuerdo con las observaciones realizadas durante los muestreos, las estrías cerradas se derivan de posibles heridas durante el

crecimiento del tubérculo que cicatrizan adecuadamente previo a la cosecha de este, con lo cual se reduce el riesgo de ingreso de patógenos en la fase poscosecha. Esto se observó principalmente en tubérculos que se cosecharon en el cantón San Carlos, en donde posiblemente las condiciones de suelo y clima también incidieron negativamente en el desarrollo de los ñames. El efecto de las condiciones hídricas fue demostrado por González-Vélez (2011) quien obtuvo un mayor rendimiento y número de tubérculos con características de calidad deseables para la venta con la aplicación de riego a capacidad de campo, comparado con el cultivo bajo condiciones de lluvia o de sequía.

El descascarado (encontrado en un alto porcentaje de incidencia), es también un problema de calidad relacionado con un daño mecánico en el producto durante el proceso de cosecha y poscosecha. El ñame posee una cáscara relativamente delgada, lo que permite que los golpes recibidos durante el manejo en empaque y el transporte incrementen el descascarado (Segura *et al.* 2003).

Por otro lado, las malformaciones son un defecto de calidad que no es causado por factores bióticos ni por daño mecánico externo. Estas se pueden dar durante la formación del tubérculo por condiciones de suelo y clima, principalmente. En ese sentido, el ñame responde de manera diferenciada a las condiciones iniciales de suelo (Akanji *et al.* 2018), a la fertilización (Cornet *et al.* 2022) y el clima (Wickham 2019). Por lo anterior, con un adecuado proceso de preselección tanto en campo como al llegar a la planta empacadora, no deberían encontrarse ñames que presentaran este problema de calidad en el proceso de curado, y por ende no deberían llegar hasta la etapa de empaque para exportación, evitando una pérdida económica poscosecha producto de una mala preselección.

Se obtuvo un rango amplio en el peso y tamaño de los ñames seleccionados en las plantas empacadoras con calidad de exportación y aunque mucho depende de la calidad requerida por el cliente final, la uniformidad de la calidad

también debe estar ligada a las normas alimentarias. Los mercados continuarán elevando las exigencias de calidad y la competitividad con otros mercados se incrementará. La norma CODEX para ñame (CXS 234-2020) establece las categorías y tolerancias de calidad para mercados internacionales (FAO 2020c). Sin embargo, este estudio no se realizó para comparar con dicha norma, y los datos generados son una guía general para los productores nacionales con respecto a los aspectos más críticos de calidad del ñame que deben ser mejorados para incrementar la competitividad a nivel internacional.

Los daños asociados a patógenos como moho superficial, moho en los cortes y pudrición mostraron altos porcentajes de incidencia. Estos problemas pueden ser causados por inóculo existente en la cáscara que no se remueve en el lavado del producto en la planta empacadora. Además, se pueden presentar enfermedades oportunistas en las heridas ocasionadas por daños mecánicos en campo y en poscosecha. También podría incidir el inóculo remanente en las instalaciones de la empacadora que alcanza la superficie del ñame durante el curado y si encuentra heridas abiertas, existe una alta probabilidad del desarrollo de moho o pudriciones.

Dentro de los organismos que se identificaron en los tubérculos, *Penicillium* sp. fue el de frecuencia más alta en todos los muestreos. Esto indica que es uno de los patógenos más comunes de las zonas productoras de ñame donde se hizo el estudio, y tiene la capacidad de manifestarse en almacenamiento, como la mayoría de los patógenos del ñame (Akin y Ayansola 2014). La infección puede darse por 1) prácticas de manejo incorrectas en campo o durante el manejo de cosecha y transporte, 2) una cosecha temprana por falta de suberización en la cáscara, y 3) por características anatómicas que favorecen la capacidad del hongo para infectar al tubérculo como la ausencia de una cutícula protectora (Pinzón *et al.* 2013).

El ensayo de simulación de envío de 28 días (correspondiente al tiempo requerido para llegar a mercados distantes como el europeo),

evidenció altas incidencias de enfermedades como mohos superficiales y pudriciones externas al finalizar el periodo de evaluación a la temperatura controlada de 16°C. Una vez que el producto se transfiere a una temperatura más elevada en el mercado destino, como por ejemplo un supermercado, esas incidencias serán más elevadas y perjudicarán la percepción de los consumidores. El producto poscosecha, es afectado más rápido a temperaturas óptimas para los hongos, como fue demostrado en papaya por Sandoval-Contreras *et al.* (2020). Se evidenció que son necesarios los muestreos de calidad durante el curado y el empaque, debido a que muchos de los problemas de calidad pueden ser identificados en la planta empacadora, razón por la cual el no realizar estos muestreos incrementa el riesgo de la aparición de defectos en el mercado final que en ocasiones no son evidentes en la superficie de los ñames y son percibidos únicamente cuando se realizan evaluaciones de calidad en el mercado destino o cuando el tubérculo se encuentra en manos del consumidor final, como ocurre en cultivos como el ajo (Gálvez y Palmero 2021).

Por otro lado, los daños observados en los tubérculos por el nematodo *Scutellonema bradys* se manifestaron como cortezas externas que tienden a agrietarse y exponer al tejido necrótico, pero también pueden permanecer intactas presentando la apariencia de un tubérculo sano. Se ha reportado necrosis en los tubérculos cuando hay una población inicial de 600 individuos de *S. bradys* (Acosta y Ayala 1975). Al respecto, en los datos obtenidos en este estudio se observó un promedio de 131023 nematodos por 100 g de tejido. La multiplicación del nematodo durante los últimos años ha sido un problema grave en las plantaciones de ñame en Costa Rica, por lo que las soluciones deben darse a nivel de prácticas agronómicas para reducir el tamaño de las poblaciones de este nematodo. Entre las prácticas recomendadas, se destacan el manejo adecuado de la semilla, la rotación de cultivos o el uso de cultivos trampa (Claudius-Cole *et al.* 2016). En Costa Rica no hay nematicidas

registrados para el control de nematodos en el cultivo de ñame. Esto representa una gran limitación para los productores y una necesidad de investigación en esta área.

También, se hace necesario el uso de semilla libre de patógenos y de mejor calidad para las plantaciones, si se tiene en cuenta que la buena condición de esta incide en el rendimiento. Al respecto, González-Vélez (2011) utilizó diferentes pesos de semilla de ñame (14-28 g, 42-56 g y 86-100 g) y encontró que la semilla de mayor peso (86-100 g) produjo un mayor número de tubérculos de calidad para el mercado.

En lotes del cantón Pococí se registró el daño por nematodos con incidencia de hasta un 35% en ñame recién empacado, lo cual muestra que el origen de los tubérculos tiene una influencia significativa sobre este defecto de calidad poscosecha. Es una práctica común el empaque de diferentes lotes y el envío de estos en un mismo contenedor, cuando es un daño interno que no ha sido correctamente muestreado se enviará a los mercados, lo cual tendrá una gran repercusión al examinarse de forma posterior en el país de destino.

### **Recomendaciones para la mejora en la calidad poscosecha de ñame en Costa Rica**

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, los productores deben modificar sus procesos agrícolas, las prácticas de manejo y sistemas de selección en campo y en planta empacadora. Entre algunas de las prácticas poscosecha se sugiere sustituir el transporte en sacos por el transporte en cajas como protección física para reducir el daño mecánico, el cual fue el más común en las siete regiones productoras evaluadas.

Los defectos en el ñame se pueden prevenir desde las etapas tempranas y las prácticas de manejo del cultivo en campo. Una de las estrategias sugeridas podría ser un cambio en los criterios de preselección del tubérculo en el campo, así como la capacitación tanto de personal de cosecha como de los operarios de las

empacadoras en el uso de protocolos como el propuesto en el CODEX CXS 234-2020.

También, se propone establecer sistemas de muestreo en campo y en la planta empacadora durante el proceso de curado y de selección para descartar problemas de calidad. Se plantea además la urgencia de explorar tratamientos de desinfección para reducir la incidencia de los microorganismos patógenos y de tratamientos térmicos para la asepsia de la semilla con respecto a los nematodos. Se pueden destinar áreas libres del nematodo para la producción de semilla y evitar el uso de ñames de rechazo como semilla para evitar la introducción de inóculo a la siembra; la semilla sana y de calidad tendrá ventajas en el rendimiento, calidad y limpieza del producto final. Es conveniente que en la empacadora se realice una inspección interna mediante un muestreo aleatorio para determinar la frecuencia de daño por nematodos y si un determinado lote se debe empacar para exportación.

Finalmente, se recomienda la búsqueda de fungicidas naturales (extractos naturales, aceites esenciales, controladores biológicos) para uso en poscosecha, con el fin de reducir los mohos y pudriciones.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Ing. Graciela Díaz Gutiérrez, al Laboratorio de Nematología (CIPROC-UCR) y a la Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (FITACORI) por la colaboración brindada.

## LITERATURA CITADA

- Aboagyé-Nuamah, F; Offei, S; Cornelius, E. 2005. Severity of spoilage storage rots of white yam (*Dioscorea rotundata* Poir.). *Annals of Applied Biology* 147:183-190.
- Acosta, N; Ayala, A. 1975. Pathogenicity of *Pratylenchus coffeae*, *Scutellonema bradys*, *Meloidogyne incognita*, and *Rotylenchulus reniformis* on *Dioscorea rotundata*. *Journal of Nematology* 7(1):1-6.
- Akanji, MA; Oshunsanya, SO; Alomran, A. 2018. Electrical conductivity method for predicting yields of two yam (*Dioscorea alata*) cultivars in a coarse textured soil. *International Soil and Water Conservation Research* 6(3):230-236.
- Akin, O; Ayansola, O. 2014. Studies of some isolated rot-causing mycoflora of yams (*Dioscorea* spp.). *American Journal of Microbiology and Biotechnology* 1(1):9-20.
- Amusa, NA; Adegbite, AA; Muhammed, S; Baiyewu, RA. 2003. Yam diseases and its management in Nigeria. *African Journal of Biotechnology* 2(12):497-502.
- Bertino, AMP; Cruz, JMF de L; da Silva LDR; Gomes, ABB; de Farias, OR; do Nascimento, IRS. 2022. Yam tubers yield and quality subjected to nitrogen doses and staking methods. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 26(5):341-347.
- Castellanos, L; Morelos, T; Peña, G. 2018. Efecto del tipo de tutores y densidad de siembra sobre el rendimiento de ñame espino (*Dioscorea rotundata* Poir.). *Revista FAVE-Ciencias Agrarias* 17(2):55-62.
- Claudius-Cole, AO; Asiedu, R; Fawole, B. 2016. Tropical cover crops for the management of the yam nematode, *Scutellonema bradys*. *International Journal of Pest Management* 62(1):85-91.
- Coelho Júnior, LF; Ferreira-Silva, SL; Vieira, MR; Carnelossi, MA; Simoes, AN. 2018. Darkening, damage and oxidative protection are stimulated in tissues closer to the yam cut, attenuated or not by the environment. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99:334-342.
- Cornet, D; Marcos, J; Tournebize, J; Sierra, J. 2022. Observed and modeled response of water yam (*Dioscorea alata* L.) to nitrogen supply: Consequences for nitrogen fertilizer management in the humid tropics. *European Journal of Agronomy* 138:126536.
- FAO. 2020a. FAOSTAT: Producción (en línea). Consultado 5 may. 2023. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- FAO. 2020b. FAOSTAT: Comercio (en línea). Consultado 5 may. 2023. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data/TP>
- FAO. 2020c. Norma para el ñame CXS 340-2020. CODEX ALIMENTARIUS (en línea). Consultado 5 may. 2023. Disponible en <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/en/>
- Gálvez, L; Palmero, D. 2021. Incidence and etiology of postharvest fungal diseases associated with bulb rot in garlic (*Allium sativum*) in Spain. *Foods* 10(5):1063. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10051063>
- González-Vélez, A. 2011. Rendimiento del ñame mapuey (*Dioscorea trifida* L.) variando el uso de riego y peso del material de propagación. *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico* 95(1-2):89-92. DOI: <https://doi.org/10.46429/jauprv95i1-2.2550>

- Holdridge, LR. 1982. Ecología Basada en Zonas de Vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica. s. p.
- Humphreys-Pereira, DA; Flores-Chaves, LC; Salazar, L; Gómez-Alpizar, L. 2017. Plant-parasitic nematodes associated with yams (*Dioscorea* spp.) and identification of *Meloidogyne* and *Pratylenchus* species in three yam-growing regions of Costa Rica. *Nematropica* 47(2):120-134.
- Izquierdo, C. 2023. Mercados laborales, disparidades socioeconómicas regionales y pobreza en Costa Rica, 2010-2017. *Diálogos Revista Electrónica de Historia* 24(1):1-34.
- Lebot, V. 2009. Tropical root and tuber crops: cassava, sweet potato, yams and aroids. CABI. s. p.
- López, L. 2008. Efecto de diferentes tiempos de almacenamiento, desinfectantes y extractos vegetales en poscosecha sobre tubérculos de ñame blanco (*Dioscorea alata* L.) de exportación. *Alcances Tecnológicos* 6(1):45-60.
- Ntui, VO; Uyoh, EA; Ita, EE; Markson, A A; Tripathi, JN; Okon, NI; Akpan, MO; Phillip, JO; Brisibe, EA; Ene-Obong, EE; Tripathi, L. 2021. Strategies to combat the problem of yam anthracnose disease: Status and prospects. *Molecular Plant Pathology* 22(10):1302-1314.
- Okigbo, RN. 2003. Fungi associated with peels of post harvest yams (*Dioscorea* spp.) in storage. *Global Journal of Pure and Applied Sciences* 9(1):19-23.
- Okigbo, RN. 2005. Biological control of postharvest fungal rot of yam (*Dioscorea* spp.) with *Bacillus subtilis*. *Mycopathologia* 159:307-314.
- Okigbo, RN; Emeka, AN. 2010. Biological control of rot-inducing fungi of water yam (*Dioscorea alata*) with *Trichoderma harzianum*, *Pseudomonas syringae* and *Pseudomonas chlororaphis*. *Journal of Stored Products and Postharvest Research* 1(2):18-23.
- Okigbo RN; Ikediugwu, FEO. 2000 Studies on biological control of postharvest rot of yam (*Dioscorea* spp.) with *Trichoderma viride*. *Journal of Phytopathology* 148:351-355.
- Okigbo, RN; Ogbonnaya, UO. 2006. Antifungal effects of two tropical plant leaf extracts (*Ocimum gratissimum* and *Fromomum melegueta*) on postharvest yam (*Dioscorea* spp.) rot, *African Journal of Biotechnology* 5(9):727-731.
- Okongor, G; Njoku, C; Essoka, P; Efiang, J. 2021. Climate variability and yam production: Nexus and projections. *Sarhad Journal of Agriculture* 37(2):406-418.
- Pinzón, Y; Bustamante, S; Buitrago, G. 2013. Diagnóstico molecular diferencial de *Colletotrichum gloeosporioides* y *Fusarium oxysporum* en ñame (*Dioscorea* sp.). *Revista Colombiana de Biotecnología* 15(1):52-60.
- Pouya, N; Hgaza, VK; Kiba, DI; Bomisso, L; Aighewi, B; Aké, S; Frossard E. 2022. Yam (*Dioscorea alata* L.) Growth and Tuber Yield as Affected by Rotation and Fertilization Regimes across an Environmental Gradient in West Africa. *Agronomy* 12(4):792.
- PROCOMER. 2020. Anuario estadístico (en línea). Consultado 5 may. 2023. Disponible en <https://www.procomer.com/exportador/documentos/anuario-estadistico-2019/>
- RStudio Team. 2015. R Studio: Integrated Development for R. Boston: R Studio, Inc. Consultado 5 may. 2023. Disponible en <http://www.rstudio.com>
- Sandoval-Contreras, T; Iñiguez-Moreno, M; Garrido-Sánchez, LL; Ragazzo-Sánchez, JA; Narváez-Zapata, JA; Ascencio, F; Calderón-Santoyo, M. 2020. Predictive model for the effect of environmental conditions on the postharvest development of *Colletotrichum gloeosporioides* strains isolated from papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Protection* 83(9):1495-1504.
- Sánchez-López, DB; Luna-Castellanos, LL; Espinosa-Carvajal, MR; Pérez-Polo, DJ; Cadena-Torres, J. 2021. Capacidad de infección de hongos asociados a la pudrición seca de los tubérculos de ñame. *Revista de Investigaciones Altoandinas* 23(3):149-158.
- Segura, A; Saborio, D; Sáenz, M. 2003. Algunas normas de calidad en raíces y tubérculos tropicales de exportación de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 27(1):49-61.
- Suja, G; Sreekumar, J. 2014. Implications of organic management on yield, tuber quality and soil health in yams in the humid tropics. *International Journal of Plant Production* 8(3):291-310.
- Wickham, L. 2019. Successful manipulation of the growth cycle of yam (*Dioscorea* spp.) for year-round production for food security and climate change. *Tropical Agriculture* 96:27-39.



## IDENTIFICACIÓN MORFOLÓGICA Y MOLECULAR DE POTENCIALES HONGOS NEMATÓFAGOS EN FINCAS BANANERAS DE LA REGIÓN HUETAR ATLÁNTICA DE COSTA RICA\*

Berlioth Ugalde-Monge<sup>1</sup>, Roy Artavia-Carmona<sup>2</sup>, Irena Hilje-Rodríguez<sup>3</sup>, Walter Peraza-Padilla<sup>4/\*\*</sup>

**Palabras clave:** control biológico; *Musa* AAA; nematodo barrenador; taxonomía; identificación.

**Keywords:** biological control; *Musa* AAA; burrowing nematode; taxonomy; identification.

**Recibido:** 20/05/24

**Aceptado:** 22/07/24

### RESUMEN

**Introducción.** La producción de banano es una de las actividades económicas más significativas para el país. Sin embargo, enfrenta serios desafíos debido a la presencia de diversos patógenos, entre los más significativos se encuentran los nematodos fitoparásitos que afectan el rendimiento y la calidad del cultivo. El uso de hongos nematófagos (HN) para el control biológico de nematodos es una alternativa para reducir la aplicación de productos químicos en cultivos agrícolas. En Costa Rica existe gran variedad de hongos debido a la diversidad de los suelos, por lo que el aislamiento y la correcta identificación de estos hongos es crucial para determinar su potencial antagonista. **Objetivo.** Aislar e identificar potenciales hongos nematófagos (PHN) presentes en muestras de suelo de plantaciones

de banano de la región Huetar Atlántica. **Materiales y métodos.** Se analizaron seis muestras de suelo provenientes de cinco cantones de la región Huetar Atlántica de Costa Rica mediante el método de espolvoreado en placas con agar-agua en búsqueda de PHN. Para la selección y purificación de los PHN se utilizaron placas Petri con papa dextrosa agar (PDA), identificando las estructuras morfológicas para el diagnóstico a nivel de género. Los hongos identificados morfológicamente se replicaron y se conservaron en viales con PDA y en aceite mineral a 4°C. Se extrajo ADN de los PHN y mediante amplificación por PCR (Reacción de Cadena de la Polimerasa) y secuenciación de diferentes regiones del genoma (ITS, tef 1-alfa, rpb2 y  $\beta$ -tubulina), se identificaron molecularmente. **Resultados.** Se aislaron e identificaron doce hongos, entre ellos *Trichoderma asperellum*, *Penicillium steckii*,

\* Este artículo científico formó parte de los resultados del trabajo final de graduación de Licenciatura en Agronomía del primer autor. Universidad Nacional (UNA). Costa Rica.

\*\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: walter.peraza.padilla@una.cr

1 Servicio Fitosanitario del Estado (SFE), San José, Costa Rica.

 0000-0002-7481-7561.

2 Universidad Nacional, Laboratorio de Nematología, Heredia, Costa Rica.

 0000-0003-0906-5444.

3 Universidad Nacional, Laboratorio de Biología Molecular, Heredia, Costa Rica.

 0009-0002-7616-8646.

4 Universidad Nacional, Laboratorio de Nematología, Heredia, Costa Rica.

 0000-0003-4651-5555.

*Purpureocillium lilacinum*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium* sp., *Fusarium pseudocircinatum*, y *Talaromyces* sp. **Conclusión.** El descubrimiento e identificación correcta de PHN subraya la importancia de investigar su aplicación en programas de manejo integrado de plagas, así como la necesidad de evaluar su eficacia y seguridad en diferentes condiciones agroecológicas para maximizar su impacto positivo en la agricultura.

## ABSTRACT

### Isolation and identification of potential nematophagous fungi in banana farms from the Huetar Atlantic Region of Costa Rica.

**Introduction.** Banana production is one of the most significant economic activities for the country. However, it faces serious challenges due to the presence of various pathogens, among the most significant are plant-parasitic nematodes that affect crop yield and quality. The use of nematophagous fungi (NF) for biological control of nematodes is an alternative to reduce the application of synthetic chemicals in agricultural crops. In Costa Rica there is a great variety of fungi due to the diversity of soils. Therefore, the isolation and correct identification of these fungi is crucial to determine their antagonistic

potential. **Objective.** To isolate and identify the potential nematophagous fungi (PNF) present in soil samples from banana plantations at the Huetar Atlantic region. **Materials and methods.** Six soil samples from the Huetar Atlantic region of Costa Rica were analyzed by the agar-water sprinkling plates method in search of PNF. For PNF selection and purification, Petri dishes with potato dextrose agar (PDA) were used, identifying morphological structures for diagnosis at genus level. Morphologically identified fungi were replicated and preserved in vials with PDA and in mineral oil at 4°C. DNA was extracted from the isolated PNF and through PCR amplification (Polymerase Chain Reaction) and sequencing of different regions of the genome (ITS, tef 1-alpha, rpb2 and  $\beta$ -tubulin), they were molecularly identified. **Results.** Twelve fungi were isolated and identified, including *Trichoderma asperellum*, *Penicillium steckii*, *Purpureocillium lilacinum*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium* sp., *Fusarium pseudocircinatum*, and *Talaromyces* sp. **Conclusion.** The correct discovery and identification of PNF underscores the importance of investigating its application in integrated pest management programs, as well as the need to evaluate its efficacy and safety under different agroecological conditions to maximize its positive impact on agriculture.

## INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, hay 43 444 hectáreas destinadas al cultivo de banano, distribuidas en 153 fincas. Los cantones de Matina, Siquirres y Pococí son los que poseen la mayor cantidad de área sembrada, representando el 26, 19 y 17% respectivamente (MAG 2022). Durante el 2019, la producción de banano destinada a la exportación alcanzó 121 millones de cajas, cada una con un peso promedio de 18,14 kg. Este desempeño representó un ingreso de divisas que superó los USD 1004,5 millones en el país (PRO-COMER 2020). Además, el sector bananero tuvo un impacto significativo en el empleo, ya que

proporcionó trabajo directo a unas 43 000 personas y generó de forma indirecta cerca de 100 000 empleos adicionales (Rojas-Contreras 2021).

Al igual que cualquier sistema productivo, las plantaciones de banano a nivel global enfrentan desafíos asociados con enfermedades y plagas, dado que los nematodos fitoparásitos (NF) son uno de los problemas más significativos. La infestación por nematodos puede causar daños de consideración en las raíces y los cormos de las plantas, lo que conduce a una reducción en el crecimiento y desarrollo de la planta. Este impacto afecta la calidad y la cantidad de frutos (Morales-García 2014, Robinson *et al.* 1999).

Entre los NF que afectan la producción de banano, *Radopholus similis* se destaca como la especie más perjudicial a nivel mundial (EPPO 2008). Esta plaga es especialmente problemática en plantaciones comerciales del subgrupo Cavendish ubicadas en regiones tropicales y subtropicales (Cañizares-Monteros 2003). En algunos países, la ocurrencia de nematodos ha causado reducciones de hasta el 50% en el rendimiento, lo que resulta en pérdidas económicas significativas para los pequeños productores (Valencia-Serna *et al.* 2014).

La estrategia más común para controlar NF en plantaciones de banano es mediante el uso de productos químicos como carbamatos y organofosforados (Gómez *et al.* 2008). Sin embargo, debido a la búsqueda de alternativas más sostenibles desde el punto de vista ambiental y económico para el manejo integrado de plagas, la investigación se ha centrado en explorar el potencial de diferentes microorganismos para el biocontrol. Este enfoque busca mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, disminuir la dependencia de productos químicos sintéticos y reducir el impacto ambiental (Morales-García 2014, Vargas *et al.* 2017, Cedeño-Franco 2017). En este contexto, el uso de hongos como herramienta de manejo de plagas mediante el desarrollo de bioplaguicidas se ha convertido en una alternativa cada vez más empleada.

Se han identificado más de 700 especies de hongos nematófagos (HN) para el control biológico, entre las cuales existen algunos entomopatógenos eficaces en el control de una amplia variedad de insectos plaga, así como hongos que controlan otros hongos (Espinell-Correal *et al.* 2018). Los hongos nematófagos según su estrategia de captura, se clasifican en endoparásitos y depredadores (Cole y Kendrick 1981). Los hongos endoparásitos forman estructuras adhesivas o de ingestión (conidios adhesivos o ingeribles) que pueden infectar a los nematodos, o bien, parasitar huevos formando un apresorio (Barrón 1977 y Peraza-Padilla *et al.* 2011). En cambio, los hongos depredadores, producen una red de hifas extensa en el sitio donde se encuentran, las cuales pueden ser muy simples, como hifas

adhesivas septadas, o complejas, como redes adhesivas ramificadas, botones adhesivos, anillos constrictores y no constrictores (Lazcano-Torres *et al.* 2015).

La evidencia científica respalda la eficacia de la diversidad y el uso de hongos como agentes de control biológico de plagas (Acuña-Segura y Brenes-Madriz 2020). Varias especies de *Arthrobotrys* como *A. musiformis*, *A. oligospora*, *A. robusta*, *A. superba* y *A. oviformis* han sido utilizadas de forma exitosa en el control de parásitos de rumiantes (Rodríguez-Labastida 2019). Además, se ha documentado que otros hongos resultan altamente efectivos en el combate de NF. Especies como *Verticillium chlamyosporium*, *Trichoderma* spp., *Purpureocillium* spp., *F. oxysporum* y *Monacrosporium* spp., han demostrado su eficacia contra *Meloidogyne javanica* (Fernández-Jiménez *et al.* 2019, Quevedo *et al.* 2022).

Si bien diversos microorganismos del suelo pueden ser considerados como controladores biológicos, los géneros *Trichoderma* y *Fusarium* destacan como los hongos endofíticos más abundantes en los tejidos internos de raíces de banano (Álvarez-Ortega y Gutiérrez-Miranda 2022). Estos hongos han demostrado potencial como antagonistas de nematodos, ya que han logrado reducciones de hasta el 90% en poblaciones de *R. similis* en las raíces de plantas de banano que han sido protegidas con estos hongos (Chaves-Méndez 2007).

En un estudio llevado a cabo por Ali *et al.* (2022) se comprobó el potencial nematicida de varias especies de *Trichoderma*, donde la más efectiva fue *T. harzianum*. Esta especie demostró un efecto ovicida y larvicida significativo, alcanzando un 100% de eficacia contra huevos y larvas de segundo estadio (J<sub>2</sub>s) del nematodo *Meloidogyne incognita*.

Además, existen algunos aislamientos de *Fusarium* que son endofitos de plantas asintomáticas, como *Fusarium concentricum*, que puede producir sustancias promotoras de crecimiento vegetal y funciona como inductor de resistencia o tolerancia a diferentes fitopatógenos (Chinchilla-Salazar *et al.* 2020). Esta especie de hongo endofito se ha encontrado en musáceas, mostrando

actividad benéfica al inducir resistencia en las plantas. Estudios realizados en Uganda por Paparu *et al.* (2003) y Barrios (2006), observaron un incremento significativo en la biomasa de plantas de banano cultivadas en campo e inoculadas con esta especie de *Fusarium*.

De acuerdo con Silva-Valenzuela *et al.* (2020) la interacción entre *F. oxysporum*, plátano y *R. similis* permitió que los exudados radicales emanados por las plantas de plátano colonizadas con el hongo endófito redujeran el número de juveniles y adultos de *R. similis* hasta en un 50%, lo que mejoró la salud y el rendimiento del cultivo.

La eficacia de *Purpureocillium lilacinum* y en particular, su capacidad para incidir e infectar en las fases iniciales del desarrollo de huevos del nematodo agallador *M. enterolobii* fueron comprobadas por Silva *et al.* (2017). En dicha investigación, se observaron porcentajes de parasitismo que oscilaron entre un 57% y un 84% en comparación con los huevos no tratados.

Debido a su ubicación en una región tropical, Costa Rica alberga una amplia diversidad de

hongos en sus ecosistemas naturales y agrícolas. Esta riqueza fúngica le confiere un potencial significativo para aprovechar los hongos como una estrategia de control biológico (Varela-Benavides *et al.* 2017). Por lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo aislar e identificar potenciales hongos nematófagos presentes en muestras de suelo de plantaciones de banano de la Región Huetar Atlántica de Costa Rica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Recolección de muestras de suelo

Se llevó a cabo una prospección de suelo en seis fincas comerciales y no comerciales de banano en los cantones de Limón, Guácimo, Pococí, Siquirres y Talamanca de la región Huetar Atlántica (Tabla 1). Se utilizó un muestreo al azar, con 25 submuestras en una hectárea por cada finca recolectadas a una profundidad de 0 a 25 cm.

Tabla 1. Características geográficas de los sitios de procedencia de las muestras de suelo analizadas. Región Huetar Atlántica, Costa Rica. 2021.

Cantón	Localización	Tipo de finca	Coordenadas	Zona de vida*	Altitud (msnm)
Limón	Cerere		9°70'82,69" N 82°99'43,65" O	bmh-T	11
Siquirres	El Carmen	Comercial	10°19'90,28" N 83°47'84,66" O	bmh-P	20
Guácimo	Duacaré N°2		10°34'42,15" N 83°62'93,68" O	bmh-P	37
	Tortuguero		10°29'44,23" N 83°37'08,56" O	bmh-T	16
Pococí	Lomas	No comercial	10°18'21,62" N 83°29'31,51" O	bmh-T	15
Talamanca	Bajo Coen		9°55'44,20" N 83°00'51,54" O	bh-T	94

\*Según clasificación de Holdridge (Jiménez-Saa1982): bmh-T (Bosque muy Húmedo Tropical), bmh-P (Bosque Húmedo Premontano), bh-T (Bosque Húmedo Tropical).

El suelo se recolectó mediante una pala, evitando alterar la capa superficial de materia orgánica. Luego, se procedió a dividir el suelo en cuartos, hasta obtener una muestra de 1 kg, la cual fue depositada en bolsas de polietileno. Estas bolsas fueron debidamente identificadas con la fecha y ubicación de la recolección, así como las coordenadas geográficas correspondientes. Posteriormente, las muestras se transportaron en un recipiente herméticamente sellado, hasta el Laboratorio de Nematología de la Universidad Nacional para su procesamiento y análisis correspondiente.

### **Análisis de textura y pH de las muestras de suelo**

Para llevar a cabo el análisis textural, se utilizó la metodología propuesta por Bouyoucos (Núñez-Solís 1996, Maldonado-Paucar 2016). Una vez calculados los porcentajes de partículas de arena, limo y arcilla, se utilizó el diagrama textural del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) para determinar la textura de cada muestra de suelo (Nesta-Silva y Rodrigues-Nunes 2014). En el caso de medición del pH se realizó según la metodología de López-Aguilar *et al.* (2002).

### **Aislamiento y purificación de PHN**

Para el aislamiento y purificación de los hongos presentes en las muestras de suelo, se utilizó el método de “espolvoreado en placa” descrito por Barrón (1977) para el aislamiento de PHN. Esta técnica consistió en utilizar entre 0,5 a 1,0 g de suelo de cada muestra recolectada los cuales se colocaron en platos Petri de 9 cm de diámetro que contenían agar-agua (AA). Posteriormente, los platos se incubaron a temperatura ambiente (18-26°C) y con luz natural durante cinco días. Transcurrido ese tiempo, se inició la búsqueda de estructuras tales como hifas, conidios, esporas o nematodos parasitados.

Después de identificar la presencia de estas estructuras, se procedió al aislamiento individual de cada una de ellas. Para ello, se empleó

un pincel delgado con un cabello fino en su extremo. Cada estructura hallada fue transferida a placas Petri que contenían medio de cultivo (PDA-Papa Dextrosa Agar) y antibiótico [Tetraciclina al 0,1 % (p/v)] para evitar el crecimiento de bacterias y favorecer el crecimiento micelial (Sánchez-Miranda *et al.* 2021).

Después de una semana de crecimiento de las estructuras fúngicas mencionadas, se llevó a cabo la fase de purificación y replicación mediante tres repeticiones en platos Petri con PDA y antibiótico hasta obtener cultivos puros. Luego, mediante la técnica de cultivos monospóricos descrita por Nelson *et al.* (1994), se elaboró una suspensión de conidios de cada hongo en agua destilada estéril a baja concentración. Se extrajo 0,5 ml de esta suspensión y se incorporó a platos Petri con medio con agar-agua (AA), dispersando de manera uniforme mediante un triángulo de Drigalski. Se dejaron reposar los platos durante 24 horas. Pasado ese tiempo, se procedió a observar la germinación de los conidios bajo un estereoscopio. Una vez germinados, se transfirieron a cajas Petri que contenían medio PDA. Se establecieron tres repeticiones de cultivos monospóricos para cada aislamiento (Anama *et al.* 2021).

Finalmente se utilizó el “método de conservación en aceite mineral estéril” de Little y Gordon (1967) y adaptado por Deshmukh (2003). Este procedimiento consistió en la conservación de los hongos aislados después de su crecimiento en tres viales (repeticiones) de 25 ml, los cuales contenían PDA y aceite mineral. Estos viales se mantuvieron a una temperatura de 4°C, con la finalidad de disminuir la tasa metabólica de los hongos.

### **Identificación morfológica**

Se llevó a cabo la preparación de un montaje para cada cepa, con el fin de caracterizar las estructuras responsables de la dispersión y supervivencia de los hongos aislados. El procedimiento de montaje incluyó el uso de una aguja de disección para realizar un raspado superficial de los hongos en los platos Petri, seguido por la

transferencia de estructuras a un portaobjetos. Este proceso se repitió para cada hongo aislado, lo que permitió facilitar la observación y el análisis detallado de estas estructuras.

Posteriormente, se añadió una gota de lactofenol azul como agente de contraste y se colocó un cubreobjetos sobre el montaje. Para la observación y captura de imágenes detalladas de las estructuras de los hongos aislados, se empleó un microscopio Nikon® Eclipse 80i con una ampliación de 100x, conectado a una cámara Nikon® DS-Fi1. Además, se realizó un análisis comparativo de la morfología de cada hongo, recurriendo a las claves de identificación descritas por Cooke y Godfrey (1964) y Barnett y Hunter (1998).

También, se capturaron imágenes de los platos Petri mediante una cámara Canon® EOS Rebel T6 con el objetivo de identificar eventuales diferencias o similitudes en el crecimiento, color y forma de cada aislamiento. Finalmente, todas las fotografías obtenidas fueron editadas mediante el programa Adobe® Photoshop® CS6.

### Extracción de ADN e identificación molecular

A partir de cultivos monospóricos de los hongos aislados se hizo extracción de ADN utilizando la metodología propuesta por Hoyos-Carvajal *et al.* (2008) con algunas modificaciones. Se verificó la calidad y la cantidad de los ADN's extraídos mediante electroforesis en geles de agarosa al 0,8% (p/v) teñidos con GelRed 1X y sometidos a luz UV. Para la identificación de los aislamientos se amplificaron diferentes regiones del genoma (ITS, factor de elongación de la transcripción 1-alfa y gen de la  $\beta$ -tubulina) mediante PCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa). Cada reacción de PCR contenía un volumen total de 25  $\mu$ l distribuido en 7,25  $\mu$ l de agua ultrapura, 2,5  $\mu$ l de DreamTaq buffer 10X, 2,5  $\mu$ l de dNTPs, 2,5  $\mu$ l de cada imprimador (10  $\mu$ M), 0,25  $\mu$ l de enzima DreamTaq polimerasa y 7,25  $\mu$ l de ADN.

Para la identificación de los aislamientos del género *Trichoderma*, se amplificó parcialmente el factor de elongación de la traducción

(TEF1- $\alpha$ ). Para ello se utilizaron los cebadores EF-728M (5'-CATYGAGAAGTTCGAGAA GG) y EF-2R (5'-GGARGT ACCAGTSATCATGTT) reportados previamente por Todd *et al.* (2019) y Umaña-Castro *et al.* (2019).

Para el género *Fusarium* se emplearon dos pares de cebadores, EF1F (5' ATGGGTAA-GGARGACAAGAC) y EF2R (5' GGARGTAC-CAGTSATCATGTT) que amplifican el TEF1- $\alpha$  junto con el ITS1 (5' TCC GTA GGT GAA CCT GCG G) e ITS4 (5' TCCTCCGCTTATTGATATGC) que amplifican los espaciadores internos transcritos del ADN ribosomal, según los protocolos propuestos por O'Donnell *et al.* (2008) y Hernández-Medina *et al.* (2015).

Para los hongos *Penicillium* sp. y *Talaromyces* sp., se utilizaron dos pares de cebadores, Bt2a (5' GGT AAC CAA ATC GGT GCT GCT TTC) y Bt2b (5' ACC CTC AGT GTA GTG ACC CTT GGC) que amplifican parcialmente el gen de la  $\beta$ -tubulina, a una temperatura de hibridación de 58°C, y frpb2-5F (5' GAY GAY MGW GAT CAY TTY GG) junto con frpb2-7CR (5' CCC ATR GCT TGY TTR CCC AT) que amplifican una región de la subunidad 2 de la ARN polimerasa, a una temperatura de hibridación de 57°C según lo propuesto por Liu *et al.* (1999).

En el caso de *Purpureocillium lilacinum* también se emplearon dos pares de cebadores, Bt2a/Bt2b e ITS4 (5'TCCTCCGCTTATTGATATGC)/ITS5 (5' GGAAGTAAAAGTCGTAA-CAAGG) reportados por Maldonado-Haro (2019) y Almaraz-Sánchez *et al.* (2012) bajo las mismas condiciones de termociclado anteriormente descritas para esos cebadores.

Los productos de PCR se evaluaron por medio de electroforesis en geles de agarosa Top-Vision al 1% teñidos con GelRed 1X y sometidos a luz UV. Posteriormente, se enviaron los productos de PCR obtenidos de todos los hongos aislados a la empresa MacroGen Inc. (Corea del Sur) para su purificación y secuenciación en ambas direcciones mediante el método Sanger (1977).

Una vez obtenidas las secuencias se construyeron secuencias consenso y se editaron utilizando el programa BioEdit Sequence Alignment

Editor versión 7.2.5, a partir de las dos hebras (forward y reverse) con respecto al electroferograma obtenido. Finalmente, se compararon las secuencias de ADN obtenidas con accesiones reportadas en el GenBank® por medio de la herramienta BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) del NCBI (National Center for Biotechnology Information) para la identificación de especies.

## RESULTADOS

### Identificación taxonómica y molecular de potenciales hongos nematófagos

Se logró aislar 12 especies de hongos a partir de las muestras suelo obtenidas de los cantones de Limón, Guácimo, Pococí, Siquirres y Talamanca.

Las especies de hongos identificadas fueron *Trichoderma asperellum*, *Fusarium oxysporum*, *F. pseudocircinatum*, *F. solani*, *Purpureocillium lilacinum*, *Penicillium steckii* y *Talaromyces* sp. (Tabla 2). El 50% de los aislamientos fueron del género *Fusarium*, 25% de *Trichoderma* y un 8,33% de cada uno de los géneros *Penicillium*, *Purpureocillium* y *Talaromyces*. De los hongos aislados, en la literatura se reporta a *T. asperellum*, *F. oxysporum*, *F. solani* y *P. lilacinum* como PHN. Cabe destacar que varias de estas especies podrían también desempeñar otras funciones en el suelo, incluyendo actividades fitopatógenas, lo que puede afectar tanto la salud del suelo como la de las plantas. Por lo tanto, es fundamental realizar evaluaciones de estas especies para entender su impacto en el ecosistema y si pueden ser consideradas en prácticas de manejo agrícolas.

Continúa...

Tabla 2. Identificación molecular de potenciales hongos nematófagos aislados de plantaciones comerciales y no comerciales de banano en la Región Huetar Atlántica.

Cantón	Código	Identificación*	Región del genoma amplificada	Accesión	País de referencia	Referencia
Limón	Fox1	<i>Fusarium oxysporum</i>	TEF1- $\alpha$ ITS	MN386726 MT560381	Malasia China	Kee <i>et al.</i> (2020) Wang 2020
	Trich1	<i>Trichoderma asperellum</i>	TEF1- $\alpha$	MZ442656	Paraguay	Florentin 2022
	Trich2	<i>Trichoderma asperellum</i>	TEF1- $\alpha$	MZ442656 GU198293	Paraguay Perú	Florentin 2022 Samuels <i>et al.</i> (2015)
Siquirres	Fox2	<i>Fusarium oxysporum</i>	TEF1- $\alpha$ ITS	MN386726 OR388100	Malasia México	Kee <i>et al.</i> (2020) Valencia-Yah <i>et al.</i> (2023)
	Fox4	<i>Fusarium oxysporum</i>	TEF1- $\alpha$ ITS	MN386726 DQ016213	Malasia Estados Unidos	Kee <i>et al.</i> (2020) Stewart <i>et al.</i> (2006)
Talamanca	Pli	<i>Purpureocillium lilacinum</i>	$\beta$ -tubulina ITS	KY488512 GU980035	Brasil Tailandia	Amatuzzi <i>et al.</i> (2017) Ridkaew <i>et al.</i> (2012)
	Fps	<i>Fusarium pseudocircinatum</i>	TEF1- $\alpha$	MT011003	Países Bajos	Yang <i>et al.</i> (2020)
Pococi	Trich3	<i>Trichoderma asperellum</i>	TEF1- $\alpha$	MZ442656	Paraguay	Florentin 2022
	Fox3	<i>Fusarium oxysporum</i>	TEF1- $\alpha$ ITS	MN386726 KU939031	Malasia China	Kee <i>et al.</i> (2020) Wang <i>et al.</i> (2018)
	Pst	<i>Penicillium steckii</i>	rbp2 $\beta$ -tubulina	KX650039 KY469196	Brasil Canadá	Cardoso <i>et al.</i> (2021) Visagie <i>et al.</i> (2020)
Guaicimo	Tal	<i>Talaromyces sp.</i>	rbp2 $\beta$ -tubulina	KX657522 MK951834	Estados Unidos Sudáfrica	Peterson y Jurjević 2017 Visagie y Houbraken 2020
	Fsol	<i>Fusarium solani</i>	TEF1- $\alpha$ ITS	KF255484 FJ224382	Países Bajos Puerto Rico	Van Diepeningen <i>et al.</i> (2014) Estévez y Abad 2009

\*Identificación obtenida utilizando la herramienta en línea BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) del NCBI (Centro Nacional de Información Biotecnológica).

Del total de especies aisladas en esta investigación, once fueron identificadas mediante el uso de distintas regiones del genoma (ITS, TEF1- $\alpha$ , rpb2 y  $\beta$ -tubulina, respectivamente). El único aislamiento que no se pudo identificar molecularmente a nivel de especie fue *Talaromyces* sp. (Tal).

A continuación, se realiza una descripción morfológica y molecular de cada uno de los hongos identificados.

### ***Purpureocillium lilacinum***

Se identificó el hongo *P. lilacinum* en la muestra de suelo recolectada en el cantón de Talamanca. A partir del quinto día de incubación, se observó la formación de micelio en la placa Petri. Dos días después, se observó un desarrollo micelial de 4 cm de diámetro, de color blanco, de consistencia algodonosa y rápida esporulación (Figura 1). En los días siguientes a la esporulación, el hongo adquirió una tonalidad lilácea con un crecimiento expandido.

Morfológicamente, se observó la presencia de fiálides abultadas en la base, las cuales se estrechaban hacia las puntas (Figura 1a). En estas estructuras, se observó la presencia de conidios unicelulares con forma globosa (Figura 1b). Los conidióforos de *P. lilacinum* eran erectos y agrupados formando ramificaciones. Estos conidióforos libres son llamados también verticilados debido a su disposición en verticilos (Figura 1c).

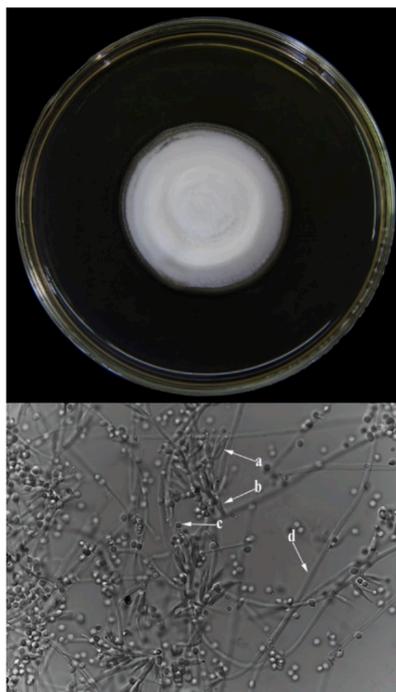


Figura 1. Estructuras de caracterización morfológica y microscópica del hongo *Purpureocillium lilacinum* en medio PDA, a. Fiálides, b. Conidióforos, c. Conidios y d. Hifas de *P. lilacinum* (Pli) de Talamanca.

Con base a las secuencias de ADN, *P. lilacinum* presentó un nivel de homología del 99,7% (303pb/304pb) de la secuencia parcial del gen de la  $\beta$ -tubulina y una cobertura de 100% con respecto a *P. lilacinum* (KY488512) reportado en Brasil. Además, este mismo aislamiento presentó 100% de homología (560pb/560pb) y cobertura de la región ITS de su ADN ribosomal con *P. lilacinum* (GU980035) reportado en Tailandia.

### ***Trichoderma asperellum***

Los aislamientos de *Trichoderma asperellum*, Trich1 y Trich2 se obtuvieron a partir de muestras de suelo del cantón de Limón, mientras que el aislamiento Trich3 se aisló de muestras de suelo del cantón de Pococí. Las

Figuras 2A, 2B, y 2C ilustran los aislamientos de *T. asperellum* obtenidos en las distintas localidades que se caracterizaron por presentar colonias con micelio plano y compacto.

Estas colonias exhibieron un crecimiento rápido, alcanzando diámetros de 6 a 8 cm en tan solo cinco días, y posteriormente cubrieron por completo la superficie de los medios de cultivo de 9 cm de diámetro.

Inicialmente, el hongo en el plato Petri mostró un color blanco que posteriormente fue adquiriendo una tonalidad verde con una esporulación generalizada. Las colonias presentaron de dos a tres anillos concéntricos bien definidos: uno blanco que correspondió al micelio y otros verdes que representaban los conidios. La pigmentación

de los aislamientos varió de una tonalidad verde claro a verde oscuro típico de este género.

Los resultados de las observaciones microscópicas de los aislamientos Trich1, Trich2 y Trich3 revelaron varios rasgos distintivos. Se observaron clamidosporas (Figura 2A.a) en abundancia con una forma globosa. También fiálides dispuestas en grupos de tres (Figura 2B.b) a lo largo del conidióforo el cual presentaba ramificaciones no muy abundantes (Figura 2B.a). Estas fiálides se caracterizaron por ser más anchas en el centro que en la base (Figura 2 A.b) y su ápice presentaba forma curva. Además, estas estructuras presentaban conidios de forma elipsoidal (Figura 2B.c) de coloración verde, dispuestos en grupos de 6.

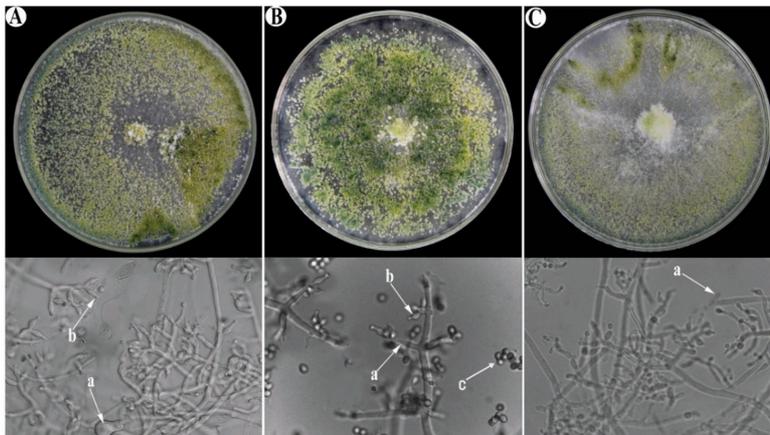


Figura 2. Estructuras de caracterización morfológica y microscópica de especies del hongo *Trichoderma* en medio PDA. A. a. Clamidosporas y b. Fiálides de *T. asperellum* (Trich3) de Pococí. B. a. Ramificaciones de conidióforos. b. Fiálides y c. Conidios of *T. asperellum* (Trich2) de Limón. C. a. Conidios de *T. asperellum* (Trich1) de Limón.

La secuencia de nucleótidos de los productos amplificados de la región *TEF1- $\alpha$*  de los aislamientos Trich1 y Trich3 presentaron 100% de cobertura y homología de secuencia, 550pb/550pb y 551pb/551pb respectivamente, con *T. asperellum* (MZ442656) reportado en

Paraguay, mientras que Trich2 mostró sólo 98,2% (546pb/556pb) de similitud con esa misma aceción. Adicionalmente, Trich2 también mostró 100% de similitud (532pb/532pb) con *T. asperellum* (GU198293) reportado en Perú (Tabla 2).

***Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani*  
y *Fusarium pseudocircinatum***

Los aislamientos de *F. oxysporum* (Fox1, Fox2, Fox3 y Fox4) se recolectaron de muestras de suelo provenientes de los cantones de Limón, Siquirres, Guácimo y Talamanca. De las muestras obtenidas de Pococí y Guácimo, se identificaron las especies *F. pseudocircinatum* (Fps) y *F. solani* (Fsol) respectivamente.

La especie *F. oxysporum* tuvo un desarrollo micelial algodonoso abundante, de coloración blanquecina los primeros días de crecimiento. Debido al desarrollo de los conidios, cambió a un tono morado (Figura 3).

Este hongo produjo macroconidios y microconidios. Los macroconidios eran hialinos y curvos (Figura 3a), mientras que los microconidios, la mayoría carecían de septos y presentaban una forma ovalada (Figura 3b).

La secuencia de nucleótidos de la región TEF1- $\alpha$  de los aislamientos Fox1, Fox2, Fox3 y Fox4 presentaron 100% de homología de secuencia (500pb/500pb, 654pb/654pb, 654pb/654pb y 661pb/661pb, respectivamente) y cobertura de 100% con *F. oxysporum* (MN386726) reportado en Malasia. Adicionalmente, el aislamiento Fox1 presentó 100% de cobertura y similitud (499pb/499pb) de la región ITS, con un aislamiento de *F. oxysporum* (MT560381) reportado en China, así como con otras accesiones del GenBank.



Figura 3. Estructuras de caracterización morfológica y microscópica del hongo *F. oxysporum* (Fox2) de Siquirres en medio PDA. A. Microconidios y b. Red de hifas.

El aislamiento Fox2 presentó 100% de cobertura y similitud (503pb/503pb) de la región ITS con *F. oxysporum* (OR388100) reportado en México mientras que la región ITS del aislamiento Fox3 presentó 99,81% de homología (539pb/545pb) con un aislamiento de *F. oxysporum* (KU939031) reportado en China. Además, el aislamiento Fox4 presentó 100% de homología de la región ITS con un aislamiento de *F. oxysporum* (DQ016213) reportado en Estados Unidos.

En el caso de *F. solani* (Fsol) procedente de muestras de suelo del cantón de Guácimo, mostró a partir del quinto día de incubación, abundante micelio aéreo, algodonoso y blanco con pigmentación en la base color rojizo (Figura 4).

Asimismo, presentó abundantes microconidios, unicelulares los cuales estaban ubicados en falsas cabezas (Figura 4a) a partir

de monofiálides alargadas sobre conidióforos (Figura 4b) no ramificados. Este aislamiento presentó homología de secuencia y cobertura del 100% (688pb/688pb) de la región TEF1- $\alpha$  con *F. solani* (KF255484) reportado en Los Países Bajos y 100% de homología de la región ITS con *F. solani* (FJ224382) reportado en Puerto Rico.



Figura 4. Estructuras de caracterización morfológica y microscópica del hongo *F. solani* (Fsol) de Guácimo en medio PDA. a. Microconidios y b. Conidióforos.

Las colonias de *F. pseudocircinatum* (Fps) provenientes de muestras de suelo de Pococí presentaron micelio algodonoso de color rosado que posteriormente se tornó de color morado principalmente en el centro de la colonia (Figura 5).

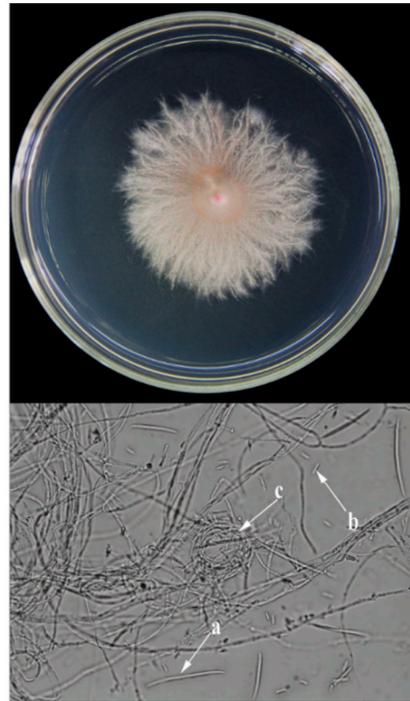


Figura 5. Estructuras de caracterización morfológica y microscópica de especies del hongo *F. pseudocircinatum* (Fps) de Pococí en medio PDA. a. Macroconidios. b. Microconidios y c. Hifas enrolladas.

Adicionalmente, este hongo presentó escasos macroconidios, alargados, delgados (Figura 5a) con célula apical puntiaguda. También mostró microconidios ovoides y sin septos (Figura 5b), con hifas en forma espiral enrolladas (Figura 5c), característica de gran relevancia taxonómica para la identificación de esta especie. El análisis de secuencias de la región TEF1- $\alpha$  de Fps mostró homología del 99,7% y 100% de cobertura (664pb/666pb) con diferentes secuencias de *F. pseudocircinatum*, entre ellas MT011003 y MN386745 reportadas en Los Países Bajos y Malasia, respectivamente.

### *Penicillium steckii*

*P. steckii* (Pst) se aisló de muestras de suelo procedentes del cantón de Guácimo. Este hongo presentó un crecimiento circular de 4 cm y un micelio de color verde a turquesa con bordes blancos (Figura 6). En el lado inferior, la tonalidad fue de color crema. También se caracterizó por presentar conidióforos monoverciliados (Figura 6b) que formaban conidios esféricos en cadena, en una estructura ramificada similar a un pincel (Figura 6d). Además, se observaron tres estructuras llamadas métulas (Figura 6a), con células terminales llamadas fiálides (Figura 6c).

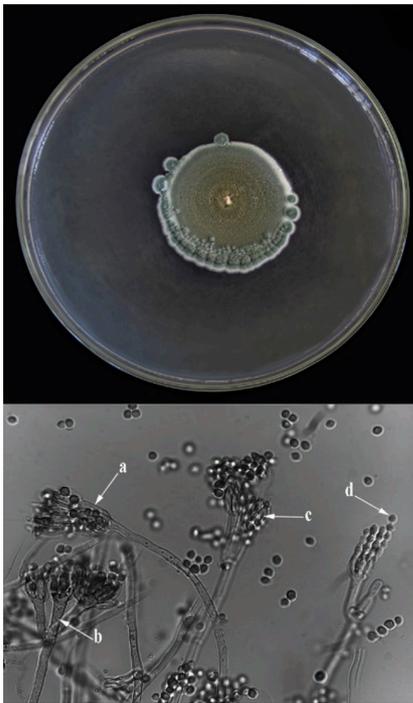


Figura 6. Estructuras de caracterización morfológica y microscópica del hongo *Penicillium steckii* (Pst) de Guácimo en medio PDA. a. y b. Métulas. c. Fiálides y d. Conidios.

Este hongo presentó homología de secuencia del 99,9% (911pb/912pb) de la región rpb2 con *P. steckii* (KX650039) reportado en Brasil,

mientras que la secuencia parcial del gen de la  $\beta$ -tubulina de este mismo aislamiento, presentó 100 % de homología (442pb/442pb) con *P. steckii* (KY469196) reportado en Canadá.

### *Talaromyces* sp

*Talaromyces* sp. (Tal) se aisló de muestras de suelo procedentes del cantón de Guácimo. Este hongo mostró un diámetro de 3 cm a partir del quinto día de incubación, presentó un micelio de color blanco que posteriormente cambió a color amarillo (Figura 7) con una rápida esporulación en pocos días. Sus conidióforos eran largos y cilíndricos, relativamente estrechos (Figura 7c). Además, presentó fiálides unicelulares dispuestas en verticilos no ramificados (Figura 7b) a partir de las cuales se producen conidios de forma elipsoidal (Figura 7a).

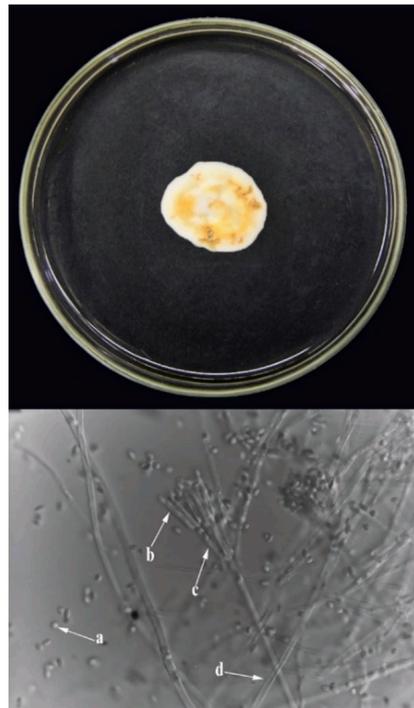


Figura 7. Estructuras de caracterización morfológica y microscópica del hongo *Talaromyces* sp. (Tal) de Guácimo en medio PDA. a. Conidios. b. Fiálides. c. Métulas y d. Red de hifas de *Talaromyces* sp.

La secuencia parcial del gen de la  $\beta$ -tubulina de *Talaromyces* sp. (Tal) mostró baja cobertura lo que resultó en una homología reducida, donde alcanzó un 96,74% (356pb/368pb) con valores similares a los reportados en Sudáfrica (MK951834) para este mismo hongo. Asimismo, la secuencia parcial del gen de la rpb2 de este mismo aislamiento presentó baja cobertura y homología del 93,97% (950 pb/1011pb), con *Talaromyces delawarensis* (KX657522) reportado en Estados Unidos, así como con otras especies de *Talaromyces*.

### Relación de pH y textura con la presencia de los hongos nematófagos

Se analizaron seis muestras de suelo provenientes de cinco cantones de la región Huetar Atlántica de Costa Rica, donde se determinó la textura del suelo y los niveles de pH los cuales pueden tener alguna relación con la ocurrencia de PHN. Todas las localidades compartieron características similares en cuanto a la textura del suelo franco, con una mezcla equilibrada entre partículas de arena, limo y arcillas.

Se observó que tanto la localidad de Bajo Coen en el Cantón de Talamanca, como Lomas en el Cantón de Pococí, tienen texturas franco arenosas, es decir, existe presencia significativa de partículas de arena en la textura del suelo. Las demás localidades y cantones mostraron textura franco limosa (Cerere, Limón), franco arcillosa (Tortuguero, Pococí), franco arcillo limosa (El Carmen, Siquirres) y franca (Duacaré N°2, Guácimo). Con respecto a los valores de pH, estuvieron en el rango de 5,8 a 6,5 (Tabla 3).

Tabla 3. Características de suelos según valores de textura y pH de diferentes localidades de la Región Huetar Atlántica de Costa Rica. 2021.

Cantón	Localización	Textura	pH
Limón	Cerere	Franco limoso	6,20
Pococí	Tortuguero	Franco arcilloso	6,28
	Lomas	Franco arenoso	6,39
Siquirres	El Carmen	Franco arcillo limoso	5,84
Guácimo	Duacaré N° 2	Franco	6,51
Talamanca	Bajo Coen	Franco arenoso	5,98

### DISCUSIÓN

En el proceso de caracterización molecular no se logró identificar *Talaromyces* a nivel de especie, ya que se obtuvo bajo porcentaje de cobertura y homología de las secuencias obtenidas ( $\beta$ -tubulina y rpb2) con las de las especies reportadas en el GenBank. Este inconveniente puede atribuirse a la escasa información disponible en la base de datos analizada respecto a este aislamiento. Además, es probable que las regiones amplificadas en este estudio no proporcionarían información específica de este hongo o bien, se trate de una nueva especie no reportada aún.

En lo que respecta a factores antagonistas de algunas especies de hongos identificadas en este estudio, como por ejemplo *Trichoderma*, se destaca por la producción de enzimas como quitinasas, gluconasas, proteasas y células, que tienen la capacidad nematocida y antagonista, demostrada en estudios llevados a cabo por Gezzin *et al.* (2020), y Lyubenova *et al.* (2023) y Mesa-Vanegas *et al.* (2019). Estas enzimas pueden inducir deformaciones y limitar la movilidad de los nematodos (Carranza-González 2014).

El hongo *Trichoderma* spp. sobresale como uno de los agentes de control biológico más efectivos y utilizados, principalmente por su habilidad micoparasítica (Chaves-García 2006). Esta capacidad radica en que logra adherirse al hospedero y envuelve sus hifas alrededor de él formando un apresorio; estructura con la que

logran penetrar las células hospederas y finalmente provoca colapso del hospedero (Todd *et al.* 2019). También presentan capacidad antagónica contra nematodos (Rojas-Villacorta *et al.* 2017, Moo-Koh 2018) debido a la producción de metabolitos secundarios (Rivera-Méndez *et al.* 2018).

Dentro del género *Fusarium* existen especies saprófitas que actúan como biocontroladores. Por ejemplo, *Fusarium solani* ha sido evaluado contra huevos y juveniles de *Nacobbus aberrans*, mostrando un parasitismo del 86% y 90%, respectivamente; sin causar patogenicidad en plantas de chile (*Capsicum annuum*) (Cortez-Hernández *et al.* 2019). Otra especie, *Fusarium oxysporum*, puede inducir resistencia sistémica en la planta hospedera contra diferentes nematodos (Manobanda-Duche 2022) y también estimular la producción de metabolitos que, al igual que *Trichoderma*, inhiben el desarrollo de nematodos fitoparásitos y fomentan la producción de compuestos de defensa en las plantas contra patógenos (Morales-García 2014, Cortez-Hernández *et al.* 2019).

Aunque *F. pseudocircinatum* se reporta en la literatura como un hongo fitopatógeno en varios cultivos, incluido el banano (Iñiguez-Moreno *et al.* 2022, Tarnowski *et al.* 2010), resulta crucial comprender su interacción en el suelo con la biodiversidad microbiana y la dinámica de los ecosistemas. Este hongo podría desempeñar un papel significativo en el ciclo de nutrientes y en las interacciones con otras especies de hongos, aspectos microbiológicos que aún no están investigados.

A pesar de que algunas especies de *Fusarium* actúen favorablemente, es fundamental reconocer que muchas de ellas también son patógenas y pueden causar daños significativos a los cultivos. Esta doble naturaleza, tanto beneficiosa como perjudicial, debe ser cuidadosamente considerada para evitar confusiones y malentendidos en la implementación de estrategias de control biológico.

Algunos hongos como *Trichoderma* y *Fusarium* tienen la capacidad de crear “biofilms” o biopelículas en las raíces, las cuales

son complejas comunidades creadas por una variedad de microorganismos, entre los cuales se incluyen hongos (Triveni *et al.* 2012). Estos hongos poseen la capacidad de establecer interacciones simbióticas con las plantas y de formar colonias microbianas. Estas interacciones beneficiosas pueden contribuir al control de patógenos y estimular el crecimiento de las plantas (Poveda-Arias 2018).

Las cinco localidades muestreadas en este estudio presentaron suelos de textura franca, lo cual promueve la retención y disponibilidad de nutrientes para diversos organismos edáficos, incluidos los hongos (Capcha-Ospina 2017, Jiménez-Zappa 2013). Además, el tipo de suelo influye en la composición y función de las especies de hongos, ya que la mayoría se desarrollan mejor en ambientes ácidos (Ferreri 2020). Sin embargo, algunos hongos como *Trichoderma* sp., *Fusarium* sp., *Rhizopus* sp. y *Penicillium* sp., se pueden encontrar en suelos de textura francoarenosa, franco arcillosa y arenosa lo cual podría estar asociado principalmente a su función antagónica en el suelo, que incluye la producción de metabolitos inhibitorios y competencia con patógenos (Macías-Echeverri *et al.* 2019). Las condiciones edáficas y de pH, están estrechamente relacionados con factores ambientales y la cantidad de materia orgánica, los cuales desempeñan un papel fundamental en la distribución y ocurrencia de HN (Gortari *et al.* 2007).

La presencia de los potenciales hongos nematófagos en este estudio, podría estar relacionada con la notable compatibilidad de estos organismos a suelos con pH ácido. Aunque algunas especies de *Trichoderma* tienen habilidad de crecer en suelos con un amplio rango de pH, desde 5,5 hasta 8,5 debido a su capacidad de adaptación, sus valores óptimos se sitúan entre 5,5-6,5, lo que sugiere una preferencia por ambientes ligeramente ácidos (Pozo-Enríquez 2020). Esta condición podría explicar la presencia de potenciales hongos nematófagos en condiciones de variabilidad de pH del suelo como los encontrados en este estudio.

En esta investigación, los valores de pH obtenidos concuerdan con el rango óptimo recomendado para el desarrollo de *Fusarium* spp., el cual se encuentra entre 3,8 a 5,0 (Pérez-Rivera 2014) es decir, con suelos ácidos. Asimismo, los resultados de textura del suelo se relacionan con los requeridos para la ocurrencia de estos hongos, en suelos de textura fina, franco y arenosa. No obstante, la mayoría de las especies de *Fusarium*, tienen la capacidad adaptarse a diversas condiciones agroambientales como un amplio rango de pH entre 2,0 a 9,0 y en ocasiones pH superiores, debido a que este factor no incide en su desarrollo micelial (López-Courrau *et al.* 2018). Esta situación podría también explicar la presencia de este hongo en las muestras de suelo con pH ácido en los cantones Limón, Siquirres, Guácimo y Talamanca.

Con respecto al hongo *P. lilacinum* el cual fue aislado de muestras de suelo del cantón de Talamanca el análisis de pH fue de 5,98. Este hongo presenta una gran tolerancia al pH, debido a que el pH óptimo para su desarrollo es de 2,0 a 10,0 (Manobanda-Duche 2022), por lo que puede adaptarse a diferentes condiciones de suelo.

## CONCLUSIONES

Los hallazgos de este estudio proporcionan información valiosa sobre la diversidad y potencial de los hongos nematófagos en el control de plagas y enfermedades en cultivos de banano. Además, destaca la importancia de realizar análisis relacionados al desarrollo de estrategias efectivas para su identificación como las utilizadas en esta investigación y a la implementación y aplicación en programas de manejo integrado de plagas.

La identificación precisa de estos antagonistas mediante diversos criterios establece la base para que investigaciones futuras puedan explorar su potencial como agentes de control de nematodos fitoparásitos, no solo en cultivos de musáceas, sino también en otros sistemas productivos especialmente en países en desarrollo.

Según los resultados, se recomienda, amplificar y secuenciar otras regiones del genoma de

*Talaromyces* sp. y así obtener un estudio genético más completo y detallado que permita la identificación a nivel de especie ya que en las bases de datos de secuencias genéticas no existe suficiente información sobre este aislamiento.

Este estudio resalta la necesidad de realizar investigaciones adicionales sobre los potenciales HN en plantaciones de banano y otros cultivos en la región. Es fundamental llevar a cabo pruebas de patogenicidad para asegurar que algunos de los potenciales HN, no solo sean eficaces en la lucha contra los nematodos, sino que también sean seguros para las plantas hospedadoras. Las perspectivas futuras del uso de HN como agentes de control biológico son muy prometedoras, ya que cada vez se utilizan más en programas de manejo integrado de plagas, debido a la preocupación que existe por los efectos negativos que provocan los pesticidas sintéticos al medio ambiente y a la salud humana.

## AGRADECIMIENTOS

Las personas autoras desean agradecer toda la ayuda brindada a los ingenieros agrónomos Steffany Orozco Cayasso y Jefferson Araúz Badilla.

## LITERATURA CITADA

- Acuña-Segura, R; Brenes-Madriz, J. 2020. Evaluación en casa malla del efecto de cuatro productos biológicos para el combate de jobotos (*Phyllophaga* sp.). Revista Tecnología en Marcha 33(4):140-154. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v33i4.4376>
- Ali, A; Eldeeb, A; Ramadan, M; El-Ashry, R. 2022. Nematicidal Effect of Three *Trichoderma* spp. on the Suitability of Tomato Plants for *Meloidogyne incognita* Reproduction. Egyptian Journal of Agronematology 21(2):59-78. DOI: 10.21608/EJAJ.2022.257669
- Almaraz-Sánchez, A; Alvarado-Rosales, D; Tlapal-Bolaños, B; David-Espinoza, V. 2012. Identificación de hongos antagonistas a *Phytophthora cinnamomi* Rands en bosques de encino del Arrayanal, Colima y Tecoanapa, Guerrero. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 18(3):341-355. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.09.061>

- Álvarez-Ortega, V; Gutiérrez-Miranda, C. 2022. Uso de *Purpureocillium lilacinum*, *Trichoderma harzianum* y *Pimenta dioica* (L.) Merrill para control de nematodos en plátano (*Musa paradisiaca* L.), en el centro experimental El Plantel (en línea). Tesis Lic. Nicaragua. Universidad Nacional Agraria. 44 p. Consultado 12 ene. 2023. Disponible en <https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/4510>
- Amatuzzi, RF; Poitevin, CG; Poltronieri, AS; Zawadneak, MAC; Pimentel, IC. 2017. Entomopathogenic fungi as a biological control agent against *Duponchelia fovealis* Zeller (Lepidoptera: Crambidae). Basic Pathology, Federal University of Parana State, Centro Politécnico, Curitiba, Parana 91531990. Brasil 10(1):18.
- Anama, Y; Díaz, R; Duarte, D; Lagos, T. 2021. Morphological and pathogenic characterization of *Fusarium oxysporum* in Lulo (*Solanum* spp.). Revista de Ciencias Agrícolas 38(1):20-37. DOI: <https://doi.org/10.22267/rcia.213801.142>
- Barnett, H; Hunter, B. 1998. Illustrated genera of imperfect fungi. The American Phytopathological Society. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington State University, Pullman. USA, St. Paul, Minnesota, APS Press. 218 p.
- Barrios, M. 2006. Estudio de hongos endofíticos como inductores de resistencia para el control de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) en plátano. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 56 p.
- Barrón, GL. 1977. The nematode destroying fungi. Lancaster, Pennsylvania, USA, Lancaster Press, Inc. 140 p.
- Cañizares-Monteros, C. 2003. Estudio sobre poblaciones de hongos endofíticos provenientes de suelos supresivos al nematodo barrenador *R. similis* (Cobb) Thorne en plantaciones comerciales de plátano en la zona de Talamanca, Costa Rica (en línea). Tesis M.Sc. CATIE. Costa Rica. 87 p. Consultado 15 nov. 2022. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5562>
- Capcha-Ospina, E. 2017. Eficiencia de hongos nematófagos en el control de *Meloidogyne exigua* Goeldi, en vivero de *Coffea arabica* L. variedad catimor (en línea). Tesis Lic. Perú. Universidad Nacional del Centro del Perú. 105 p. Consultado 20 oct. 2023. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4027>
- Cardoso, E; Ferreira, D; Moreira, G; Pfening, L; Rodrigues-Filho; Abreu, Lucas. 2021. MALDI-TOF mass spectrometry-based identification of Eurotiales from different substrates and locations in Brazil. Mycological Progress 20:539-548. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11557-021-01691-y>
- Carranza-González, G. 2014. Evaluación in vitro de la patogenicidad del hongo *Paecilomyces lilacinus* sobre el nemátodo *Pratylenchus* sp (en línea). Tesis Lic. Guatemala. Universidad Rafael Landívar. 54 p.
- Cedeño-Franco, MJ. 2017. Determinación de los costos del uso de nematocidas en el cultivo de banano en la hacienda Adriana Carolina, del cantón Valencia, provincia de Los Ríos (en línea). Tesis Bach. Ecuador, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. 88 p. Consultado 15 dic. 2022. Disponible en <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/3351>
- Chaves-García, MO. 2006. Producción de *Trichoderma* sp. y evaluación de su efecto en cultivo de crisantemo (*Dendranthema grandiflora*) (en línea). Tesis Lic. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Repositorio Universidad Javeriana. s. p. Consultado 13 jul. 2023. Disponible en <https://repositorio.javeriana.edu.co/handle/10554/8312>
- Chaves-Méndez, NP. 2007. Utilización de bacterias y hongos endofíticos para el control biológico del nemátodo barrenador *Radopholus similis* (Cobb) Thorn (en línea). Tesis M.Sc. CATIE, Costa Rica. Repositorio del CATIE. s. p. Consultado 05 feb. 2024. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5635>
- Chinchilla-Salazar, G; Blanco-Meneses, M; Castro-Zúñiga, Ó. 2020. Identificación molecular y morfológica de las especies de *Fusarium* spp., asociadas al cultivo de pimienta negra (*Piper nigrum*) en Sarapiquí y Guatuso en Costa Rica. Agronomía Costarricense 44(2):1-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v44i2.43087>
- Cole, GT; Kendrick, B. 1981. Biology of Conidial Fungi, Volumen 1. Academic Press. EUA. 486 p.
- Cooke, R; Godfrey, B. 1964. A key to the nematode-destroying fungi. Transactions of the British Mycological Society 47(1):61-74. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(64\)80081-4](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(64)80081-4)
- Cortez-Hernández, MA; Rojas-Martínez, R; Pérez-Moreno, J; Ayala-Escobar, V; Silva-Valenzuela, M; Zavaleta-Mejía, E. 2019. Control biológico de *Nacobbus aberrans* mediante hongos antagonistas (en línea). Tesis M.Sc. Texoco, México. Institución de enseñanza e investigación en Ciencias Agrícolas. 53 p. Consultado 19 abr. 2023. Disponible en <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/3189>
- Deshmukh, S. 2003. The Maintenance and Preservation of Keratinophilic Fungi and Related Dermatophytes. Mycoses 46:203-207, Alemania. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1439-0507.2003.00860.x>
- EPP0 (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2008. Diagnostics Report *Radopholus similis*. EPP0 Bull. 38:374-378.

- Espinel-Correal; Torres-Torres, L; Villamizar-Rivero, L; Bustillo-Pardey, A; Zuluaga-Mogollón, I; Cotes-Prado, A. 2018. Hongos entomopatógenos en el control biológico de insectos plaga. COTES, AM Control biológico de fitopatógenos, insectos y ácaros (en línea). Mosquera, Colombia: Agrosavia. Repositorio Agrosavia. s. p. Consultado 11 mar. 2023. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/329247684>
- Estévez, C; Abad, G. 2009. *Fusarium solani* species complex newly identified to cause root rot in hydroponically grown lettuce and cilantro in Puerto Rico. *Plant Pathology* 58(4):801-801.
- Fernández-Jiménez, M; Bulla-Castañeda, D; Sanabria-Villate, A; Pulido-Medellín, M. 2019. Implementación de hongos nematófagos para el control de parásitos gastrointestinales (en línea). *Pensamiento y Acción* (27):7-20. Consultado 23 oct. 2022. Disponible en [https://revistas.upc.edu.co/index.php/pensamiento\\_accion/article/view/10201](https://revistas.upc.edu.co/index.php/pensamiento_accion/article/view/10201)
- Ferreri, N. 2020. Caracterización de la microbiota de suelos salino-sódicos de cangrejales de la Reserva Campos del Tuyú Prov. de Buenos Aires: Su potencial como fuente de enzimas de interés biotecnológico. Tesis Ph.D. Argentina. Universidad Nacional de La Plata. 177 p. DOI: <https://doi.org/10.35537/10915/121954>
- Florentin, M. 2022. FLOR Biotecnología (en línea). Facultad de Ciencias Químicas, Mcal. López, San Lorenzo, Paraguay. s. p. Consultado 02 ene. 2024. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucleotide/MZ442656.1>
- Gezgin, Y; Gül, D; Şenşatar, S; Kara, C; Sargın, S; Sukan, F. 2020. Evaluation of *Trichoderma atroviride* and *Trichoderma citrinoviride* growth profiles and their potentials as biocontrol agent and biofertilizer. *Turkish Journal of Biochemistry* 45(2):163-175. DOI: <https://doi.org/10.1515/tjb-2018-0378>
- Gómez, M; Mario, J; Rojas, M. 2008. Efecto de dos especies de hongos simbioses en el crecimiento de plátano (*Musa AAB*) cv “Curaré” y el control del nematodo barrenador *R. similis* Cobb (en línea). *Revista Tumbaga* 3:30-42. Ibagué: Universidad del Tolima. Repositorio RIUT. Consultado 26 jun. 2023. Disponible en <http://repository.ut.edu.co/handle/001/1353>
- Gortari, C; Cazau, C; Hours, R. 2007. Hongos nematófagos de huevos de *Toxocara canis* en un paseo público de La Plata, Argentina. *Revista Iberoamericana de Micología* 24(1):24-28. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1130-1406\(07\)70005-0](https://doi.org/10.1016/S1130-1406(07)70005-0)
- Hernández-Medina, C; Velasco Belalcázar, M; Gómez-López, E; Henao-Henao, E. 2015. Caracterización morfológica y molecular de aislados de *Fusarium* asociadas aguacate (*Persea americana* Mill), en el Valle del Cauca. *Fitopatología Colombiana* 39(2):51.
- Hoyos-Carvajal, L; Chaparro, P; Abramsky, M; Chet, I; Orduz, S. 2008. Evaluación de aislamientos de *Trichoderma* spp. contra *Rhizoctonia solani* y *Sclerotium rolfsii* bajo condiciones in vitro y de invernadero (en línea). *Agronomía Colombiana* 26(3):451-458. Consultado 23 jun. 2023. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/11477>
- Iñiguez-Moreno, M; Calderón-Santoyo, M; Barros-Castillo, J.C; Miss-Zacarías, D. M; Díaz, J. A; Ragazzo-Sánchez, J. A. 2022. Nanofibers added with citral: Characterization and their application to postharvest control of *Fusarium pseudocircinatum* in bananas. *Journal of Food Processing and Preservation* 46, e17188. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.17188>
- Jiménez-Saa, H. 1982. Anatomía del sistema de clasificación Holdridge (zonas de vida, utilización de la tierra, formaciones vegetales) (en línea). Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Repositorio CATIE. 29 p. Consultado 15 mar. 2023. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/401>
- Jiménez-Zappa, R. 2013. Diversidad de géneros de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a pasto colosuana (*Bothriochloa pertusa* (L) A. Camus) en suelos compactados y no compactados del municipio de San Marcos departamento de Sucre (en línea). Tesis Lic. Colombia, Universidad de Sucre, Repositorio Universidad de Sucre. s. p. Consultado 05 nov. 2022. Disponible en <http://repositorio.unisucre.edu.co/handle/001/570>
- Kee, Y; Zakaria, L; Mohd, M. 2020. Morphology, phylogeny and pathogenicity of *Fusarium* species from *Sansevieria trifasciata* in Malaysia. *Plant Pathology* 69(3):442-454. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppa.13138>
- Lazcano-Torres, G; Ángeles-Hernández, S; Ojeda-Ramírez, D; Mendoza-De Gives, P; Peláez-Acero, A. 2015. Identificación taxonómica del hongo nematófago *Arthrobotrys oligospora* aislado en Tulancingo de bravo, Hidalgo. *Boletín De Ciencias Agropecuarias Del ICAP1(2)*. DOI: <https://doi.org/10.29057/icap.v1i2.989>
- Little, G; Gordon, M. 1967. Survival of Fungal Cultures Maintained Under Mineral Oils for Twelve Years. *Mycologia* 59 (4):733-736. DOI: <https://doi.org/10.2307/3757105>
- López-Aguilar, R; Murillo-Amador, B; Benson-Rosas M; López-Arce, E; Valle-Meza, G. 2002. Manual de análisis químicos de suelos. Editorial. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, B.C.S. México. s. p. Consultado 08 abr. 2023. Disponible en <http://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/2065>

- López-Courrau, K; Rivera-Méndez, W; Brenes-Madriz, J; Zúñiga-Vega, C. 2018. Establecimiento de un protocolo para el crecimiento y multiplicación de *Setophoma terrestris* y *Fusarium* spp. provenientes de un cultivo de cebolla (*Allium cepa* L). Revista Tecnología en Marcha 31(4):37-48. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v31i4.3958>
- Liu, Y; Whelen, S; Hall, B. 1999. Phylogenetic relationships among ascomycetes: evidence from an RNA polymerase II subunit. Molecular Biology and Evolution 16(12):1799-1808. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a026092>
- Lyubenova, A; Rusanova, M; Nikolova, M; Slavov, S. 2023. Plant extracts and *Trichoderma* spp: possibilities for implementation in agriculture as biopesticides. Biotechnology & Biotechnological Equipment 37(1):159-166. DOI: <https://doi.org/10.1080/13102818.2023.2166869>
- Macías-Echeverri, E; Marín-Pavas, A; Osorio-Vega, W; Hoyos-Carvajal, L. 2019. Suelos y microorganismos rizosféricos asociados en la reserva de biosfera "Seaflower". Journal of the Selva Andina Biosphere 7(2):73-87.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Costa Rica). 2022. Nama Musáceas. Biblioteca virtual. Asuntos Internacionales. Costa Rica. s. p.
- Maldonado-Haro, M. 2019. Caracterización molecular de cepas de *Penicillium expansum* de manzanas provenientes de España y Argentina (en línea). Tesis M.Sc. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. 69 p. Consultado 15 ene. 2023. Disponible en [https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis\\_n6672\\_MaldonadoHaro](https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6672_MaldonadoHaro)
- Maldonado-Paucar, D. 2016. Evaluación de diferentes dosis de hexametáfosfato de sodio (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>, en la determinación de tres tipos texturales de suelo, mediante el método de Bouyoucos (en línea). Tesis Lic. Ecuador. Universidad Central del Ecuador. 77 p. Consultado 07 jul. 2023. Disponible en <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/8135>
- Manobanda-Duche, ND. 2022. Evaluación de la eficiencia de nematocidas biológicos sobre poblaciones de *Meloidogyne incognita*, en el cultivo de pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*), a nivel de invernadero, en el cantón Joya de Los Sachas (en línea). Tesis Lic. El Coca, Ecuador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 66 p. Consultado 15 feb. 2024. Disponible en <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5968>
- Mesa-Vanegas, AM; Marín, A; Calle-Osorno, J. 2019. Metabolitos secundarios en *Trichoderma* spp. y sus aplicaciones biotecnológicas agrícolas. Actualidades biológicas, 41(111):32-44. DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.v41n111a02>
- Morales-García, D. 2014. Bioprospección de hongos endófitos para el control biológico del nematodo barrenador *R. similis* (Cobb) Thorne en el cultivo del banano (en línea). Tesis M.Sc. Costa Rica, Tecnológico de Costa Rica. 54 p. Consultado 23 jun. 2023. Disponible en <https://hdl.handle.net/2238/5797>
- Moo-Koh, F. 2018. Contribución al estudio de especies de *Trichoderma* con aplicación agrícola. Tesis Ph.D. México, Tecnológico Nacional de México. 86 p.
- Nesta-Silva; Rodrigues-Nunes, J. 2014. O Tecnógeno na cidade de Presidente Prudente-SP / The Technogene in the city of Presidente Prudente, São Paulo, Brazil. Sociedade & Natureza 26(3). DOI: <https://doi.org/10.1590/1982-451320140307>
- Nelson, P; Dignani, M; Anaissie, E. 1994. Taxonomy, biology, and clinical aspects of *Fusarium* species. Clinical Microbiology Reviews 7(4):479-504.
- Núñez-Solís, J. 1996. Manual de Laboratorio de Edafología. Costa Rica, EUNED. 160 p.
- O'Donnell, K; Sutton, D; Fothergill, A; McCarthy, D; Rinaldi, M; Brandt, M; Geiser, DM. 2008. Molecular phylogenetic diversity, multilocus haplotype nomenclature, and in vitro antifungal resistance within the *Fusarium solani* species complex. Journal of Clinical Microbiology 46(8):2477-2490. DOI: <https://doi.org/10.1128/jcm.02371-07>
- Paparu, P; Niere, B; Gold, C; Coyne, D; Adipala, E; Dubois, T. 2003. Colonization of banana by fungal endophytes. African Crop Science Conference Proceedings 6:381-384.
- Pérez-Rivera, N. 2014. Evaluación de diferentes tratamientos químicos y biológicos para el control preventivo de *Fusarium* spp. en el cultivo de arveja, diagnóstico y servicios en las fincas y planta de empaque de grupo hortícola de exportación Ghortex municipio de Sumpango, Chimaltenango, Guatemala, c.a. (en línea). Tesis Lic. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Repositorio de Universidad de San Carlos de Guatemala. s. p. Consultado 15 nov. 2022. Disponible en [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01\\_2917.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2917.pdf)
- Peraza-Padilla, W; Orozco-Aveces, M; Esquivel-Hernández, A; Rivera-Coto, G; Chaverri-Fonseca, F. 2011. Aislamiento e identificación de hongos nematófagos nativos de zonas arroceras de Costa Rica. Agronomía Mesoamericana 22(2):233-243. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v22i2.11797>
- Peterson, S; Jurjević, Ž. 2017. New species of *Talaromyces* isolated from maize, indoor air, and other substrates. Mycologia 109(4):537-556. DOI: [10.1080/00275514.2017.1369339](https://doi.org/10.1080/00275514.2017.1369339)
- Poveda-Arias, J. 2018. Investigación básica y aplicada en la interacción *Trichoderma*-Brassicaceae (en línea). Tesis Ph.D. España, Universidad de Salamanca. 286 p. Consultado 04 ene. 2023. Disponible en <http://hdl.handle.net/10366/139861>

- Pozo-Enríquez, AE. 2020. *Trichoderma asperellum* en el enriquecimiento proteico de residuos lignocelulósicos (en línea). Tesis Ph.D. Ecuador, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra. 106 p. Consultado 15 abr. 2023. Disponible en <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/39476>
- PROCOMER (Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica). 2020. Anuario Estadístico 2019. s. p.
- Quevedo, A; Magdama, F; Castro, J; Vera-Morales, M. 2022. Interacciones ecológicas de los hongos nematófagos y su potencial uso en cultivos tropicales. *Scientia Agropecuaria* 13(1):97-108. DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.009>
- Ridkaew, R; Luangsa, J; Hywel, N; Samson, R. 2012. A phylogeny including the medically important *Paecilomyces lilacinus*. *Phylogenetics Laboratory, National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, Thailand*. s. p.
- Rivera-Méndez, W; Brenes-Madriz, J; Zúñiga-Vega, C. 2018. Efectos de la aplicación de *Trichoderma asperellum* y su filtrado en el crecimiento de almácigos de cebolla (*Allium cepa*). *Tecnología en Marcha* 31(2):98-105.
- Robinson, JC; Daneel, M; Schoeman, PS. 1999. Cultural practices in relation to integrated pest management in bananas (en línea). *Mobilizing IPM for sustainable banana production in Africa*. INIBAP, Montpellier, France. p. 283-289. Consultado 20 oct. 2022. Disponible en [www.musalit.org/seeMore.php?id=5517](http://www.musalit.org/seeMore.php?id=5517)
- Rodríguez-Labastida, M. 2019. Evaluación nematocida in vitro de filtrados obtenidos a partir de hongos nematófagos cultivados en medios elicitados con extracto larval del parásito *Haemonchus contortus* (en línea). Tesis M.Sc. Yucatán, México, Centro de Investigación Científica de Yucatán. 141 p. Consultado 15 dic. 2023. Disponible en <https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1626>
- Rojas-Contreras, L. 2021. Estrategia de mercadeo para el lanzamiento del fungicida Belanty® para el combate de *Pseudocercospora fijiensis* en el cultivo de banano en Costa Rica (en línea). Tesis M.Sc. Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 111 p. Consultado 05 jun. 2023. Disponible en <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/f9b17a1b-9b01-4736-b26b-37991361c645/content>
- Rojas-Villacorta, W; Cox-Trigoso, G; Burgos Wilson, N; Morey-León, G; Wilson-Krugg, J. 2017. Aislamiento, selección e identificación de especies nativas de *Trichoderma* spp. con efecto biocontrolador sobre nematodos noduladores que afectan al cultivo de *Asparagus officinalis* de la empresa Agroindustrial Camposol S.A. *Veritas* 15(1):80-91.
- Samuels, GJ; Ismael, A; Bon, MC; De Respínis, S; Petrini, O. 2015. *Trichoderma asperellum* sensu lato consists of two cryptic species. *Systematic Mycology and Microbiology Laboratory, USDA. Mycologia* 102(4):944-966. DOI: <https://doi.org/10.3852/09-243>
- Sánchez-Miranda, MD; Moreno-Mayorga, LF; Páramo-Aguilera, LA. 2021. Identificación morfológica y molecular de especies autóctonas *Trichoderma* spp., aisladas de suelos de importancia agrícola. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo* 11(1):26-42. DOI: <https://doi.org/10.5377/elhigo.v11i1.11715>
- Sanger, F; Nicklen, S; Coulson, AR. 1977. DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 74(12):5463-5467. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.74.12.5463>
- Silva, SD; Carneiro, RMDG; Faria, M; Souza, DA; Monnerat, RG; Lopes, RB. 2017. Evaluation of *Pochonia chlamydosporia* and *Purpureocillium lilacinum* for Suppression of *Meloidogyne enterolobii* on Tomato and Banana. *Journal of Nematology* 49(1):77-85. DOI: <https://doi.org/10.21307/jofnem-2017-047>
- Silva-Valenzuela, M; Rojas-Martínez, RI; Manzanilla-López, RH; Macías-Rubalcava, ML; Aranda-Ocampo, S; Zavaleta-Mejía, E. 2020. Hongos endófitos: una alternativa biológica para el manejo de nematodos fitoparásitos. *Nematropica* 50(1):101-117.
- Stewart, JE; Kim, MS; James, RL; Dumroese, RK; Klopfenstein, NB. 2006. Molecular characterization of *Fusarium oxysporum* and *Fusarium commune* isolates from a conifer nursery. *Phytopathology* 96(10):1124-1133. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-1124>
- Tarnowski, TL; Pérez-Martínez, JM; Ploetz, RC. 2010. Fuzzy pedicel: A new postharvest disease of banana. *Plant Disease* 94:621-627.
- Todd, J; Islas, I; Canché, B. 2019. Análisis bioquímico-molecular de la interacción de *Pseudocercospora fijiensis* y *Trichoderma harzianum* (en línea). Tesis M.Sc. Yucatán, México. Centro de Investigación Científica de Yucatán. 149 p. Consultado 15 abr. 2023. Disponible en <http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1635>
- Triveni, S; Prasanna, R; Saxena, AK. 2012. Optimization of conditions for in vitro development of *Trichoderma viride*-based biofilms as potential inoculants. *Folia Microbiologica* 57:431-437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12223-012-0154-1>
- Umaña-Castro, J; Orozco-Cayasso, S; Umaña-Castro, R; Molina-Bravo, R. 2019. Identificación molecular y características fisiológicas de aislamientos de *Trichoderma* para el biocontrol de dos patógenos en la piña. *Revista De Ciencias Ambientales* 53(1):125-142. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.53-1.7>

- Valencia-Serna, R; Guzmán- Piedrahita, O; Villegas-Estrada, B; Castaño- Zapata, J. 2014. Manejo integrado de nematodos fitoparásitos en almácigos de plátano Dominico Hartón (*Musa* AAB Simmonds). *Revista Luna Azul* (39):165-185.
- Valencia-Yah, T; Martin-Mex, R; Cruz-López, JR; Pérez-Brito, D; Magana-Álvarez, A; Cortes-Velázquez, A; Nexticapán-Garcéz, A. 2023. Identification and molecular characterization phytopathogenic fungi in Agave tequilana in Mexico (en línea). México. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucleotide/OR388100.1>
- Van Diepeningen, AD; Feng, P; Ahmed, S; Sudhadham, M; Bunyaratavej, S; Hoog, GS. 2014. *Fusarium* infections in a tropical dermatologic clinic: a MLST and evidence-based evaluation (en línea). *Ecology of Clinical Fungi*. The Netherlands. Consultado 23 jun. 2023. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucleotide/KF255484.1>
- Varela-Benavides, I; Durán-Mora, J; Guzmán-Hernández, T de J. 2017. Evaluación in vitro de diez cepas de hongos nematófagos para el control de *Meloidogyne exigua*, *Meloidogyne incognita* y *Radopholus similis*. *Revista Tecnología en Marcha* 30(1):27-37.
- Vargas, A; Watler, W; Morales, M; Vignola, R. 2017. Ficha técnica cultivo de banano. Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de banano en Costa Rica. s. p.
- Visagie, C; Houbraeken, J. 2020. Updating the taxonomy of *Aspergillus* in South Africa. *Studies in mycology* 95(1):253-292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2020.02.003>
- Visagie, C; Yilmaz, N; Seifert, K. 2020. New fungi isolated from house dust. *Mycology, Agriculture and Agri-Food, Canada* (en línea). s. p. Consultado 23 jun. 2023. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucleotide/KY469196.1>
- Wang, L; Wang, JM; Li, XF; Xu, YM. 2018. The evaluation of DNA barcode for *Fusarium*. College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, China. s. p.
- Wang, X. 2020. Identification and pathogenic *Fusarium* of potato root rot Ningxia Hui Autonomous Region (en línea). China. Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Institute of Plant Protection, Yellow River Road, ying chuan, ning xia 750002. Consultado 15 feb. 2024. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucleotide/MT560381.1>
- Yang, M; Zhang, H; Van der Lee, T; Waalwijk, C; Van, A; Feng, J; Chen, W. 2020. Population genomic analysis reveals a highly conserved mitochondrial genome in *Fusarium asiaticum*. *Frontiers in Microbiology* 11:839. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00839>





Nota técnica

## DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE REPETICIONES PARA UN EXPERIMENTO EN AGRICULTURA: IMPORTANCIA DE LA VARIABILIDAD Y TAMAÑO DEL EFECTO

Jorge Claudio Vargas-Rojas<sup>1/\*</sup>, Alejandro Vargas-Martínez<sup>2</sup>, Eduardo Corrales-Brenes<sup>3</sup>

**Palabras clave:** diseño experimental; análisis de varianza; probabilidad; inferencia estadística; análisis estadístico.

**Keywords:** experimental design; analysis of variance; probability; statistical inference; statistical analysis.

**Recibido:** 23/04/24

**Aceptado:** 26/06/24

### RESUMEN

**Introducción.** El tamaño del efecto y la variabilidad son factores relevantes en la estimación del número de repeticiones necesario en un experimento, cuyo impacto suele ser desconocido por el investigador. **Objetivo.** Analizar el efecto de la variabilidad y el tamaño del efecto en el número de repeticiones necesario en experimentación agrícola. **Materiales y métodos.** Se utilizaron los parámetros de correlación espacial estimados a partir de ensayo de uniformidad en el cultivo de arroz para realizar 10 000 simulaciones de campos aleatorios. En cada simulación se conformaron 16 unidades experimentales de 24 m<sup>2</sup> y se ajustó un análisis de varianza para estimar la varianza residual promedio como escenario A. En adición, se propuso un escenario B donde se usó el cuantil 95 de las varianzas estimadas. El tamaño del efecto se definió con

base en los resultados de un metaanálisis sobre el efecto de prácticas agrícolas en el rendimiento del arroz y resultó ser un 15% de la media general de los datos del ensayo de uniformidad. También, se propusieron tamaños de efecto adicionales del 10% y 5% de la media general. **Resultados.** En el escenario A, se necesitaron cuatro repeticiones para alcanzar una potencia del 0,91 y detectar un efecto del 15%, mientras que seis repeticiones fueron necesarias para detectar un efecto del 10% con una potencia de 0,81. En el escenario B, cinco repeticiones lograron una potencia del 0,86 para detectar un efecto del 15%, mientras que nueve repeticiones fueron requeridas para detectar un efecto del 10% con una potencia del 0,82. En ninguno de los dos escenarios se alcanzó una potencia del 0,80 para detectar un efecto del 5%. **Conclusión.** Mientras más pequeño sea el tamaño del efecto a detectar y mayor sea la varianza residual, se requerirá más repeticiones para lograr una potencia de prueba del 0,80. Se

\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: jorgeclaudio.vargas@ucr.ac.cr

1 Universidad de Costa Rica, Sede Regional de Guanacaste, Liberia, Costa Rica.  
 0000-0002-1139-2148.

2 Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.  
 0000-0001-8039-8984.

3 Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.  
 0000-0002-7862-7546.

deben considerar estos dos factores al planificar experimentos en agricultura.

## ABSTRACT

**Determining the number of repetitions in agricultural experiments: Importance of effect size and variability. Introduction.** The effect size and variability are relevant factors in estimating the number of repetitions in an experiment, where their impact is often unknown to the researcher. **Objective.** To analyze the effect of the variability and effect size on the number of repetitions required in agricultural research. **Materials and methods.** The spatial correlation parameters estimated from the uniformity trial in the rice crop were used to perform 10,000 simulations of random fields. In each simulation, 16 experimental units of 24 m<sup>2</sup> were formed, and an analysis of variance was adjusted to estimate the average residual variance, called scenario A.

Additionally, a scenario B was proposed, where the 95th percentile of the estimated variances was used. The effect size was defined based on the results of a meta-analysis on the effect of agricultural practices on rice yield, and resulted in a 15% of the overall mean of the uniformity trial data. Additional effect sizes of 10% and 5% of the overall mean were also proposed. **Results.** In scenario A, four repetitions were needed to achieve a power of 0.91 and detect a 15% effect, while six repetitions were necessary to detect a 10% effect with a power of 0.81. In scenario B, five repetitions achieved a power of 0.86 to detect a 15% effect, while nine repetitions were required to detect a 10% effect with a power of 0.82. Neither of the scenarios achieved a power 0.80 to detect a 5% effect. **Conclusion.** The smaller the effect size to be detected and the greater the residual variance, the more repetitions were required to achieve a test power of 0.80. These two factors should be considered when planning experiments in agriculture.

## INTRODUCCIÓN

En las ciencias naturales se realizan diferentes tipos de estudios, que se pueden clasificar en estudios observacionales y estudios experimentales (Shaffer y Johnson 2008). En general, los estudios experimentales son mayoritariamente comparativos, ya que se comparan tratamientos (Vargas-Rojas 2021). En experimentación agrícola, después de definir los tratamientos, estos se asignan aleatoriamente a las unidades de acuerdo con el diseño experimental que mejor se ajusta al estudio en cuestión. Posteriormente, se registran una o varias variables de respuesta. Finalmente, mediante el uso de técnicas de análisis estadístico, se estiman las medias de la variable de respuesta para cada tratamiento y se realizan pruebas de hipótesis con el objetivo de compararlas.

Para realizar la comparación, cuando la variable respuesta es cuantitativa y se asume que se distribuye normal, se recurre al análisis de

varianza (ANDEVA), el cual se basa en el estadístico F (Robledo 2015). El ANDEVA consiste en el contraste de una hipótesis nula ( $H_0$ ) o de no efecto de tratamientos contra una hipótesis alternativa ( $H_A$ ) que indica la existencia de efectos no nulos (Mesquida *et al.* 2023). En este contraste de hipótesis se pueden cometer dos tipos de errores; tipo I y tipo II. El error tipo I es el error que se comete al rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera, y tiene una probabilidad asociada, que es el nivel de significancia de la prueba. El error tipo II ocurre cuando no se rechaza la hipótesis nula y esta es falsa; la probabilidad de cometer este error se denota como  $\beta$ , que es la probabilidad de no encontrar diferencias cuando realmente existen (Montgomery 2019).

El estudio de la potencia estadística se basa en la estimación de la probabilidad de cometer error tipo II. Se busca minimizar esta probabilidad, con el objetivo de maximizar su complemento, la potencia estadística (Lapeña *et*

*al.* 2011, Kinney *et al.* 2020). Autores como Brysbaert y Stevens (2018) y Cohen (1988) sugieren que se debe establecer una potencia de prueba de al menos el 0,80 (80%) para detectar un efecto, bajo el supuesto de que dicho efecto existe en la población estudiada. Aunque este valor de 0,80 es comúnmente utilizado y se considera un umbral mínimo aceptable, otros autores como Lenth (2001) indican que la potencia de prueba debe ser mayor a 0,85 o 0,90. La idea subyacente es asegurar una probabilidad razonable de detectar el tamaño de efecto especificado.

La estimación de la potencia depende de cinco elementos interrelacionados: 1) nivel de significancia, 2) tamaño del efecto, 3) variabilidad residual, 4) número de repeticiones y 5) diseño del experimento (Brandmaier *et al.* 2018). El nivel de significancia es controlado por el investigador (Kotrlik *et al.* 2011), mientras que el diseño depende de las condiciones del experimento. Por lo tanto, la potencia de la prueba para un nivel de significancia está determinada por el número de repeticiones, el tamaño de efecto deseado entre los tratamientos y una variabilidad dada (Gbur *et al.* 2012). El tamaño del efecto se refiere a la diferencia mínima que el investigador considera importante entre las medias de la variable respuesta de un par de tratamientos (Kuehl 2001). La variabilidad es la varianza residual del experimento y el número de repeticiones es la cantidad de unidades experimentales independientes por tratamiento, necesarias para alcanzar cierto nivel de potencia (Cohen 1992).

La importancia de estimar la potencia de prueba de manera prospectiva radica en que, mediante esta estimación, es posible asegurar a priori la capacidad de distinguir un tamaño de efecto específico de la variación inherente de la variable respuesta, de naturaleza aleatoria (Gent *et al.* 2018). Sin embargo, a pesar de que el número necesario de repeticiones es una pregunta común entre los investigadores, su estimación no forma parte de la planificación de experimentos en el ámbito agrícola (González-Lutz 2008). Por tanto, es común encontrar investigaciones donde se concluye que no existen diferencias

significativas entre tratamientos, pero al no fijar una potencia de prueba, la falta de significancia puede deberse a un número de repeticiones inadecuado para detectar un tamaño de efecto (Williams *et al.* 2023), lo que conlleva a resultados erróneos o inconclusos (Cohen 1990, Kozak y Piepho 2017).

Para poder estimar la potencia de la prueba, es necesario conocer la varianza residual del experimento, empero, esta solo se conoce después de obtener las observaciones y ajustar el modelo de ANDEVA. Por consiguiente, para realizar estimaciones de la potencia de la prueba, se puede utilizar un aproximado de la varianza residual. Según Dale y Fortin (2014), el primer paso importante es conocer las características de un sitio antes de diseñar el experimento. Para ello, se requiere un estudio piloto o un ensayo de uniformidad. Estos últimos han sido utilizados para estimar el tamaño de la unidad experimental, comparar la eficiencia de distintos diseños experimentales, estudiar la variabilidad del suelo y realizar simulaciones de campos aleatorios (Fagroud y Van Meirvenne 2002, Richter y Kroschewski 2012).

En adición a lo anterior, se debe considerar que la definición del tamaño del efecto no es un asunto arbitrario. Desde un punto de vista teórico es poco probable que la diferencia numérica entre dos medias sea exactamente cero (Nakagawa y Cuthill 2007). Es decir, en la mayoría de los casos será un valor distinto de cero. Sin embargo, no siempre una diferencia no nula es relevante para el investigador, sino que depende de lo que implica esta diferencia en términos de rendimiento o producción. A manera de ejemplo, un investigador puede definir el tamaño del efecto en relación con el beneficio financiero que puede derivarse de una práctica de manejo, como el uso de variedades. Así, si un aumento del rendimiento del 10% debido al uso de una nueva variedad resulta en rédito económico, este tamaño del efecto sería de interés. Por lo tanto, en la etapa de planificación del experimento, se debe definir el tamaño del efecto de forma que tome en cuenta criterios

biológicos, físicos, económicos, científicos y/o prácticos (Apuan 2014).

Para cuantificar el tamaño del efecto, se han identificado más de 61 estadísticos, tanto estandarizados como no estandarizados. Entre los más utilizados se encuentran la diferencia esperada entre dos medias (una medida no estandarizada) y la “*d*” de Cohen (una medida estandarizada). Siempre que sea interpretable, es preferible utilizar la diferencia no estandarizada entre las dos medias (Nakagawa y Cuthill 2007), para obtener una estimación de esta magnitud se puede recurrir a resultados de estudios de metaanálisis (Krupnik *et al.* 2019).

En el contexto de la investigación agrícola en Costa Rica, la mayoría de los estudios se centran en pruebas paramétricas (por ejemplo, ANDEVA o regresión), y rara vez abordan la potencia estadística desde una perspectiva prospectiva (Vargas-Rojas 2021). Así, el objetivo de este estudio fue analizar cómo varía la potencia de prueba en función de la variabilidad y el tamaño del efecto, para que los investigadores comprendan la importancia de estos elementos y mejoren la estimación del número de repeticiones utilizados en sus experimentos agrícolas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Elementos considerados para la estimación de la potencia estadística de la prueba

Se estableció un nivel de significancia de 0,05 como un valor comúnmente utilizado como umbral de error tipo I en experimentos agrícolas (Kozak y Piepho 2017). También se supuso que el campo experimental es razonablemente homogéneo, por lo que se empleó un diseño completamente aleatorizado (DCA). A continuación, se detallan los procedimientos empleados para determinar el tamaño del efecto, la varianza residual y el número de repeticiones.

### Estimación de la varianza residual

Para este trabajo, se partió del supuesto de que no se conocía la varianza residual y no se pudo obtener de otros estudios. Por lo tanto, se utilizaron los resultados de la investigación realizada por Vargas-Rojas (2021), quien estudió la correlación espacial de la variable rendimiento (kg) en un ensayo de uniformidad en el cultivo de arroz en Bagaces, Costa Rica. Este autor reportó que el modelo de correlación espacial esférica, sin efecto “nugget”, fue el que mejor se ajustó a los datos. Además, estimó los valores del “sill” y el “range” en 0,0091 y 1,44, respectivamente. Con base en esos parámetros, se simularon 10 000 campos aleatorios, denominados de aquí en adelante como simulaciones de ensayo de uniformidad. Cada simulación correspondió a una cuadrícula de 24 m × 16 m (384 m<sup>2</sup>), con un espacio entre puntos de 1 m × 1 m. Cada punto de la grilla representaba una realización de la variable aleatoria, en este caso, el rendimiento en kilogramos. El procedimiento se realizó con el paquete geoR versión 1.9-4 (Ribeiro y Diggle 2001) del lenguaje de programación R versión 4.3.3 (R Core Team 2024).

En cada una de las 10 000 simulaciones del ensayo de uniformidad, se formaron 16 unidades experimentales (UE) de 3 m de largo por 8 m de ancho (24 m<sup>2</sup>). Este tamaño se seleccionó según la recomendación de Vargas Rojas y Navarro Flores (2019), quienes lo definieron como adecuado para ensayos de rendimiento en arroz. Una vez conformadas las unidades experimentales, la producción de cada una en kilogramos (kg UE<sup>-1</sup>) se obtuvo mediante la suma de los rendimientos simulados en los puntos de la grilla de 24 m × 16 m, lo que permitió la conformación de 10 000 conjuntos de 16 unidades experimentales. Luego, en cada conjunto, se definieron dos tratamientos ficticios con efecto nulo (A y B) y se asignaron de manera aleatoria, lo que permitió obtener ocho unidades experimentales para cada tratamiento. Posteriormente, se ajustó el modelo de análisis de varianza para un diseño completamente aleatorizado (DCA) que se presenta en la Ecuación 1.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij} \quad (1)$$

Donde  $y_{ij}$  es el rendimiento del  $i$ -ésimo ( $i = 1, 2$ ) tratamiento en la  $j$ -ésima unidad experimental ( $j = 1, \dots, n$ );  $\mu$  es la media general del rendimiento;  $\tau_i$  es el efecto fijo del  $i$ -ésimo tratamiento y  $e_{ij}$  representa el error residual, se supone que está normalmente distribuido con media cero y varianza  $\sigma^2$ , además se supone que la  $cov(e_{ij}, e_{i'j'}) = 0 \forall ij \neq i'j'$ .

A partir del modelo de la Ecuación 1, y dado que no se aplicaron tratamientos reales que generaran desviaciones con respecto a la media general, se estimó la media general y la varianza residual para cada uno de los 10 000 conjuntos de unidades experimentales. Para evidenciar cómo afecta el aumento de la varianza residual en la estimación del número de repeticiones, se definieron dos escenarios. En el escenario A, se utilizó la varianza residual promedio del conjunto de 10 000 unidades experimentales, que fue de 0,53; mientras que en el escenario B se usó el cuantil 95 de la varianza residual del conjunto de 10 000 unidades experimentales, que correspondió a un valor de 0,71. Además, el valor de la media general promedio fue de 10,74 kg UE<sup>-1</sup> (4,48 t ha<sup>-1</sup>).

### Definición del tamaño del efecto

Para definir el tamaño del efecto en este trabajo se emplearon los hallazgos de Ibrahim y Saito (2022) quienes realizaron un metaanálisis para cuantificar el aumento del rendimiento en arroz debido a prácticas agronómicas. Estos autores encontraron que, la diferencia entre el rendimiento de tratamientos con prácticas agronómicas mejoradas y el tratamiento testigo fue en promedio de 1,60 t ha<sup>-1</sup>. Este valor se tomó como base para definir el tamaño del efecto, que resultó ser un 15% de la media general estimada con los datos de las simulaciones del ensayo de uniformidad.

También se definieron dos tamaños de efecto en los que se redujo la diferencia a 5% y 10%; para considerar escenarios donde las

prácticas agrícolas generen tamaños de efecto menores. De manera que los porcentajes definidos corresponden a diferencias de 0,54 kg UE<sup>-1</sup> (0,22 t ha<sup>-1</sup>), 1,07 kg UE<sup>-1</sup> (0,45 t ha<sup>-1</sup>) y 1,61 kg UE<sup>-1</sup> (0,67 t ha<sup>-1</sup>), para efectos de 5%, 10% y 15%, respectivamente. Es necesario indicar que, para las estimaciones de potencia, se utilizaron las diferencias absolutas y no los porcentajes.

### Número de repeticiones

Bajo el enfoque de ANDEVA, la hipótesis nula ( $H_0$ ) se evaluó con el uso del estadístico F. Este estadístico tiene una distribución  $F_{[gln, gld, \lambda]}$  donde gln son los grados de libertad del numerador, gld son los grados de libertad del denominador y  $\lambda$  es el parámetro de no centralidad. Cuando la hipótesis nula es verdadera,  $\lambda$  es igual a 0; en el caso contrario,  $\lambda$  tomará valores mayores a 0. Luego, la potencia quedó determinada como  $P\{F_{[gln, gld, \lambda]} > F_{[crítica]}\}$ , donde el lado izquierdo de la inecuación corresponde a una F no central, mientras que el lado derecho es el cuantil (1- $\alpha$ ) de una F central para un nivel de significación  $\alpha$  determinado.

Los pasos para la estimación de la potencia fueron:

1. Se calculó el valor crítico ( $F_{[crítica]}$ ) para el estadístico F como el cuantil 1- $\alpha$  de una  $F_{[gln, gld, 0]}$ .
2. Se estimó  $\lambda$ , cuyo cálculo consideró la estructura del diseño, la varianza residual utilizada y el efecto de tratamiento que se quieren detectar. Para este trabajo, se definió como los tamaños del efecto que se evaluaron: 5%, 10% y 15% con respecto a la media de la producción. A partir de estos valores, se calculó la potencia de la prueba para una diferencia entre pares de medias igual o mayor al tamaño del efecto supuesto, lo que estableció una cota inferior para (Vargas-Rojas 2021, Vargas-Rojas y García 2022).
3. Una vez obtenidos 1 y 2 se calculó la potencia como:  $P\{F_{[gln, gld, \lambda]} > F_{[crítica]}\}$ . La estimación de la potencia se hizo desde dos hasta 15

repeticiones para cada tamaño de efecto y para cada escenario de varianza.

Todos los procedimientos se realizaron con el lenguaje de programación R (R Core Team 2023). El código de R utilizado para estimar la potencia estadística se compartirá por solicitud al correo electrónico del autor para correspondencia.

## RESULTADOS

La Figura 1 resume los resultados de las simulaciones para ambos escenarios. Para una varianza residual de 0,53 con cuatro repeticiones se alcanzó una potencia del 0,91 para detectar un

tamaño de efecto del 15%, mientras que se necesitaron seis repeticiones para lograr una potencia de 0,81 y detectar un efecto del 10% (Figura 1 A). Cuando la varianza residual aumentó a 0,71 (Figura 1 B), para detectar un efecto del 15% se necesitaron cinco repeticiones para alcanzar una potencia de 0,86. Por otro lado si el efecto es del 10% y se quiere mantener una potencia superior a 0,80; fueron necesarias nueve repeticiones (Figura 1 B). Finalmente, para detectar un tamaño de efecto del 5%, la potencia estadística con las varianzas residuales definidas apenas alcanzó valores entre 0,40 y 0,60 con 15 repeticiones. Es decir, para que diferencias más pequeñas sean significativas se necesita aumentar el número de repeticiones.

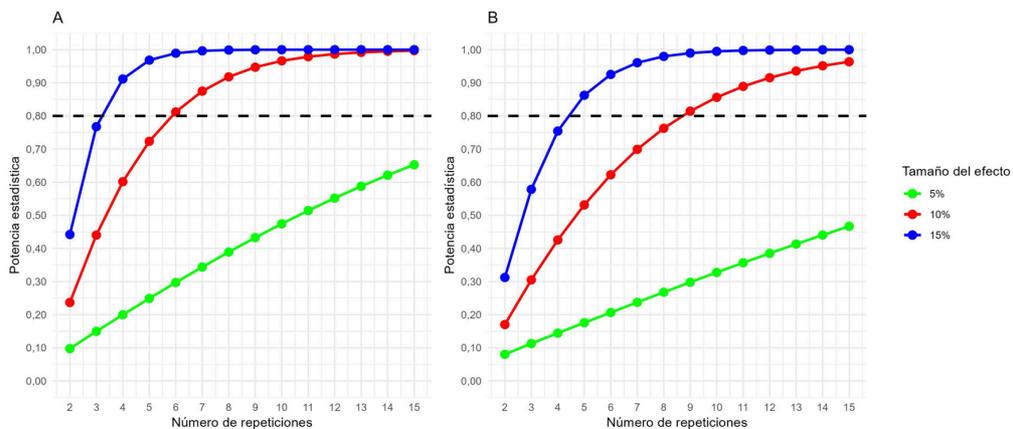


Figura 1. Potencia estadística en función del tamaño del efecto para distintos números de repeticiones. A) Varianza residual de 0,53. B) Varianza residual de 0,71.

## DISCUSIÓN

De forma general, en la Figura 1 se puede observar que mientras mayor fue el tamaño del efecto a detectar y menor fue la varianza residual, se necesitan menos repeticiones para alcanzar el umbral de potencia de prueba de 0,80.

Los resultados (Figura 1) muestran que si la varianza residual se mantiene constante, a medida que el tamaño del efecto a detectar disminuye, se requiere un mayor número de repeticiones. Este resultado concuerda con lo expuesto por Burmeister y Aitken (2012), quienes mencionan que, de forma general, entre menor sea

el tamaño del efecto, es decir, cuanto menor sea la diferencia entre tratamientos que se desea detectar, mayor será el número de repeticiones requerido para alcanzar una potencia dada.

De manera que cuando se planifica un estudio experimental la estimación del número de repeticiones se debe realizar en función del tamaño del efecto que se quiere detectar. En este sentido, Lenth (2001) destaca que un experimento debe contar con repeticiones suficientes para detectar diferencias significativas que también sean relevantes desde una perspectiva científica. Al mismo tiempo, el autor advierte que se debe tener cuidado en no diseñar un experimento con muchas repeticiones donde un efecto de poca importancia científica sea detectable estadísticamente. Por lo tanto, la importancia del número de repeticiones no se limita solo a la perspectiva científica, sino que también tiene un componente económico. Un experimento con un número insuficiente de repeticiones puede resultar en un desperdicio de recursos, ya que no produce resultados útiles, mientras que un experimento con un número excesivo de repeticiones consume más recursos de los necesarios (Baguley 2004).

En ese sentido, resulta determinante contar con una estimación del tamaño del efecto. Para ejemplificar la obtención del tamaño del efecto, en este trabajo se utilizaron los resultados disponibles en una publicación previa, lo cual es una práctica común (Vargas-Rojas 2021). También es posible obtener esta información de estudios piloto (Anderson *et al.* 2017). Sin embargo, no siempre es factible utilizar datos de publicaciones anteriores o de estudios piloto. En tales casos, el investigador debe determinar la magnitud del efecto en función de su importancia dentro del contexto de la investigación (Baguley 2004).

Lo anterior pone en evidencia lo relevante que es el tamaño del efecto en un experimento. En algunas disciplinas como medicina, psicología y ciencias del comportamiento y cognitivas, se ha adoptado la práctica de reportar e interpretar el tamaño del efecto en los artículos científicos (Gignac y Szodorai 2016). Sin embargo, en los

experimentos en ciencias agrícolas, la estimación del tamaño del efecto es un aspecto que a menudo se omite (Apuan 2014). Por ejemplo, algunos protocolos para evaluar variedades vegetales a nivel de campo establecen que el experimento debe tener tres o más repeticiones para asegurar la confiabilidad estadística del ensayo, que miden con los grados de libertad del error, pero esto no garantiza una potencia adecuada para detectar un tamaño de efecto definido. Lo anterior podría generar que se descarten materiales o tratamientos que podrían ser promisorios (Bono y Arnau 1995, Anderson *et al.* 2017).

Por consiguiente, la formulación de recomendaciones generales resulta inapropiada. Al planificar un experimento agrícola no es suficiente plantear un análisis de varianza, enumerar las fuentes de variación o indicar que se utilizará una prueba de separación de medias. También se debe considerar que, para determinar el número adecuado de repeticiones que garantice una potencia estadística suficiente en la prueba de hipótesis, se deben tener en cuenta el tamaño del efecto, la varianza, el nivel de significancia y la estructura de tratamientos. Estos elementos pueden variar de un experimento a otro según los objetivos y las condiciones específicas de la investigación (Stroup 1999).

De igual forma, los resultados obtenidos en el presente trabajo (Figura 1) indican que, a medida que aumenta la variabilidad residual, se requiere un número mayor de repeticiones para detectar el mismo tamaño de efecto con una potencia dada. Cuanta más variabilidad pueda haber en un experimento, mayor será el número de repeticiones necesarias para detectar estas diferencias de manera confiable (Woodcock *et al.* 2016). Sin embargo, obtener una medida de variabilidad antes de realizar el experimento es un tema complejo, ya que esta información no siempre está disponible. Al igual que el tamaño del efecto, es posible recurrir a medidas de variabilidad previamente conocidas de estudios anteriores (Quesada y Figuerola 2010), pero existe la limitación de que en muchas revistas científicas no se proporciona información sobre

la variabilidad residual del experimento, sino solo sobre las medias ajustadas y su diferencia (Stroup 2002).

Finalmente, lo analizado en este trabajo pretende poner en evidencia la necesidad de que exista un diálogo entre los investigadores y los estadísticos, de manera que los primeros comuniquen sus necesidades y los segundos las puedan trasladar a los términos estadísticos correspondientes. Esta práctica ayudaría a dejar claro los objetivos y el verdadero alcance de una investigación. En esta línea, Quinn y Keough (2002), argumentan una de las ventajas del análisis de potencia de forma prospectiva radica en la necesidad de definir tanto la hipótesis alternativa (es decir, el tamaño del efecto) como el modelo estadístico que se utilizará en el análisis. Esta especificación del modelo implica una reflexión sobre el análisis antes de la recolección de estos, lo cual se considera una práctica recomendable.

### CONCLUSIONES

En el análisis de los dos escenarios de variabilidad presentados en este trabajo quedó en evidencia que, en el escenario con mayor varianza residual, se requirió un mayor número de repeticiones para alcanzar la potencia deseada. Además, se demostró que, independientemente del escenario de variabilidad, a medida que disminuye el tamaño del efecto que se quiere detectar en un análisis de varianza, se incrementa el número necesario de repeticiones para lograr la potencia deseada.

Por lo tanto, para planificar experimentos con una potencia suficiente, es fundamental disponer de una estimación aproximada de la varianza residual y del tamaño del efecto de interés para el experimento en cuestión.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al M.Sc. Gabriel Garbanzo León por su lectura crítica del manuscrito. Sus aportes fueron fundamentales para mejorar la calidad del mismo.

### LITERATURA CITADA

- Anderson, SF; Kelley, K; Maxwell, SE. 2017. Sample-size planning for more accurate statistical power: a method adjusting sample effect sizes for publication bias and uncertainty. *Psychological Science* 28(11):1547-1562. DOI: <https://doi.org/10.1177/0956797617723724>
- Apuan, DA. 2014. Measuring magnitude of treatment effects in agricultural experiments. *Advances in Agriculture y Botanic- International Journal of the Bioflux Society* 6(1):33-39.
- Baguley, T. 2004. Understanding statistical power in the context of applied research. *Applied Ergonomics* 35(2):73-80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.01.002>
- Bono, R; Arnau, J. 1995. Consideraciones generales en torno a los estudios de potencia (en línea). *Anales de Psicología* 11(2):193-202. Consultado 22 feb. 2024. Disponible en <https://revistas.um.es/analesps/article/view/30091/29301>
- Brandmaier, AM; von Oertzen, T; Ghisletta, P; Lindenberger, U; Hertzog, C. 2018. Precision, reliability, and effect size of slope variance in latent growth curve models: Implications for statistical power analysis. *Frontiers in Psychology* 9(1):1-16. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00294>
- Brybaert, M; Stevens, M. 2018. Power analysis and effect size in mixed effects models: A tutorial. *Journal of Cognition* 1(1):1-20. DOI: <https://doi.org/10.5334/joc.10>
- Burmeister, E; Aitken, LM. 2012. Sample size: How many is enough?. *Australian Critical Care* 25(4):271-274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aucc.2012.07.002>
- Cohen, J. 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2 ed. s.l. Routledge. 567 p.
- Cohen, J. 1990. Things I have learned (so far). *American Psychologist* 45(12):1304-1312. DOI: <https://doi.org/10.1037/0003-066X.45.12.1304>
- Cohen, J. 1992. A power primer. *Psychological Bulletin* 112(1):155-159. DOI: <https://doi.org/10.1037/0033-2909.112.1.155>
- Dale, M; Fortin, MJ. 2014. *Dealing with spatial autocorrelation*. s.l., Cambridge University Press. 425 p.
- Fagroud, M; Van Meirvenne, M. 2002. Accounting for Soil Spatial Autocorrelation in the Design of Experimental Trials. *Soil Science Society of America Journal* 66(4):1134-1142. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1134>
- Gbur, EE; Stroup, WW; McCarter, KS; Durham, S; Young, LJ; Christman, M; West, M; Kramer, M. 2012. *Analysis of Generalized Linear Mixed Models in the Agricultural and Natural Resources Sciences*. Madison, WI, USA, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, (ASA, CSSA, and SSSA Books). 277 p.

- Gent, DH; Esker, PD; Kriss, AB. 2018. Statistical Power in Plant Pathology Research. *Phytopathology* 108(1):15-22. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-17-0098-LE>
- Gignac, GE; Szodorai, ET. 2016. Effect size guidelines for individual differences researchers. *Personality and Individual Differences* 102:74-78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paid.2016.06.069>
- González-Lutz, MI. 2008. Potencia de prueba: La gran ausente en muchos trabajos científicos (en línea). *Agronomía Mesoamericana* 19(2):309-313. Disponible en <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/5015/4822>
- Ibrahim, A; Saito, K. 2022. Assessing genetic and agronomic gains in rice yield in sub-Saharan Africa: A meta-analysis. *Field Crops Research* 287:1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108652>
- Kinney, AR; Eakman, AM; Graham, JE. 2020. Novel Effect Size Interpretation Guidelines and an Evaluation of Statistical Power in Rehabilitation Research. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 101(12):2219-2226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2020.02.017>
- Kotrlík, JW; Williams, HA; Jabor, MK. 2011. Reporting and Interpreting Effect Size in Quantitative Agricultural Education Research. *Journal of Agricultural Education* 52(1):132-142. DOI: <https://doi.org/10.5032/jae.2011.01132>
- Kozak, M; Piepho, HP. 2017. What's normal anyway? Residual plots are more telling than significance tests when checking ANOVA assumptions. *Journal of Agronomy and Crop Science* 204(1):86-98. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12220>
- Krupnik, TJ; Andersson, JA; Rusinamhodzi, L; Corbeels, M; Shennan, C; Gérard, B. 2019. Does size matter? a critical review of meta-analysis in agronomy. *Experimental Agriculture* 55(2):200-229. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479719000012>
- Kuehl, R. 2001. *Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. 2 ed. s.l., International Thomson. 666 p.
- Lapeña, BP; Wijnberg, KM; Stein, A; Hulscher, SJMH. 2011. Spatial factors affecting statistical power in testing marine fauna displacement. *Ecological Applications* 21(7):2756-2769. DOI: <https://doi.org/10.1890/10-1887.1>
- Lenth, RV. 2001. Some practical guidelines for effective sample size determination. *The American Statistician* 55(3):187-193. DOI: <https://doi.org/10.1198/000313001317098149>
- Mesquida, C; Murphy, J; Lakens, D; Warne, J. 2023. Publication bias, statistical power and reporting practices in the Journal of Sports Sciences: potential barriers to replicability. *Journal of Sports Sciences* 41(16):1507-1517. DOI: <https://doi.org/10.1080/02640414.2023.2269357>
- Montgomery, D. 2019. *Design and Analysis of Experiments*. 9 ed. s.l. John Wiley y Sons.
- Nakagawa, S; Cuthill, IC. 2007. Effect size, confidence interval and statistical significance: A practical guide for biologists. *Biological Reviews* 82(4):591-605. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00027.x>
- Quesada, J; Figuerola, J. 2010. Potencia de una prueba estadística: aplicación e interpretación en ecología del comportamiento. *Etología* 22:19-37.
- Quinn, GP; Keough, MJ. 2002. *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. s.l. Cambridge University Press. 537 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511806384>
- R Core Team. 2023. R: A language and environment for statistical computing. s.l., R Foundation for Statistical Computing.
- R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. s.l., R Foundation for Statistical Computing.
- Ribeiro, PJ; Diggle, PJ. 2001. geoR: A package for geostatistical analysis. *R-News* 1(2):15-18.
- Richter, C; Kroschewski, B. 2012. Geostatistical models in agricultural field experiments: Investigations based on uniformity trials. *Agronomy Journal* 104(1):91-105. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0100>
- Robledo, W. 2015. *Diseño y análisis de experimentos a un criterio de clasificación*. s.l. Editorial Brujas. p. 257-285.
- Shaffer, TL; Johnson, DH. 2008. Ways of Learning: Observational Studies Versus Experiments. *The Journal of Wildlife Management* 72(1):4-13. DOI: <https://doi.org/10.2193/2007-293>
- Stroup, W. 1999. Mixed Model Procedures to Assess Power, Precision, and Sample Size in the Design of Experiments. *Proceedings of the Biopharmaceutical Section, Alexandria, VA: American Statistical Association* p.15-24.
- Stroup, W. 2002. Power analysis based on spatial effects mixed models: A tool for comparing design and analysis strategies in the presence of spatial variability. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 7(4):491-511. DOI: <https://doi.org/10.1198/108571102780>
- Vargas-Rojas, JC. 2021. Simulación de ensayos en blanco para determinar la potencia estadística de experimentos en arroz. *Agronomía Mesoamericana* 32(1):196-208. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v32i1.40870>
- Vargas-Rojas, JC; García, F. 2022. Determinación de la potencia estadística de experimentos de rendimiento en maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13(4):591-601. DOI: <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V13I4.2784>

- Vargas Rojas, JC; Navarro Flores, JR. 2019. Tamaño y forma de unidad experimental para ensayos de rendimiento de arroz (*Oryza sativa*), en Guanacaste, Costa Rica. UNED Research Journal 11(3):355-360. DOI: <https://doi.org/10.22458/urj.v11i3.2653>
- Williams, S; Carson, R; Tóth, K. 2023. Moving beyond P values in The Journal of Physiology: A primer on the value of effect sizes and confidence intervals. J Physiol 601:5131-5133. DOI: <https://doi.org/10.1113/JP285575#support-information-section>
- Woodcock, BA; Heard, MS; Jitlal, MS; Rundlöf, M; Bullock, JM; Shore, RF; Pywell, RF. 2016. Replication, effect sizes and identifying the biological impacts of pesticides on bees under. Source: Journal of Applied Ecology 53(5):1358-1362.



Agronomía Costarricense. Universidad de Costa Rica. Se encuentra licenciada con Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para mayor información escribir a [rac.cia@ucr.ac.cr](mailto:rac.cia@ucr.ac.cr)

Nota técnica

## CICLOS DE APLICACIÓN DE UN BIOESTIMULANTE SOBRE EL DESARROLLO DE PLANTAS DE CAFÉ EN VIVEROS

Yusdel Ferrás-Negrín<sup>1\*</sup>, Carlos Alberto Bustamante-González<sup>2</sup>, Vidalina Pérez-Salina<sup>3</sup>

**Palabras clave:** *Coffea arabica*; fertilización foliar; nutrición.

**Keywords:** *Coffea arabica*; foliar fertilization; nutrition.

**Recibido:** 07/03/24

**Aceptado:** 10/06/24

### RESUMEN

**Introducción.** Buscar alternativas con bioestimulantes que promuevan el crecimiento y desarrollo de plantas de café en la fase de vivero es de gran importancia. El Codafol 14-6-5, por su composición podría utilizarse como alternativa nutricional. Sin embargo, no son suficientes las informaciones obtenidas para optimizar su uso. **Objetivo.** Evaluar la respuesta de plantas de *Coffea arabica* a diferentes ciclos de aplicación foliar del bioestimulante Codafol en la fase de vivero. **Materiales y métodos.** La investigación se desarrolló en el vivero de la Estación Experimental Agro-Forestal en la localidad de Jibacoa, municipio de Manicaragua, provincia de Villa

Clara, Cuba. En un diseño aleatorizado se estudiaron tres ciclos de aplicación de Codafol 14-6-5: 1) aspersión a las plantas cuando estas llegaron al 3<sup>ro</sup> y 5<sup>to</sup> par de hojas, 2) aspersión en el 4<sup>to</sup> y 6<sup>to</sup> par de hojas y 3) aspersión desde el 3<sup>ro</sup> hasta el 6<sup>to</sup> par de hojas y 4) un tratamiento control (aspersión de solo agua). A 10 plantas por cada tratamiento tomadas al azar se les evaluaron la altura, el diámetro del tallo, la masa seca, el área foliar y se determinaron los índices de eficiencia. **Resultados.** La aspersión del bioestimulante desde el tercero hasta el sexto par de hojas, provocó incrementos promedios de la altura, del diámetro del tallo, de la masa seca y el área foliar de 6,3%; 12,5%; 23,8% y 10,6%, respectivamente. Este ciclo de aplicación mostró en sentido general los índices de eficiencia más elevados en estas

\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: yusdel.ferras@gmail.com

1 Instituto de Investigaciones Agro-Forestales, Estación Experimental Agro-Forestal Jibacoa, Manicaragua, Villa Clara, Cuba.

 0000-0001-7897-0128.

2 Instituto de Investigaciones Agro-Forestales, Estación Experimental Agro-Forestal Tercer Frente. Cruce de los Baños, Tercer Frente. Santiago de Cuba, Cuba.

 0000-0002-1136-8762.

3 Instituto de Investigaciones Agro-Forestales, Estación Experimental Agro-Forestal Jibacoa, Manicaragua, Villa Clara, Cuba.

 0009-0003-1348-9685.

variables evaluadas. **Conclusiones.** Las aplicaciones del bioestimulante Codafol 14-6-5 promovieron el desarrollo de las plantas de *C. arabica* en la etapa de vivero. La aplicación desde el 3<sup>ro</sup> hasta el 6<sup>to</sup> par de hojas del bioestimulante, fue el ciclo que más favoreció de forma integral el desarrollo de las plantas de café.

## ABSTRACT

### Application cycles of a biostimulant on the development of coffee plants in nurseries.

**Introduction.** Search for alternatives with biostimulants that promote the growth and development of coffee plants in the nursery stage is very importance. Codafol 14-6-5, due to its composition, could be used as a nutritional alternative. However, the available information is insufficient to optimize its use. **Objective.** To evaluate the response of *C. arabica* plants to different cycles of foliar application of Codafol-14-6-5 during the nursery stage. **Materials and methods.** The research

was conducted at Agro-Forest Experimental Station nursery in Jibacoa, municipality of Manicaragua, Villa Clara province, Cuba. In a randomized design, three application cycles of Codafol 14-6-5 were studied 1) spraying on the plants when they reached the 3<sup>rd</sup> and 5<sup>th</sup> pair of leaves, 2) spraying on the 4<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> pair of leaves, 3) spraying from the 3<sup>rd</sup> to the 6<sup>th</sup> pair of leaves and 4) a control treatment (only water spray). Height, stem diameter, dry mass, and leaf area of ten plants per treatment taken at random were evaluated and efficiency indices were determined. **Results.** Spraying the biostimulant from the third to the sixth pair of leaves resulted average increases in height, stem diameter, dry mass and leaf area of 6.3%, 12.5%, 23.8% and 10.6%, respectively. This application cycle generally showed the highest efficiency indices in these evaluated variables. **Conclusions.** Applications of the biostimulant Codafol 14-6-5 promoted the development of *C. arabica* plants in the nursery stage. The application of the biostimulant from the 3<sup>rd</sup> to the 6<sup>th</sup> pair of leaves was the cycle that most comprehensively favored the growth of the coffee plants.

## INTRODUCCIÓN

El desequilibrio entre la alta demanda de nutrientes por las plantas de café y la baja disponibilidad de estos en el suelo comienza a manifestarse desde la etapa de vivero. Si no se fertilizan, se obtienen plantas de tallos delgados y débiles que pueden no sobrevivir cuando son trasplantadas al campo. Por lo tanto, la fertilización debe empezar desde esta etapa del cultivo (Posada y Walter 2003).

Entre los principales problemas que enfrenta la caficultura en Cuba, se encuentra la disminución de la aplicación de fertilizantes minerales por sus precios elevados y la escasez de abonos orgánicos por lo distante que se encuentran de la zona montañosa donde se cultiva el café. Por estos motivos, se hace necesario investigar alternativas que impliquen reducir el

uso de estos recursos y los costos de producción sin afectar la calidad de las plantas en la etapa de vivero (Díaz *et al.* 2021).

Dentro estas alternativas a emplear en los viveros de café, se recomienda el uso de bioestimulantes (Bustamante *et al.* 2019, Bustamante *et al.* 2023, Díaz *et al.* 2023). Sus usos en la agricultura, además de su importante papel en la agroecología, han sido tema de investigación desde hace décadas (Salazar *et al.* 2021). En la actualidad se trabaja intensamente en la búsqueda de productos que permitan favorecer el crecimiento, el desarrollo y los rendimientos de los cultivos (Salazar *et al.* 2021).

Uno de estos bioestimulantes a tener en cuenta en los viveros de café, es el Codafol 14-6-5. Está indicado para activar la brotación, la recuperación de cultivos después de soportar circunstancias adversas y por períodos de

máximo crecimiento activo. Los macronutrientes, los micronutrientes y el ácido N-acetil tiazolidin-4-carboxílico que contiene le confiere la acción de estimular los procesos bioquímicos a las plantas (Hubel grupo s.f. y Portal TecnoAgrícola s.f.).

En los viveros de café (*C. arabica*) en Cuba ya se han iniciado investigaciones con la aplicación del bioestimulante Codafol 14-6-5. En estudios con la aplicación de diferentes concentraciones se demostró que este bioestimulante incrementó el vigor de las plantas en esta etapa de desarrollo del cultivo (Ferrás *et al.* 2023). Sin embargo, aún no se dispone de conocimiento sobre el mejor momento en que se pueda aplicar. Por tales motivos esta investigación se desarrolló con el objetivo de evaluar la respuesta de plantas de *C. arabica* a diferentes ciclos de aplicación foliar del Codafol 14-6-5 en la etapa de vivero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el vivero de la Estación Experimental Agro-Forestal Jibacoa a 340 msnm, localizado en el municipio de Manicaragua, provincia de Villa Clara, Cuba (22°01'N, 79°58'O). Los experimentos se realizaron en dos campañas manejadas de la misma forma: 1) desde diciembre del 2021 hasta julio del 2022, 2) desde octubre del 2022 hasta junio del 2023.

Se utilizó un sustrato compuesto por tres partes de suelo fersialítico pardo rojizo clasificado según "Soil Taxonomy" como "Oxic Haplusteps" (Hernández 2021) y una parte de compost procedente de estiércol vacuno según se indica en el instructivo técnico del café arábico (Díaz *et al.* 2013).

Sobre el sustrato envasado en bolsas de 24 cm de alto y 14 cm de ancho con una capacidad de 1,4 kg, se sembraron dos semillas de *C. arabica*, variedad Isla 6-11. A los 90 días posteriores se realizó un raleo y se dejó una plántula para una densidad de 120 plantas m<sup>-2</sup>.

Sobre las plantas se colocó una malla sarán negra que filtraba el 50% de la radiación solar desde el inicio de la siembra hasta que

se realizó la evaluación, el control de arvenses se realizó de forma manual, y se mantuvo una humedad adecuada en el sustrato mediante el suministro de riego de agua de forma uniforme sobre el cultivo teniendo en cuenta las recomendaciones del instructivo técnico del café arábico (Díaz *et al.* 2013).

El Codafol 14-6-5 se aplicó sobre todo el follaje de las plantas de café, a una concentración del 0,25% (2,50 ml del bioestimulante en un litro de agua), se tuvo presente la recomendación de la ficha técnica del bioestimulante (Hubel grupo s. f.). Las aspersiones se realizaron bajo un valor de calibración de 0,6 l m<sup>-2</sup> de solución final, cuando el 90% de las plantas alcanzaron los pares de hojas indicados en los ciclos descritos en los tratamientos siguientes:

1. Aspersión de solo agua (control).
2. Aspersión de Codafol en el 3<sup>ro</sup> y 5<sup>to</sup> par de hojas (Total de aplicaciones: 2).
3. Aspersión de Codafol en el 4<sup>to</sup> y 6<sup>to</sup> par de hojas (Total de aplicaciones: 2).
4. Aspersión de Codafol desde el 3<sup>ro</sup> hasta el 6<sup>to</sup> par de hojas (Total de aplicaciones: 4).

No se aplicó ningún otro insumo desde la siembra del experimento hasta el momento de la evaluación.

Cada tratamiento estuvo conformado por 30 bolsas. Dichos tratamientos estuvieron distribuidos de forma aleatorizado. A los 230 días posteriores a la siembra, a 10 plantas de cada tratamiento tomadas al azar se les evaluaron las siguientes variables:

1. Altura (cm): se midió desde la base del tallo hasta la yema apical de las plantas con el uso de una regla milimetrada.
2. Diámetro del tallo (cm): se midió en la base del tallo con un pie de rey (Vernier) con un margen de error de 0,02 mm.
3. Masa seca (g): se obtuvo después del secado de las plantas completas (raíz, tallo y hojas). Se realizó colocándolas en una estufa a 65°C

hasta que alcanzaron peso constante. Se utilizó una balanza Radwag Wagi Elektroniczne (modelo AS 220/X, n Polonia, EU) con un margen de error de 1 mg.

4. Área foliar (cm<sup>2</sup>): se determinó con el uso de la metodología citada por Guevara *et al.* (2021), según la ecuación:

$$AF = \sum \text{Largo} \times \text{ancho} \times 0,64$$

Donde: AF = área foliar y 0,64 = constante.

5. Índice de eficiencia (I.E.): Se calculó por la metodología citada por Bustamante *et al.* (2019) y Díaz *et al.* (2021).

$$I.E. = \left( \frac{\text{valor del tratamiento} \times \text{valor del testigo}}{\text{valor del testigo}} \right) * 100$$

En el procesamiento estadístico se comprobó la normalidad de los datos por Kolmogorov Smirnov y la homogeneidad de la varianza por la prueba de Levene con el paquete estadístico Statgraphics 5.0. Posteriormente, se realizó el análisis de varianza y para la determinación de

las diferencias entre las medias de los tratamientos se utilizó la prueba de Tukey ( $p \leq 0,05$ ), con el paquete estadístico InfoStat versión 1.0. En los análisis realizados no se incluyeron las campañas como efecto aleatorio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las plantas de café obtuvieron valores óptimos en todas las variables evaluadas de crecimiento para su establecimiento en condiciones de campo. Sánchez *et al.* (2018), señalaron que estas deben tener como mínimo una altura de 17 cm, una masa seca de 3 g y un área foliar de 300 cm<sup>2</sup>.

El bioestimulante tuvo efectos positivos en el aumento de la altura y el diámetro del tallo de las plantas de café en la etapa de vivero cuando fue aplicado desde el 3<sup>ro</sup> hasta el 6<sup>to</sup> par de hojas. Este ciclo de aplicación provocó los valores medios más elevados en ambas campañas, aunque estos efectos fueron significativos para la altura en la campaña 2022, y para el diámetro del tallo en la campaña 2023 con I.E. de 7,39% y 19,5% respectivamente, en comparación al tratamiento control (Tabla 1).

Tabla 1. Respuesta de la altura (A.), el diámetro del tallo (D. T.) de las plantas de café e índice de eficiencia (I.E.) a la aplicación foliar en diferentes ciclos del bioestimulante en la etapa de vivero.

Ciclos de aplicación	Campaña 2022				Campaña 2023			
	A. (cm).	D. T. (cm).	I.E. (%)		A. (cm).	D. T. (cm).	I.E. (%)	
			A.	D. T.			A.	D. T.
Sin aplicación (Control)	30,87 b*	0,54 ns	-	-	31,35 ab*	0,42 c*	-	-
3 y 5 par de hojas	32,10 ab	0,55	3,98	1,85	31,33 ab	0,48 ab	-0,06	14,29
4 y 6 par de hojas	31,00 b	0,57	0,42	5,56	30,46 b	0,46 bc	-2,84	9,52
3; 4; 5; 6 par de hojas	33,15 a	0,58	7,39	7,41	33,01 a	0,50 a	5,30	19,05
E.E.	0,46	0,01	-	-	0,49	0,01	-	-
C.V., %	4,53	7,02	-	-	4,92	6,65	-	-

\*Valores medios con letras diferentes en una misma columna difieren según prueba de Tukey para  $p \leq 0,05$ ; ns sin diferencias significativas.

Al estudiar la aplicación de diferentes concentraciones del Codafol 14-6-5 sobre plantas de *C. arabica* en similares condiciones de vivero, se obtuvo que al aplicarlo al 0,25% (equivalente a 2,5 ml de Codafol en un litro de agua) incrementó la altura y el diámetro del tallo con I.E. de hasta un 8,1% y 18,6% respectivamente (Ferrás *et al.* 2023). Además, en el cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Celeste (F-2 de Skay Way), al aplicar este bioestimulante a una dosis de 0,5 L ha<sup>-1</sup> se reportaron aumentos de la altura del 4,9% (Castillo *et al.* 2022).

La altura y el diámetro del tallo de las plantas de *C. arabica* en el vivero también han tenido respuestas favorables a la aplicación de otros bioestimulantes. Con la aspersión del FitoMas-E a una concentración del 0,6% se obtuvieron en estas variables I.E. del 20,3% y 24,1% respectivamente (Díaz *et al.* 2021).

El Nitrofix (200 ml L<sup>-1</sup>), el Viusid Agro (0,5 ml L<sup>-1</sup>) y el Enerplant (0,4 ml L<sup>-1</sup>), aplicados

cuando las plantas de *C. arabica* alcanzaron el 2<sup>do</sup> y 4<sup>to</sup> par de hojas (2 aplicaciones) provocaron para la altura I.E. del 54,7%, 51,8% y 37,7% respectivamente, mientras que para el diámetro del tallo fueron del 28,9%, 18,4% y 10,5% en este mismo orden (Díaz *et al.* 2023). Estos autores hicieron referencia a que los bioestimulantes generan un crecimiento vigoroso de las plantas al ser capaces de influir sobre distintos procesos fisiológicos.

Las plantas de café mostraron los valores medios más altos de masa seca en las dos campañas cuando el bioestimulante se aplicó desde el 3<sup>ro</sup> hasta el 6<sup>to</sup> par de hojas con incrementos significativos del 11,67% (campaña 2022) y 36,84% (campaña 2023) en comparación al tratamiento control. Estos resultados fueron más evidentes en la campaña 2023, donde todos los ciclos de aplicación mostraron diferencias significativas entre ellos (Tabla 2).

Tabla 2. Respuesta de la masa seca (M. S.), el área foliar (A. F.) de las plantas de café e índice de eficiencia (I.E.) a la aplicación foliar en diferentes ciclos del bioestimulante en la etapa de vivero.

Ciclos de aplicación	Campaña 2022				Campaña 2023			
	M. S. (g).	A. F. (cm <sup>2</sup> ).	I.E. (%).		M. S. (g).	A. F. (cm <sup>2</sup> ).	I.E. (%).	
			M. S.	A. F.			M. S.	A. F.
Sin aplicación (Control)	4,20 b*	581,05 b*	-	-	3,99 c*	552,99 b*	-	-
3 y 5 par de hojas	4,63 ab	645,12 ab	10,24	11,03	4,96 b	625,10 a	24,31	13,04
4 y 6 par de hojas	4,50 ab	618,94 ab	7,14	6,52	4,36 c	611,45 a	9,27	10,57
3; 4; 5; 6 par de hojas	4,69 a	664,28 a	11,67	14,32	5,46 a	590,53 ab	36,84	6,79
E.E.	0,11	16,93	-	-	0,13	11,70	-	-
C.V., %	8,01	8,53	-	-	8,64	6,22	-	-

\*Valores medios con letras diferentes en una misma columna difieren según prueba de Tukey para  $p \leq 0,05$ .

Independientemente que todos los tratamientos que recibieron aplicación del bioestimulante mostraron I.E. positivos para el área foliar de las plantas de café, sus valores medios no tuvieron diferencias significativas entre sí. En comparación al tratamiento control, en la

campaña 2022 resultó la mejor opción la aplicación del bioestimulante desde el 3<sup>ro</sup> hasta el 6<sup>to</sup> par de hojas, mientras en la campaña 2023 fueron las aplicaciones alternas 3<sup>ro</sup> y 5<sup>to</sup>, 4<sup>to</sup> y 6<sup>to</sup> par de hojas (Tabla 2).

Al estudiar la aplicación de diferentes concentraciones del Codafof 14-6-5 sobre plantas de *C. arabica* en similares condiciones de vivero, se obtuvo que la aspersión al 0,25% (equivalente a 2,5 ml de Codafof en un litro de agua) provocaron I.E. del 40,2%, 13,5% de la masa seca y el área foliar respectivamente (Ferrás *et al.* 2023). En el cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* L.), variedad Celeste (F-2 de Skay Way), también se reportaron resultados positivos con la aplicación de este bioestimulante a una dosis de 0,5 L ha<sup>-1</sup>, al incrementar sus rendimientos de frutos en un 38,1% (Castillo *et al.* 2022).

Los resultados indicaron que el biostimulante Codafof 14-6-5 es una opción a emplear en la estrategia nutricional en los viveros de café al promover un mejor desarrollo de las plantas. Este producto está especialmente indicado para las primeras etapas de desarrollo del cultivo, y su efecto pudo estar relacionado a que tiene una doble acción: 1) como bioestimulante por los aportes de ácido N-acetil tiazolidin-4-carboxílico (AATC), favorece el mecanismo de la prolina y la cisteína para ayudar a la planta a superar condiciones estresantes y recuperarse una vez que estas sean propicias para su desarrollo; 2) como fertilizante foliar por su composición rica en nitrógeno con fósforo y potasio de asimilación rápida complementado con microelementos (Hubel grupo s.f.).

En viveros de *C. arabica* con la aplicación de Starlite se reportó I.E. del 8,2% para la masa seca al ser comparado con un tratamiento control que recibió fertilización foliar con Urea (Valverde *et al.* 2020). Estos autores expresaron que sus resultados pudieron estar relacionados a que estos productos son estimulantes biogénicos, potenciadores metabólicos, fortalecedores de la planta y reguladores positivos del crecimiento de estas.

El Nitrofix (200 ml L<sup>-1</sup>), el Viusid Agro (0,5 ml L<sup>-1</sup>) y el Enerplant (0,4 ml L<sup>-1</sup>), aplicados cuando las plantas de *C. arabica* alcanzaron el 2<sup>do</sup> y 4<sup>to</sup> par de hojas (2 aplicaciones) provocaron para la masa seca I.E. del 82,2%, 66,0% y 69,6% respectivamente, mientras que para el área foliar

fueron del 48,1%, 40,6% y 34,9% en este mismo orden (Díaz *et al.* 2023). Estos autores enfatizaron en los efectos benéficos de los bioestimulantes en la nutrición de los cafetos en los viveros y su acción en el desarrollo de las plantas.

Al analizar de forma integral los resultados de las dos campañas de vivero, se pudo constatar, que todos los ciclos de aplicación del bioestimulante favorecieron el desarrollo de las plantas de café en la etapa de vivero. Sin embargo, la mejor opción entre los tratamientos fue cuando se realizaron las aspersiones sobre las plantas desde el tercero hasta el sexto par de hojas, que causó incrementos promedios de la altura, del diámetro del tallo, de la masa seca y el área foliar del 6,3%, del 12,5%, del 23,8% y del 10,6%, respectivamente.

Los valores de I.E. obtenidos en la presente investigación se relacionan con los obtenidos en trabajos donde se han aplicado otros bioestimulantes. Vázquez (2022) con la aplicación de VIUSID Agro<sup>®</sup> en viveros de *C. arabica*, encontró: 1) los I.E. más elevados con 10%, 7,7%, 12,6% para el diámetro del tallo, la masa seca y el área foliar respectivamente cuando se aplicó este bioestimulante desde el segundo hasta el quinto par de hojas (4 aplicaciones totales) en la campaña de vivero 2020; 2) los IE más altos con 25,3%, 7,7%, 48,6% y 29,9% de altura, de diámetro del tallo, de la masa seca y el área foliar respectivamente, cuando se aplicó el VIUSID Agro<sup>®</sup> en el tercer y quinto par de hojas (2 aplicaciones totales) en la campaña de vivero 2021.

Teniendo en cuenta la acción del Codafof 14-6-5 como fertilizante foliar, Posada y Walter (2003) mencionan que la fertilización foliar en viveros de café es una alternativa viable para que el caficultor pueda obtener plantas más vigorosas para ser llevadas al campo; reportaron al aplicar fertilizante formulado 12-60-0 cada 30 días a partir de este mismo tiempo de trasplante, I.E. de un 20,7%, 33,9% y 16,6% de la altura, la masa seca aérea y de la raíz respectivamente de las plantas de *C. arabica* variedad Colombia desarrolladas sobre un sustrato suelo-abono orgánico 3/1.

## CONCLUSIONES

Las aplicaciones del bioestimulante Codafol 14-6-5 promovieron el desarrollo de las plantas de *C. arabica* en la etapa de vivero. La aplicación desde el 3<sup>ro</sup> hasta el 6<sup>to</sup> par de hojas del bioestimulante, fue el ciclo que más favoreció de forma integral el desarrollo de las plantas de café.

## LITERATURA CITADA

- Bustamante, CA; Vázquez, Y; Fernández, I; Ferrás, Y. 2023. Effects of different VIUSID Agro<sup>®</sup> concentrations on the growth of *Coffea arabica* L. seedlings. *Agro Productividad* 16(7):79-87. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i7.2522>
- Bustamante, CA; Viñals, R; Ferrás, Y. 2019. Efecto de concentraciones de FitoMas-E en el crecimiento de plántulas de *Coffea arabica*. *Café y cacao* 18(2):40-47.
- Castillo, J; Fornaris, AA; Echavarría, J. 2022. Efecto de cuatro fertilizantes foliares sobre el rendimiento y calidad del tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) (en línea). *Ciencia en su PC* 1(2):1-4. Consultado 05 mar. 2024. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/1813/181373019009/html/>
- Díaz, A; Carrillo, A; Suárez, C. 2023. Efecto de bioproductos sobre el desarrollo de posturas de café en vivero (en línea). *Ciencias Agrícolas* 14(4):495-505. Consultado 26 dic. 2023. Disponible en <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v14n4/2007-0934-remexca-14-04-495.pdf>
- Díaz, A; López, Y; Suárez, C; Díaz, L. 2021. Efecto del FitoMas-E y dos proporciones de materia orgánica sobre el crecimiento de plántulas de café en vivero (en línea). *Centro Agrícola* 48(1):14-22. Consultado 23 mar. 2023. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v48n1/0253-5785-cag-48-01-14.pdf>
- Díaz, D; Caro, P; Bustamante, C; Sánchez, C; Rodríguez, MI; Vázquez, E. 2013. Instructivo Técnico Café Árabe, Inst. Siboney, Playa, La Habana, Cuba, Instituto de Investigaciones Agro-forestales. 137 p.
- Ferrás, Y; Bustamante, CA; Pérez, P. 2023. Respuesta de posturas de café a la aplicación foliar de un bioestimulador (en línea). *Ingeniería Agrícola* 1(3):e05. Consultado 26 dic. 2023. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/5862/586275623005/html/>
- Guevara, W; Machado, G; Bustamante, CA. 2021. Relación entre la fertilidad de sustratos y el crecimiento de posturas de café (*Coffea arabica* L.) en Contramaestre, Santiago de Cuba (en línea). *Ciencia en su PC* 1(1):94-110. Consultado 26 dic. 2023. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/1813/181368034007/html/>
- Hernández, A. 2021. Área que ocupan los agrupamientos y tipos genéticos de los suelos en Cuba (en línea). *Cultivos Tropicales* 42(3):e13. Consultado 26 dic. 2023. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v42n3/1819-4087-ctr-42-03-e13.pdf>
- Hubel grupo. s. f. Ficha técnica: Codafol 14-6-5. Referència: FC-0050<sup>a</sup> (en línea). Consultado 23 mar. 2023. Disponible en [https://www.hubel.pt/uploads/product\\_documents/Codafol\\_14-6-5\\_FC0050A\\_6Yuc7D3.pdf](https://www.hubel.pt/uploads/product_documents/Codafol_14-6-5_FC0050A_6Yuc7D3.pdf)
- Portal TecnoAgrícola. s. f. Productos agricultura convencional. Codafol 14-6-5 (en línea). Consultado 23 mar. 2023. Disponible en <https://www.buscador.portaltecnogricola.com/vademecum/esp/producto/12884/codafol%2014-6-5>
- Posada, C; Walter, N. 2003. Respuesta de plántulas de café a la fertilización foliar y la aplicación de pulpa de café compostada (en línea). *Fac. Nal. Agr. Medellín* 56(1):1839-1848. Consultado 17 abr. 2023. Disponible en <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiqtvr9er-AhWNSDABHZ19ACgQFnoECA4QAQ&url=https%3A%2F%2Frevistas.unal.edu.co%2Findex.php%2Frefame%2Farticle%2Fdownload%2F24541%2F25146%2F86058&usq=AOvVaw075z8UxRxa971dFLdEqK4J>
- Salazar, Y; Alfonso, J; Gallardo, A. 2021. Los bioestimulantes. Una alternativa para el desarrollo agroecológico cubano. *Ecovida* 11(3):225-249.
- Sánchez, C; Martínez, F; Moran, N; Cabana, Y; Meneses, I; Vicet, E. 2018. Influencia de tres tipos de tubetes y diferentes momentos de fertilización en el desarrollo de posturas de café. *Café Cacao* 17(1):35-43.
- Valverde, Y; Moreno, J; Quijije, K; Castro, A; Merchán, W; Gabriel, J. 2020. Los bioestimulantes: Una innovación en la agricultura para el cultivo del café (*Coffea arabica* L.) (en línea). *Journal of the Selva Andina Research Society* 11(1):18-28. Consultado 9 jun. 2023. Disponible en [http://www.scielo.org.bo/pdf/jsars/v11n1/v11n1\\_a03.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/jsars/v11n1/v11n1_a03.pdf)
- Vázquez, Y. 2022. Efecto de concentraciones de VIUSID Agro<sup>®</sup> en el crecimiento de posturas de *Coffea arabica* L. Tesis M.Sc. Cuba, Universidad de Oriente. 77 p.





Technical note

## INFLUENCE OF *Ascophyllum nodosum* EXTRACT ON ROOTING OF *Mentha spicata* L.

Pablo Fernando Luna-Rodríguez<sup>1/\*</sup>, Hans Marcelino Munguia-Falcon<sup>2</sup>, Isabel Elena Mogollón-Ortega<sup>3</sup>, Excela Elizabeth Saavedra-Flores<sup>4</sup>, Claudia Paz Romero-Ayala<sup>5</sup>, Maria Fernanda Siancas-Carrasco<sup>6</sup>, Martha Andrea Márquez-Bautista<sup>7</sup>, Cecilia Emperatriz Figueroa-Serrudo<sup>8</sup>, Isabel Maximiliana Montes-Yarasca<sup>9</sup>, Héctor Baroni Cántaro-Segura<sup>10</sup>

**Keywords:** *Mentha spicata*; medicinal plants; biostimulant; *Ascophyllum nodosum*; plant roots.

**Palabra clave:** *Mentha spicata*; plantas medicinales; bioestimulante; *Ascophyllum nodosum*; raíces.

Recibido: 19/11/23

Aceptado: 15/04/24

### ABSTRACT

**Introduction.** The production of medicinal plants is a market that has been growing rapidly in recent years and requires sustainable agronomic techniques to meet this demand. The herb spearmint (*Mentha spicata* L.) is one

of these plants in demand worldwide. However, there are not many techniques for its commercial cultivation, whether in terms of harvest, post-harvest, or propagation. As for propagation, this is usually done vegetatively, occasionally with the use of rooting agents. Among the wide variety of rooting agents available in the market, the use of algae extracts such as *Ascophyllum nodosum* is

\* Corresponding author.  
Email: 20210579@lamolina.edu.pe

1 Universidad Nacional Agraria La Molina, Faculty of Agronomy, Círculo de Investigación en Plantas Nativas Medicinales, Lima, Perú.

 0000-0001-6332-5652.

2 Universidad Nacional Agraria La Molina, Faculty of Agronomy, Círculo de Investigación en Plantas Nativas Medicinales, Lima, Perú.

 0000-0003-0540-973X.

3 Universidad Nacional Agraria La Molina, Faculty of Agronomy, Círculo de Investigación en Plantas Nativas Medicinales, Lima, Perú.

 0009-0003-0495-4362.

4 Universidad Nacional Agraria La Molina, Faculty of Agronomy, Círculo de Investigación en Plantas Nativas Medicinales, Lima, Perú.

 0009-0000-2178-1270.

5 Universidad Nacional Agraria La Molina, Faculty of Agronomy, Círculo de Investigación en Plantas Nativas Medicinales, Lima, Perú.

 0000-0001-5311-4341.

6 Universidad Nacional Agraria La Molina, Faculty of Agronomy, Círculo de Investigación en Plantas Nativas Medicinales, Lima, Perú.

 0009-0004-6540-2809.

7 Universidad Nacional Agraria La Molina, Faculty of Agronomy, Círculo de Investigación en Plantas Nativas Medicinales, Lima, Perú.

 0009-0007-0100-8388.

8 Universidad Nacional Agraria La Molina, Faculty of Agronomy, Lima, Perú.

 0000-0002-3800-132X.

9 Universidad Nacional Agraria La Molina, Faculty of Agronomy, Lima, Perú.

 0000-0002-1285-8413.

10 Universidad Nacional Agraria La Molina, Faculty of Agronomy, Lima, Perú.

 0000-0002-6194-0675.

a sustainable alternative. **Objective.** To evaluate the influence of *Ascophyllum nodosum* extract on the rooting of spearmint cuttings. **Materials and methods.** The trial was carried out under greenhouse conditions at National Agricultural University La Molina, Peru with different doses of the extract and different evaluation times. Doses of 0, 1, 5 and 10 mL L<sup>-1</sup> of the extract and 3 evaluation moments were used, which were 21, 28 and 35 days after cutting. In this way, an appropriate dose and transplanting time would be obtained. The variables evaluated were root number, root length, rooting percentage, fresh weight of stem, root and leaf, and dry weight of stem, root and leaf. **Results.** Spearmint cuttings showed significant differences ( $\alpha = 0.05$ ) for root length, rooting percentage, and root fresh weight with the application of the extract, with better results in the 10 mL L<sup>-1</sup> dose for root length and root fresh weight. **Conclusion.** *Ascophyllum nodosum* extract proved to be efficient in rooting *Mentha spicata* cuttings.

## RESUMEN

**Influencia del extracto de *Ascophyllum nodosum* en el enraizamiento de *Mentha spicata* L.** **Introducción.** La producción comercial de plantas medicinales es un mercado que está creciendo rápidamente en los últimos años y que requiere de técnicas agronómicas sostenibles

## INTRODUCTION

Medicinal plants are of great importance in all regions both for their value in traditional medicine and for the economic livelihood they provide to small producers when marketed (FAO 1997, as cited in Membreño 2019). Particularly *Mentha spicata* L. is one of the most important species of the *Mentha* genus worldwide (Mokhtarikhah *et al.* 2022), with a wide use in gastronomy, pharmaceuticals, beverages and

para hacerle frente a esta demanda. La hierbabuena (*Mentha spicata* L.) es una de estas plantas demandadas a nivel mundial. No obstante, no existen muchas técnicas para su cultivo comercial, ya sea en términos de cosecha, poscosecha o propagación. En cuanto a la propagación, esta suele ser de forma vegetativa y ocasionalmente con algún enraizante. De la gran variedad de enraizantes que se pueden encontrar en el mercado, el uso de extractos de algas como *A. nodosum* resulta una alternativa sostenible como bioestimulante. **Objetivo.** Evaluar la influencia del extracto de *A. nodosum* en el enraizamiento de esquejes de hierbabuena. **Materiales y métodos.** El ensayo se llevó a cabo en condiciones de invernadero en la Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú con diferentes dosis del extracto y diferentes momentos de evaluación. Se usaron dosis de 0, 1, 5 y 10 mL L<sup>-1</sup> del extracto y 3 momentos de evaluación que fueron a los 21, 28 y 35 días después de realizado el esqueje. Las variables evaluadas fueron número de raíces, longitud de raíces, porcentaje de enraizamiento, peso fresco de tallo, raíz y hoja, y peso seco de los mismos. **Resultados.** Los esquejes de hierbabuena demostraron diferencias significativas ( $\alpha = 0,05$ ) para longitud de raíz, porcentaje de enraizamiento, y peso fresco de raíces ante la aplicación del extracto, con mejores resultados en la dosis de 10 mL L<sup>-1</sup> para longitud de raíz y peso fresco de raíces. **Conclusión.** El extracto de *A. nodosum* probó ser eficiente en el enraizamiento de esquejes de *Mentha spicata*.

confectionery, being recognized as a safe plant by the FDA (Food and Drug Administration) as it does not cause negative effects during prolonged uses (Guzmán *et al.* 2017). The plants of this genus have also been reported as insecticidal, antibacterial, antifungal and allelopathic, with great potential for use in the agricultural sector (El Hassani 2020). On the other hand, within the framework of food security, one of the great challenges is to propitiate production systems that are oriented to meet future food needs and thus

generate a contingency plan that allows families, with scarce resources, to live adequately (García Flores *et al.* 2016). Therefore it is necessary to give greater importance to these plants and generate systems that help to maintain them.

*Mentha spicata* is native to the European continent, and is one of the most popular and common species of the *Mentha* genus. It is perennial plant, with a plant height between 30 to 50 cm; its stem has a reddish-purple coloration, a conical terminal inflorescence of lilac or violet colors and subsessile leaves (Resquín *et al.* 2011). *Mentha spicata* contains volatile oils, resins, tannins, coumarins, flavonoids, steroids and alkaloids (Salvá 2016). It is used to treat ailments such as vomiting, nausea, pain and gastrointestinal disorders (Kumar *et al.* 2011). Two of the main chemical compounds are limonene (Telci *et al.* 2010) and rosmarinic acid, a phenolic compound associated to anti-inflammatory, anticancer, antioxidant, antifungal and antibacterial properties (Mahendran *et al.* 2021).

Cultivation of medicinal plants in Peru is minimal, making the implementation and promotion of sustainable practices challenging due to limited information availability (Nolasco Cruz 2016). Furthermore, this production primarily occurs in rural areas where technical agronomic expertise is scarce, reflecting broader issues within Peruvian agriculture (MIDAGRI 2015). Various propagation methods are available, each better suited to specific crops. For plants like perennial herbs, which root easily, propagation is typically achieved through cuttings or ratoons (Quintero 1985). Given its importance and ease of implementation, this method warrants consideration and further exploration. Therefore, it is imperative to adapt and generate knowledge for effective agronomic management in the propagation of these plants.

Biostimulants are gaining importance in the agricultural field due to their ability to be used in sustainable systems (Rouphael & Colla 2020). In general, they have the capacity, at low concentrations, to improve flowering, growth, the qualitative properties of the commercial product

and its shelf life (Basile *et al.* 2020). Among them, some of the most studied are those made from macroalgae (Kapoor *et al.* 2021). One of these macroalgae is *Ascophyllum nodosum*, which is important for its content of phenolic compounds, polysaccharides, amino acids and phytohormones (Battacharyya *et al.* 2015). The use of this biostimulant has shown in crops efficient nitrogen use, increased water use efficiency, and biomass gain (Łangowski *et al.* 2022, Frioni *et al.* 2021).

Agrostemin is a commercial product obtained from extracts of *Ascophyllum nodosum*. It has shown to stimulate growth in vegetables, increasing their quality and yield. It contains natural hormones that affect different physiological processes of the plant (Serfi 2022). It is also used as a rooting agent (Telenchana 2017, Jacome 2011).

The present work aims to evaluate the effects of 3 concentrations of *Ascophyllum nodosum* extract on the rooting of *Mentha spicata*.

## MATERIALS AND METHODS

The plant material was obtained from the Vegetable Research and Social Projection Program of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Peru. It was collected from *Mentha spicata* L. mother plants on November 12, 2022, using sterile pruning shears. Propagation was conducted following the protocol outlined by Amaro *et al.* (2013), with certain modifications. Apical cuttings 6.8 to 8.8 cm long, 2 to 3 mm in diameter and 5 nodes, were collected. The leaves were removed, (except for those of the upper node) and they were placed in containers with water to avoid dehydration before treatment.

The rooting agent used for the treatments was an extract of *Ascophyllum nodosum* with the commercial name Agrostemin. From this, three solutions of one liter of water were prepared with different concentrations of the extract. The cuttings were submerged for 5 minutes.

A 4x3 completely randomized factorial design was used with 10 cuttings per treatment, with a total of 120 cuttings. The first factor (D) corresponds to the doses of Agrostemin used for

the rooting solutions and the second factor (T) corresponds to the evaluation times of the cuttings since they were cut. The Agrostemin doses used were 0, 1, 1, 5 and 10 mL per liter of water. The evaluation times were 21, 28 and 35 days after cutting. The variables evaluated were root length of the largest root, root number (the number of primary roots), rooting percentage, fresh weight of leaves, fresh weight of stem, fresh weight of roots, dry weight of leaves, dry weight of stem, and dry weight of roots.

Propagation was carried out inside a protective structure of the Vegetable Research and Social Projection Program at the Universidad Nacional Agraria La Molina, Peru with recorded temperature and relative humidity. During the experiment, the minimum temperature reported was 14.4°C, the maximum temperature was 29.1°C and the average temperature was 19.6°C. The maximum relative humidity was 95%, the minimum was 58% and the average relative humidity was 83.74%. For propagation, 12 trays of 25 spaces, each 8.8 cm high, 5.4 cm in diameter and with one cutting were used. In these trays, fine

river sand was used as substrate and the cuttings were watered 6 days a week.

The evaluation of the variables root number, root length and rooting percentage was carried out on the 10 cuttings of each treatment, while the other variables were evaluated on only 3 cuttings per treatment.

Statistical analyses were performed with R Studio software and graphs with Graph Pad Prism software. The ANOVA table was performed for each variable to determine the statistical significance of the factors. Following this, Tukey's test of comparisons ( $p$ -value < 0.05) was conducted to identify significant differences between treatments.

## RESULTS AND DISCUSSION

According to the ANOVA table, for the variable root number, only the time factor was highly significant. In the Tukey test, no significant differences between treatments were observed (Table 1). However, a significant increase in root number was reported as time increased (Figure 1).

Table 1. Average values of the variables root number (RN), root length (RL) in centimeters and rooting percentage (RP) of the 12 treatments.

Treatments	DAA	DA (mL L <sup>-1</sup> )	RN	RL (cm)	RP (%)
1	21	0	2.00 a	1.16 c	20 f
2	21	1	3.00 a	1.20 c	50 e
3	21	5	3.66 a	0.93 c	70 cd
4	21	10	2.33 a	1.00 c	50 e
5	28	0	4.17 a	2.00 c	70 cd
6	28	1	7.17 a	4.20 bc	80 bc
7	28	5	4.33 a	3.48 bc	60 de
8	28	10	5.00 a	5.17 abc	80 bc
9	35	0	3.00 a	4.80 bc	80 bc
10	35	1	7.33 a	7.63 ab	100 a
11	35	5	7.33 a	5.03 abc	80 bc
12	35	10	9.16 a	9.48 a	90 ab

Note: DAA: days after application of Agrostemin, DA: dose of Agrostemin, Different letters indicate significant differences between treatments ( $p$ -value<0.05).

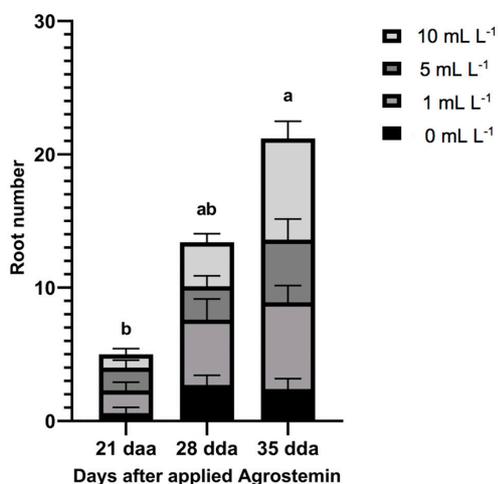


Figure 1. Root number at 21, 28, 35 DAA and according to the doses of Agrostemin.

As for the variable root length (Figure 2), the factors time and dose were highly significant, but not their interaction. At each dose there is an increase in root length as time increases.

In the study carried by Gomes *et al.* (2018), they observed that as *Ascophyllum nodosum* extract concentration increases, root length of *Passiflora actinia* Hook cuttings increases. However, in the present experiment, just at 35 days after the application of Agrostemin, there was a significant difference in root length between the dose of 10 mL L<sup>-1</sup> and the control (Figure 3).

The rooting percentage variable presented high significance for the time and dose factors, as well as for their interaction. Significant differences were found between each time, with 35 dda showing the highest percentage of rooting. On the other hand, for the dose factor, 1 and 10 mL L<sup>-1</sup> showed the highest percentage of rooting. The data reported in Table 1 indicate that the highest percentage of rooting is obtained at 35 dda and with a dose of 1 mL L<sup>-1</sup> of Agrostemin.

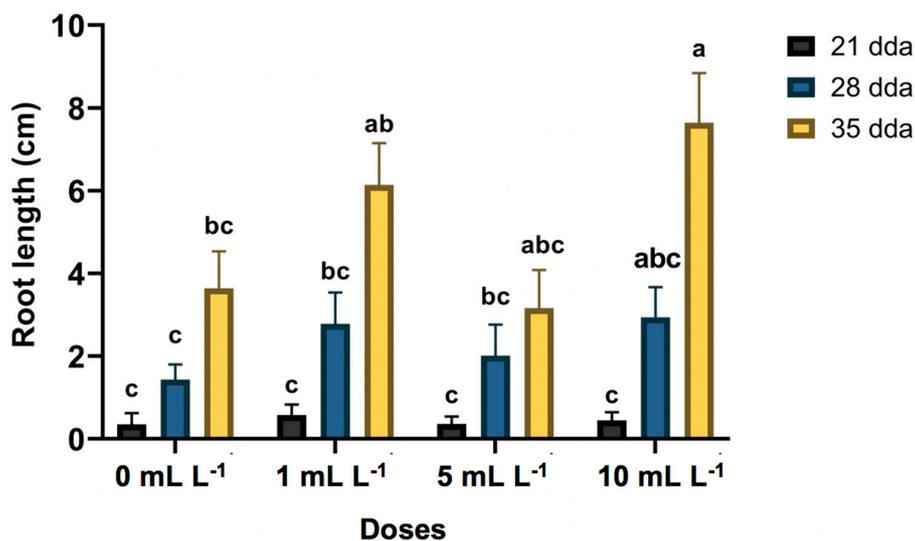


Figure 2. Root length in different doses of Agrostemin and according to three evaluation moments.



Figure 3. Spearmint cuttings at 35 days with 0 (A), 1 (B), 5 (C) and 10 (D)  $\text{mL L}^{-1}$  of Agrostemin.

The evaluations of fresh weight of leaves and roots, and dry weight of leaves, stem and roots did not show significant differences between any of the treatments. The root fresh weight variable shows significant differences in the time and dose factors, but there is no significant interaction between them. In the treatments of time 3, the fresh weight of roots has significant differences compared to the other times (Figure 4). Even if we consider the time factor, it achieved

a significantly higher root dry weight at 35 days after cutting. On the other hand, the treatments to which Agrostemin was applied had a significantly higher root weight than the control. These results are similar to those reported by Elansary (2017), where no significant differences were reported between the dry weights of *Mentha spicata* in the control group and those that received *Ascophyllum nodosum*.

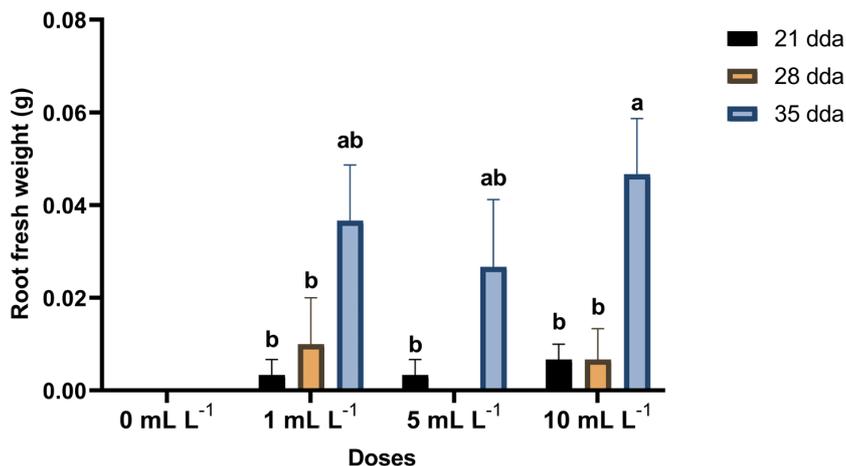


Figure 4. Fresh weight of roots in different doses of Agrostemin and according to three times from its application.

## CONCLUSIONS

*Ascophyllum nodosum* as a biological rooting agent for *Mentha spicata* L. cuttings proved to enhance root length, rooting percentage and root fresh weight in contrast to the control. Particularly, the application of a 10 mL L<sup>-1</sup> dosage yielded the most pronounced improvements in these variables.

Most of the observed variables exhibited an increase with time after cutting. Nevertheless, the fresh and dry weights of leaves and stems did not demonstrate significant differences despite the passage of time since cutting.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Vegetable Research and Social Projection Program of the UNALM for financing and providing the necessary space to develop this project. We also thank the professors who, out of conviction, advised and guided us in obtaining the results. Likewise, to each one of the people who supported us with the smallest action until the project was completed.

## LITERATURE CITED

- Amaro, HTR; Silveira, JR; David, de S David AMS; de Resende, MAV; Andrade, JAS. 2013. Tipos de estacas e substratos na propagação vegetativa da menta (*Mentha arvensis* L.). *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais* 15:313-318.
- Basile, B; Rouphael, Y; Colla, G; Soppelsa, S; Andreotti, C. 2020. Appraisal of emerging crop management opportunities in fruit trees, grapevines and berry crops facilitated by the application of biostimulants. *Scientia Horticulturae* 267:109330.
- Battacharyya, D; Babgohari, MZ; Rathor, P; Prithiviraj, B. 2015. Seaweed extracts as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae* 196:39-48.
- Elansary, HO. 2017. Green roof *Petunia*, *Ageratum*, and *Mentha* responses to water stress, seaweeds, and trinexapac-ethyl treatments. *Acta Physiologiae Plantarum* 39(7):145.
- El Hassani, FZ. 2020. Characterization, activities, and ethnobotanical uses of *Mentha* species in Morocco. *Heliyon* 6(11):e05480.
- Frioni, T; Vander Weide, J; Palliotti, A; Tombesi, S; Poni, S; Sabbatini, P. 2021. Foliar vs. Soil application of *Ascophyllum nodosum* extracts to improve grapevine water stress tolerance. *Scientia Horticulturae* 277:109807.
- García Flores, JC; Gutiérrez Cedillo, JG; Balderas Plata, MÁ; Araújo Santana, MR. 2016. Estrategia de vida en el medio rural del altiplano central mexicano: el huerto familiar. *Agricultura Sociedad y Desarrollo* 13(4):621.
- Gomes, EN; Vieira, LM; Tomasi, JC; Tomazzoli, MM; Grunennvaldt, RL; Fagundes, CM; Brunetti Machado, RC. 2018. Brown seaweed extract enhances rooting and roots growth on *Passiflora actinia* Hook stem cuttings. *Ornamental Horticulture* 24:269-276.
- Guzmán Maldonado, SH; Díaz Huacuz, RS; González Chavira, MM. 2017. Plantas medicinales: La realidad de una tradición ancestral. Guanajuato, México, CIR Centro. 32 p.
- Jacome, JF. 2011. Evaluación de tres mezclas de sustratos y tres fitohormonas en enraizamiento de brotes laterales de babaco (*Carica pentagona*), barrio Pinllocruz, cantón Mejía, provincia de Pichincha. Tesis Lic. Latacunga, Ecuador, Universidad Técnica de Cotopaxi. 83 p.
- Kapoor, RV; Wood, EE; Llewellyn, CA. 2021. Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices. *Biotechnology Advances* 49:107754.
- Kumar, P; Mishra, S; Malik, A; Satya, S. 2011. Insecticidal properties of *Mentha* species: a review. *Industrial Crops and Products* 34(1):802-817.
- Langowski, L; Goñi, O; Ikuyinminu, E; Feeney, E; O'Connell, S. 2022. Investigation of the direct effect of a precision *Ascophyllum nodosum* biostimulant on nitrogen use efficiency in wheat seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry* 179:44-57.
- Mahendran, G; Verma, SK; Rahman, LU. 2021. The traditional uses, phytochemistry and pharmacology of spearmint (*Mentha spicata* L.): A review. *Journal of Ethnopharmacology* 278:114266.
- Membreño, GR. 2019. Comportamiento del desarrollo vegetativo de la hierbabuena (*Mentha spicata* L.) empleando tres diferentes sustratos a nivel de vivero. Tesis Lic. Managua, Nicaragua, Universidad Nacional Agraria. 37 p.
- MIDAGRI (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Perú). 2015. Problemas en la agricultura peruana (en línea). Consultado 7 may. 2023. Disponible en <https://www.midagri.gob.pe/portal/22-sector-agrario/vision-general/190-problemas-en-la-agricultura-peruana?start=1>
- Mokhtarikhah, G; Ebadi, MT; Ayyari, M. 2022. Agromorphological and phytochemical studies of spearmint landraces (*Mentha spicata* L.) in Iran. *Industrial Crops and Products* 176:114367.

- Nolasco Cruz, EE. 2016. Tendencias actuales de las plantas medicinales producidas en el Perú. Tesis Lic. Trujillo, Perú, Universidad Nacional de Trujillo. 23 p.
- Quintero, JJ. 1985. Cultivo del perejil y de la hierba-buena. Madrid, España, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 20 p.
- Resquín, G; Degen, R; Delmás, G; Macchi, G. 2011. Las especies de *Mentha* L. Cultivadas en Paraguay. *Rojasiana* 10(1):77-91.
- Rouphael, Y; Colla, G. 2020. Biostimulants in Agriculture. *Frontiers in Plant Science* 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Salvá, E. 2016. Estabilidad oxidativa y microbiológica de un embutido cocido de vísceras rojas de *Cavia porcellus* con extracto etanólico de *Mentha spicata*. Tesis Lic. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 117 p.
- Serfi. 2022. AGROSTEMIN® -GL (en línea). Consultado 7 may. 2023. Disponible en <https://serfi.biz/wp-content/uploads/2020/02/Ficha-Tecnica-AGROSTEMIN-GL-v10.2022-1.pdf>
- Telci, I; Demirtas, I; Bayram, E; Arabaci, O; Kacar, O. 2010. Environmental variation on aroma components of pulegone/piperitone rich spearmint (*Mentha spicata* L.). *Industrial Crops and Products* 32(3):588–592.
- Telenchana, MM. 2017. Evaluación de tres enraizantes en plántulas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) mediante el método de raíz flotante en la parroquia Mulalillo del cantón Salcedo, provincia de Cotopaxi. Tesis Lic. Cevallos, Ecuador, Universidad Técnica de Ambato. 71 p.



Agronomía Costarricense. Universidad de Costa Rica. Se encuentra licenciada con Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para mayor información escribir a [rac.cia@ucr.ac.cr](mailto:rac.cia@ucr.ac.cr)

Nota técnica

## EFFECTO DE BIOESTIMULANTES SOBRE EL CRECIMIENTO Y LA PRODUCCIÓN DE PEPINO Y MELÓN EN INVERNADERO

*Julio Gabriel-Ortega<sup>1/\*</sup>, Mirian Chilan-Mata<sup>2</sup>, Washington Narváez-Campana<sup>3</sup>, Fernando Ayón-Villao<sup>4</sup>, William Merchán-García<sup>5</sup>, Heidi Flores-Ramírez<sup>6</sup>, Gema Burgos-López<sup>7</sup>*

**Palabras claves:** estadios; producto orgánico; sustancias húmicas; aminoácidos; bacterias; extractos.

**Keywords:** stages; organic product; humic substances; amino acids; bacteria; extracts.

**Recibido:** 18/04/24

**Aceptado:** 05/07/24

### RESUMEN

**Introducción.** Los bioestimulantes son productos orgánicos que mejoran la absorción de nutrientes de las plantas, entre ellos sustancias húmicas, aminoácidos, extractos de algas y bacterias promotoras del crecimiento de las plantas; y se han identificado numerosos mecanismos y de selectividad de bioestimulantes para nutrientes específicos. **Objetivo.** Determinar el efecto de la aplicación de bioestimulantes en la producción de pepino y melón en invernadero. **Materiales y métodos.** Se evaluaron los bioestimulantes BioRemedy 2,0 g L<sup>-1</sup>, Grand Sill 2,0 g L<sup>-1</sup>, Fossil 5,0 g L<sup>-1</sup>, L-Amino 2,0 mL L<sup>-3</sup> y un Testigo (con aplicación de solo agua), en tres estadios de desarrollo de los cultivos. El experimento

fue establecido bajo un diseño experimental completamente aleatorio desbalanceado con 10 tratamientos. Cada unidad experimental estuvo constituida por tres hileras. Las variables de respuestas fueron: altura de planta, grosor de tallo, número de frutos, tamaño del fruto, volumen del fruto y peso de frutos (rendimiento). **Resultados.** Los bioestimulantes tuvieron mejor efecto en la altura de planta, diámetro de tallo, volumen de fruto en el pepino. En melón los bioestimulantes tuvieron mayor efecto en el volumen de fruto y peso. Se encontró que Fossil mostró mejor efecto para la altura de planta en ambas especies y el BioRemedy resultó ser el mejor para el diámetro de tallo, volumen de fruto, peso de fruto y número de frutos. **Conclusión.** El BioRemedy fue el mejor bioestimulante para el diámetro de tallo, el volumen y peso de fruto para el cultivo de pepino

\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: julio.gabriel@unesum.edu.ec

1 Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador.

 0000-0001-9776-9235.

2 Profesional independiente, Jipijapa, Ecuador.

 0009-0009-6337-4206.

3 Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador.

 0000-0002-6674-2088.

4 Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador.

 0000-0003-4772-9344.

5 Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador.

 0000-0002-0328-9001.

6 Profesional independiente, Manta, Ecuador.

 0000-0001-9969-8864.

7 Profesional independiente, Portoviejo, Ecuador.

 0000-0002-0025-3679.

y melón. El L-amino tuvo mejor respuesta para diámetro de tallo en melón.

## ABSTRACT

**Effect of biostimulants on growth and production of cucumber and melon in greenhouse. Introduction.** Biostimulants are organic products that improve plant nutrient absorption, for instance humic substances, amino acids, algae extracts and plant growth-promoting bacteria; and numerous mechanisms and selectivity of specific biostimulants for specific nutrients have been identified. **Objective.** Determine the effect of the application of biostimulants on the production of cucumber and melon in the greenhouse. **Materials and methods.** The biostimulants BioRemedy 2.0 g L<sup>-1</sup>, Grand Sill 2.0 g L<sup>-1</sup>, Fossil 5.0 g L<sup>-1</sup>, L-Amino

2.0 mL L<sup>-3</sup> and a Control with application of only water were evaluated in three stages of crop development. The experiment was established as a completely randomized unbalanced experimental design with 10 treatments. Each experimental unit consisted of three rows. The response variables were: plant height, stem thickness, number of fruits, fruit size, fruit volume and fruit weight (yield). **Results.** The biostimulants had a better effect on plant height, stem diameter, and fruit volume for cucumber. For the melon, fruit volume and weight were affected by biostimulants. It was found that Fossil showed the best effect for plant height in both species and BioRemedy turned out to be the best for stem diameter, fruit volume, fruit weight and number of fruits. **Conclusion.** BioRemedy was the best biostimulant for stem diameter, volume and fruit weight for cucumber and melon cultivation. L-amino had the best response for stem diameter in melon.

## INTRODUCCIÓN

Lobos *et al.* (2020) mencionan que la producción de hortalizas en invernadero es un sistema de cultivo intensivo y tecnológico que puede garantizar la disponibilidad de productos frescos fuera de temporada durante todo el año, independientemente de las condiciones ambientales, aumentando al mismo tiempo la calidad del producto final. Sin embargo, este sistema de cultivo requiere altos insumos de energía y recursos naturales que deben estar alineados con el concepto de agricultura sostenible y el cambio climático actual, en adición a las crecientes demandas de los consumidores de productos de alta calidad y seguridad alimentaria (Andrade Banalcazar y Rodríguez Fernández 2020, Petropoulos 2020). Por lo tanto, la horticultura moderna necesita reinventarse y explorar nuevos caminos que sostengan los recursos naturales, aumenten la productividad de los cultivos dentro de tierras agrícolas limitadas y, finalmente, mejoren la calidad del producto final, de acuerdo

con las tendencias del mercado y las preferencias de los consumidores (Andrade Banalcazar y Rodríguez Fernández 2020, Petropoulos 2020).

La aplicación de bioestimulantes vegetales es un enfoque innovador y respetuoso con el medioambiente hacia la producción de cultivos sostenibles que enfrenta varias limitaciones, como la escasez de agua, el agotamiento de los recursos naturales, los factores de estrés ambiental y el cambio climático (Rouphael *et al.* 2018, Van Oosten *et al.* 2017, Craigie 2011, Tejada *et al.* 2011). El uso de bioestimulantes está indicado en cultivos de alto valor agregado como cultivo de hortalizas y sistemas de cultivos intensificados debido al alto costo de la mayoría de los productos disponibles comercialmente (Szparaga *et al.* 2019). La amplia gama de compuestos que pueden utilizarse como bioestimulantes dicta los diversos mecanismos implicados en los efectos observados, que en varios casos siguen siendo desconocidos (Ruzzi y Aroca 2015). Hasta ahora los mecanismos propuestos incluyen los efectos estimulantes sobre la actividad de las enzimas

implicadas en diversos procesos biosintéticos y de defensa (Gabriel *et al.* 2022), la actividad similar a la hormona de los componentes bioestimulantes y la mejora de la absorción de nutrientes de la planta (Ronga *et al.* 2019). Colla *et al.* (2015) mencionan los efectos establecidos que pueden inducir tolerancia contra factores estresantes abióticos y promover el crecimiento vegetativo y rendimiento de cultivos hortícolas. Las microalgas son bioestimulantes relativamente nuevos que contienen varios componentes bioactivos (polisacáridos y polifenoles) y similares a las fitohormonas que pueden aliviar los efectos negativos del estrés y promover la productividad de los cultivos (Ronga *et al.* 2019, Colla y Roupael 2020, Kulkarni *et al.* 2019). Asimismo, se han reportado efectos de varios bioestimulantes en la absorción de nutrientes de las plantas, incluyendo sustancias húmicas, aminoácidos, extractos de algas y bacterias promotoras del crecimiento de las plantas y se han identificado numerosos mecanismos de selectividad de bioestimulantes específicos para nutrientes específicos (Halpern *et al.* 2015).

A pesar de la prolífica investigación científica reciente sobre bioestimulantes, se necesitan más estudios para revelar los mecanismos que activan, así como identificar los bioestimulantes más adecuados para cultivos y condiciones de crecimiento específicas, especialmente subóptimas, y además sugerir las dosis óptimas y la etapa de desarrollo adecuado de la planta para su aplicación (Petropoulos 2020). Otro aspecto que debe abordarse es la viabilidad en la composición de los bioestimulantes de origen natural, que debe estandarizarse para que estén disponibles comercialmente (Petropoulos 2020).

Por lo mencionado, la presente investigación tuvo como objetivo determinar el efecto de la aplicación de bioestimulantes naturales en la producción asociada de pepino y melón en invernadero en tres estadios de desarrollo de las plantas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación

La investigación fue desarrollada en un invernadero de la Asociación Agroartesanal Puerto La Boca, ubicado en el Recinto Puerto La Boca perteneciente a la parroquia Puerto Cayo del cantón Jipijapa, Ecuador, en latitud: 1°18'20"S y longitud: 80°45'42" O, a una altitud aproximada de 53 msnm. El clima posee una temperatura de 24,8°C; la precipitación promedio anual es de 298 mm, concentrándose la mayor cantidad de lluvia en febrero, mientras que el mes más seco es agosto (Gabriel-Ortega *et al.* 2020). La temperatura promedio en el invernadero fue de 12 a 15°C en la noche y 28°C en el día.

### Tratamientos

En el experimento se evaluó cuatro bioestimulantes y un tratamiento testigo, para un total de 5 tratamientos:

- Fossil 5,0 g L<sup>-1</sup>.
- Gran Sill 2,5 g L<sup>-1</sup>.
- L-Amino 2,0 mL L<sup>-1</sup>
- BioRemedy 2,0 g L<sup>-1</sup>.
- Testigo (aplicación de agua).

Los tratamientos fueron aplicados en tres estadios de desarrollo de la planta (crecimiento, floración y fructificación). Dichos tratamientos se aplicaron en dos cultivos distintos: pepino (*Cucumis sativus* L.), y melón (*Cucumis melo* L.).

### Manejo del experimento

La preparación del suelo dentro del invernadero se realizó manualmente, inicialmente se realizó la remoción y el desterronado. Asimismo, se realizó el análisis de suelo y agua en la Estación Experimental del Litoral Sur del INIAP-Pichilingue, determinándose que el suelo es franco-arcilloso, con una conductividad eléctrica (C.E) de 3,17 mS cm<sup>-1</sup>, materia orgánica (MO) de 0,60%, 2,66 meq 100 mL<sup>-1</sup> de K, 19,43 meq 100

mL<sup>-1</sup> de Ca, y 3,87 meq 100 mL<sup>-1</sup> de Mg. Esto sugirió que el suelo tenía bajo contenido de MO por los que se aplicó biocompost para proporcionar un suelo adecuado a las plantas al momento del trasplante. El biocompost fue aplicado a una dosis de 75 kg por hilera de 33 m. Luego se procedió a la medición del terreno con cinta métrica y estacas de madera, para la formación de las platabandas de 0,50 m de ancho.

Para la pre-germinación, se prepararon cámaras húmedas con papel toalla, donde fueron sembradas las semillas de pepino y melón. A los tres o cuatro días de emergencia fueron transplandadas las plántulas a bandejas con sustrato preparado. Para el trasplante se preparó sustrato con biocompost, hoja de guaba y suelo del lugar, en una proporción 2:1:1. Se adicionó 10 kg de humus de lombriz (compuestos húmicos) y 10 g de micorriza. Una vez preparado el sustrato se procedió a llenar los hoyos, humedecerlas y dejarlas listas para el trasplante. Una vez preparadas todas las bandejas se procedió a realizar el trasplante de las plántulas con la ayuda de una pinza quirúrgica; se aplicó el fungicida carboxin + captan (vitavax) a una dosis de 3,0 g L<sup>-1</sup>, para prevenir enfermedades de mal de almácigo. El riego de las bandejas se realizó dos veces por día para mantener la humedad.

El trasplante definitivo se realizó en hileras, para lo que se hicieron hoyos con una profundidad de 0,15 m a una distancia de 0,30 m entre plantas dentro de la hilera y una distancia de 1,20 m entre hileras, después se procedió al trasplante de una planta por hoyo, para un total de 124 plantas por tratamiento y 41 plantas por hilera. En el trasplante se aplicó 50 g de humus por planta para incentivar el desarrollo de raíces y tallos en un inicio para todos los tratamientos.

Durante el crecimiento a los 10 días después del trasplante (ddt) se inició el control preventivo para los Oomycetes *Pseudoperonospora cubensis* para melón y pepino (Gabriel Ortega *et al.* 2022). Se inició con aplicaciones alternadas de fungicidas sistémicos (metalaxil y mancozeb 2,5 g L<sup>-1</sup>), y fungicidas de contacto (clorotalonil 2,5 mL L<sup>-1</sup>). El fungicida sistémico no se aplicó

en más de tres ocasiones, para evitar la aparición de nuevos biotipos resistentes del Oomycete (Gabriel Ortega *et al.* 2022).

Para el control de insectos-plaga se realizó una aplicación alternada con un insecticida sistémico Thiamethoxan+lamda cihalotrina (0,25 mL L<sup>-1</sup>) y uno de contacto (imidacloprid 0,60 g L<sup>-1</sup>) y/o Neen (orgánico) 4 mL L<sup>-1</sup> (aplicación alternada) en vez del insecticida de contacto (Gabriel Ortega *et al.* 2022). Este proceso alternado fue realizado durante seis semanas. La estrategia fue eficiente para combatir insectos-plaga como la negrita (*Prodiplosis longifilia*), la mosca minadora (*Liriomyza* spp.), el pulgón (*Myzus persicae*), la polilla (*Diaphania* spp.), los trips (*Frankliniella* sp.) y la mosca blanca (*Bemisia* sp.).

Se hizo una fertilización al suelo con NPK a los 30 ddt, debido a que estos elementos no eran lo suficientemente disponibles en el suelo por el análisis realizado. Se usó Yaramira (2,0 g planta<sup>-1</sup>), solufol (100 g 20 L<sup>-1</sup>) y un fertilizante foliar (Chefare 25 mL 20 L<sup>-1</sup>).

Se realizaron podas de formación a un tallo principal para ambos cultivos, las hojas viejas y los brotes se eliminaron para evitar la formación de otras ramas secundarias. El tutoraje se realizó después de la poda, y luego se aplicó un fungicida de contacto (Mancozeb 0,47 g L<sup>-1</sup>) para evitar enfermedades en las heridas causadas por la poda. El riego de las plantas se aplicó por goteo, dos veces por día, durante 15 a 20 min en cada riego. La cosecha se realizó a partir de los 120 días después del trasplante (ddt) en el melón, y a los 40 a 55 ddt en el pepino.

### Diseño experimental

El experimento fue implementado en un diseño experimental desbalanceado completamente aleatorio (DCA) con 10 tratamientos (Gabriel Ortega *et al.* 2021).

Las variables de respuesta evaluadas fueron: altura de planta (cm), diámetro de tallo (mm), volumen del fruto (cm<sup>3</sup>), peso del fruto (kg) y número de frutos por planta. La altura de planta se midió con una cinta métrica desde el cuello de la planta al nivel del suelo hasta el

ápice del tallo principal, el diámetro de tallo se midió con un escalímetro digital y el peso se fue evaluado con una balanza digital.

### Análisis estadístico

Sobre la base en el modelo definido se realizaron análisis de varianza para probar hipótesis acerca de los efectos fijos, así como comparaciones de medias de los tratamientos mediante la prueba de Tukey  $p < 0,05$  de probabilidad. El análisis de varianza también sirvió para estimar los componentes de varianza para los efectos aleatorios. Los análisis indicados se realizaron mediante el Proc GLM del SAS software (Statistical Analysis Systems version 9.4, Cary, NC 27513).

### Análisis de normalidad

El análisis de normalidad para las variables mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov al  $p < 0,05$  de probabilidad no fue significativa, lo que se sugirió que las variables tuvieron

distribución normal. Asimismo, se determinó a través de la prueba de Chi Cuadrada al  $p < 0,05$  de probabilidad que no hubo diferencias significativas entre las varianzas, denotado que hubo homogeneidad de varianzas. La excepción fue el volumen de fruto, que no mostró normalidad y se transformó a raíz cuadrada ( $\sqrt{x+0,5}$ ), para el análisis de varianza y la comparación de medias.

## RESULTADOS

### Cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.)

En pepino se presentaron diferencias altamente significativas ( $p < 0,01$ ) entre tratamientos (bioestimulantes: L-Amino, Fossil, Testigo, Grand Sill y Bioremedy), determinándose que tuvieron efectos sobre el Dtallo, Vfruto y Nfrutos (Tabla 1). Los coeficientes de variación (CV), estuvieron entre 15 a 30%, rango permitido para este tipo de investigaciones.

Tabla 1. Análisis de varianza para altura de planta (m), diámetro de tallo (cm), volumen de fruto (cm<sup>3</sup>), peso de fruto (kg) y número de frutos en pepino (*Cucumis sativus* L.).

FV	gl	Cuadrados medios				
		Aplanta	Dtallo	Vfruto	Pfruto	Nfrutos
Trat	4	0,25ns	0,17**	353,59**	0,01ns	4,80*
Error	95	0,15	0,02	81,29	0,01	1,92
Total	99					
CV (%)		17,44	14,38	15,87	30,46	18,75

\*: Significativo al  $p < 0,05$  de probabilidad, \*\*: Altamente significativo al  $p < 0,01$  de probabilidad, ns: No significativo, Dtallo: Diámetro de tallo (mm), Vfruto: Volumen de fruto (cm<sup>3</sup>), Pfruto: Peso de fruto (kg), Nfrutos: Número de frutos.

El análisis de medias de los tratamientos (bioestimulantes: L-amino, Fossil, Grand Sill y Bioremedy) mediante la prueba múltiple de Tukey, mostró diferencias significativas al  $p < 0,05$  de probabilidad (Tabla 2), para Dtallo y Vfruto, determinándose que Bioremedy tuvo mejor respuesta respecto del testigo y los demás bioestimulantes para las variables analizadas.

Las otras variables como Aplanta, Pfruto y Nfrutos no mostraron diferencias significativas.

### Cultivo de melón (*Cucumis melo* L.)

El análisis de varianza (ANDEVA) para melón mostró diferencias altamente significativas al  $p < 0,01$  de probabilidad para los

tratamientos (bioestimulantes: L-amino, Fosill, Testigo, Grand Sill y Bioremedy), determinándose que tuvieron efectos sobre el Dtallo, Vfruto y Pfruto (Tabla 3). Los coeficientes de variación (CV), estuvieron entre 16 a 32%.

Tabla 2. Análisis de medias para pepino (*Cucumis sativus* L.) mediante la prueba múltiple de Tukey al  $p < 0,05$  de probabilidad.

Tratamiento	Aplanta	Dtallo	Vfruto	Pfruto	Nfrutos
Fosil	2,40 a	1,07 ab	54,58 ab	0,47 a	7,70 a
Bioremedy	2,19 a	1,18 a	62,28 a	0,44 a	8,10 a
Testigo	2,19 a	1,05 abc	52,93 b	0,44 a	7,20 a
L-amino	2,16 a	0,92 c	53,96 b	0,44 a	6,90 a
Grand sill	2,10 a	1,02 bc	60,37 ab	0,46 a	7,10 a
DSH	0,34	0,13	7,92	0,42	1,22 a

DSH: Diferencia significativa honesta, Dtallo: Diámetro de tallo (mm), Vfruto: Volumen de fruto (cm<sup>3</sup>), Pfruto: Peso de fruto (kg), Nfrutos: Número de frutos.

Tabla 3. Análisis de varianza para altura de planta (m), diámetro de tallo (cm), volumen de fruto (cm<sup>3</sup>), peso de fruto (kg) y número de frutos en melón (*Cucumis melo* L.).

FV	gl	Cuadrados medios			
		Aplanta	Dtallo	Vfruto	Pfruto
Trat	4	0,71ns	0,13**	69434,43**	0,22*
Error	95	0,08	0,03	18137,46	0,08
Total	99				
CV (%)		24,39	18,74	15,87	31,59

\*: Significativo al  $p < 0,05$  de probabilidad, \*\*: Altamente significativo al  $p < 0,01$  de probabilidad, ns: No significativo, Dtallo: Diámetro de tallo (mm), Vfruto: Volumen de fruto (cm<sup>3</sup>), Pfruto: Peso de fruto (kg), Nfrutos: Número de frutos.

El análisis de medias de los tratamientos (bioestimulantes: L-amino, Fosill, Testigo, Grand Sill y Bioremedy) mediante la prueba múltiple de Tukey, mostró diferencias significativas al  $p < 0,05$  de probabilidad (Tabla 4), para Aplanta

y DTallo el mejor tratamiento fue el L-amino respecto del Bioremedy. Para volumen de fruto el mejor tratamiento fue Bioremedy respecto del testigo. Respecto del Pfruto, no se observaron diferencias significativas.

Tabla 4. Análisis de medias para melón (*Cucumis melo* L.) mediante la prueba múltiple de Tukey al  $p < 0,05$  de probabilidad.

Tratamiento	Aplanta	Dtallo	Vfruto	Pfruto
L-amino	1,40 a	0,99 a	411,23 ab	1,00 a
Testigo	1,28 ab	0,79 b	317,75 b	0,86 a
Fosil	1,24 ab	0,82 b	314,93 b	0,82 a
Grand sill	1,12 bc	0,81 b	340,19 ab	0,87 a
Bioremedy	0,91 c	0,88 ab	444,99 a	1,06 a
DSH	0,25	0,14	118,43	0,26

DSH: Diferencia significativa honesta, Dtallo: Diámetro de tallo (mm), Vfruto: Volumen de fruto (cm<sup>3</sup>), Pfruto: Peso de fruto (kg), Nfrutos: Número de frutos.

## DISCUSIÓN

Futureco bioscience (2024), menciona que los bioestimulantes son materiales que contienen sustancia(s) y/o microorganismos cuya función, cuando se aplica a las plantas o a la rizosfera, es estimular los procesos naturales para beneficiar la absorción de nutrientes y la eficiencia de los mismos, la tolerancia al estrés abiótico, y/o la calidad de los cultivos, independientemente de su contenido en nutrientes.

Dentro de los tipos de bioestimulantes, existen de base ácida, extractos de algas y plantas, bioestimulantes microbianos y compuestos inorgánicos (Rodríguez Millán *et al.* 2013). En cada caso, estas sustancias presentan sus propios beneficios en cuanto a la mejora de la fertilidad, la potenciación del vigor, ventajas en la salud de la planta y aumento en la calidad de los cultivos agrícolas. En todos los casos, el momento y la dosis de aplicación del bioestimulante son fundamentales y deben ajustarse a cada cultivo y región.

Por su parte, Ribaut y Poland (2000), mencionan que la aplicación de los bioestimulantes, permite que las plantas desarrollen frente a los organismos patógenos, mecanismos de defensas muy complejos y variados. Estos mecanismos pueden ser constitutivos o inducibles. Los mecanismos inducibles se pueden activar sistémicamente en células y tejidos alejados, adquiriendo la planta una inmunidad fisiológica. En este sentido, el resultado es la inducción de Resistencia Sistémica y con ello, de un conjunto de proteínas y compuestos de defensa que incluyen enzimas involucradas en la vía de síntesis de los fenilpropanoides (Fenilalanina amonio liasa (PAL); Chalcona sintasa (CHS), Peroxidasas (PO), entre otras), glicoproteínas ricas en hidroxiprolina (HyP), relacionadas con el reforzamiento de la pared celular, y Glucanasas y Quitinasas que hidrolizan las paredes celulares de los hongos.

Sin embargo, se requieren de más estudios para comprender mejor el uso de los bioestimulantes, varios autores reportaron algunas desventajas que se deben considerar al momento de aplicar estos bioestimulantes (Starobinsky *et al.* 2021), algunos de los cuales es que son costosos, el mal

uso de los bioestimulantes, traducido en excesos de dosificación, puede causar efectos negativos en los cultivos (Starobinsky *et al.* 2021).

En el presente trabajo de investigación, no se determinaron efectos negativos y fue notorio que los bioestimulantes incentivaron a una mayor altura de planta, diámetro de tallo, volumen de fruto en el cultivo de pepino. Por otro lado el volumen de fruto y peso de fruto en el cultivo de melón presentaron diferencias asociadas a los bioestimulantes. Al respecto Romero (2011), menciona que en un experimento con el melón Edisto 47 con sistemas de poda y la aplicación foliar de bioestimulantes, demostró diferencias estadísticas para la producción de frutos por hectárea. Asimismo, el autor indica que la implementación de aspersión de bioestimulantes Vitazyme (1,0 L ha<sup>-1</sup>) y Enerplant (20 g ha<sup>-1</sup>) en cuatro fases del desarrollo (3, 5, 7 y 9 semanas), permitió obtener una rentabilidad que supera al testigo absoluto (sin aplicación). Los resultados reportados en la presente investigación concuerdan con los reportados por Gabriel Ortega (2021) y Gabriel-Ortega *et al.* (2022), en pepino.

Se determinó que el Fossil mostró mejor efecto para la altura de planta para pepino y melón, mientras que el BioRemedy resultó ser mejor para el diámetro de tallo, volumen de fruto, peso de fruto y número de frutos. En referencia a lo mencionado, Gabriel-Ortega *et al.* (2022) al evaluar estos bioestimulantes encontraron diferencias significativas para altura de planta con el BioRemedy, Fossil, L-amino y el testigo respecto a Grand sill, sin diferencias significativas entre las demás variables.

En este estudio se observó mejores resultados para el Fossil versus el Grand sill y el BioRemedy, contrariamente a lo observado por Gabriel-Ortega *et al.* (2022) en tomate. Asimismo, se determinó que para el peso de fruto los bioestimulantes L-amino y el BioRemedy fueron mejores que Fossil. En cambio, Gabriel-Ortega *et al.* (2022) observaron un mejor efecto del BioRemedy en comparación al testigo y los demás tratamientos. Estos resultados, concuerdan lo que se encontró en este experimento donde se determinó

que el bioestimulante BioRemedy fue el mejor respecto del L-amino.

Se debe mencionar que, el BioRemedy es un producto orgánico compuesto de ácidos húmicos, matadextrina, sacarosa, extracto de algas y aminoácidos totales, que incentiva el desarrollo de rizobacterias que promueven el crecimiento de la planta, bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre, bacterias promotoras de enzimas extracelulares, hongos que promueven la descomposición, transformación y ciclo de los nutrientes del suelo (White *et al.* 2016). En cambio, el Grand sill es un biocatalizador que estimula la función de respiración, endurece el tallo, hojas y raíces que las hace resistentes (White *et al.* 2016). El L-amino es un complejo de aminoácidos que se utiliza como bioestimulador foliar y puede incrementar la resistencia de la planta a condiciones adversas. Finalmente el Grand sill contiene silicio, potasio y ácido monosilícico y actúa como potenciador agrícola, el cual aumenta la conductividad eléctrica, incrementa la capacidad de intercambio catiónico e incorpora minerales insolubles, estimulando la actividad microbiana en el suelo, mejora la estructura de los suelos y por ende el manejo del agua, como consecuencia las plantas tendrán accesos a más nutrientes, resistirán mejor el estrés e incrementará notablemente la producción (White *et al.* 2016).

Respecto al peso de fruto no hubo diferencias significativas para ninguno de los tratamientos. Sin embargo, se observó una tendencia de mejor rendimiento para los tratamientos realizados con BioRemedy y L-Amino respecto del testigo.

## CONCLUSIONES

El Bioremedy mostró mejor respuesta para el diámetro de tallo y el volumen de fruto para el cultivo de pepino, respecto del testigo y los demás tratamientos. Para peso de fruto y número de frutos no hubo diferencias notorias.

El L-amino tuvo mejor respuesta para diámetro de tallo y diámetro de tallo en melón, respecto del testigo y los demás bioestimulantes.

Respecto al volumen de fruto en el cultivo de melón hubo mejor respuesta con Bioremedy. No hubo diferencias significativas de respuesta en el peso de fruto.

## AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto Producción de hortalizas en invernadero y campo. Fase I-2022, de la Universidad Estatal del Sur de Manabí. A las personas agricultoras de Puerto La Boca y al estudiantado involucrado en esta investigación.

## LITERATURA CITADA

- Andrade Banalcazar, D; Rodríguez Fernández, P. 2020. Producción sostenible de pepino (*Cucumis sativus* L.) con la aplicación de bioestimulantes foliares en casa de cultivo protegido (en línea). Revista Científica Interdisciplinaria Investigación y Saberes 10(2):17-25. Consultado 6 set. 2023. Disponible en [http://revistasdigitales.utelvt.edu.ec/revista/index.php/investigacion\\_y\\_saberes/article/view/106/45](http://revistasdigitales.utelvt.edu.ec/revista/index.php/investigacion_y_saberes/article/view/106/45)
- Colla, G; Nardi, S; Cardarelli, M; Ertani, A; Lucini, L; Canaguier, R; Roupael, Y. 2015. Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture. Sci. Hort. 196:28-38. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.037>
- Colla, G; Roupael, Y. 2020. Microalgae: New Source of Plant Biostimulants. Agronomy 10:1240. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091240>
- Craigie, J. 2011. Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. J. Appl. Phycol. 23:371-393. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4>
- Futureco bioscience. 2024. ¿Qué son los bioestimulantes agrícolas?. Consultado 6 set. 2023. Disponible en <https://www.futurecobioscience.com/bioestimulantes-agricolas/>
- Gabriel Ortega, J; Valverde Lucio, A; Indacochea Ganchozo, B; Castro Piguave, C; Vera Tumbaco, M; Alcívar Cobeña, J; Vera, R. 2021. Diseños experimentales: Teoría y práctica para experimentos agropecuarios (en línea). Guayaquil: Grupo de capacitación e investigación pedagógica. 205 p. Consultado 6 set. 2023. Disponible en <http://142.93.18.15:8080/jspui/handle/123456789/625>
- Gabriel Ortega, J. 2021. Libro verde Agro - UNESUM informa. Producción de hortalizas de alta calidad en condiciones de invernadero. Guayaquil: Editorial Grupo Compas (en línea). 212 p. Consultado 6 set. 2023. Disponible en [https://www.academia.edu/45602984/Libro\\_verde\\_Agro\\_UNESUM\\_informa](https://www.academia.edu/45602984/Libro_verde_Agro_UNESUM_informa)

- Gabriel-Ortega, J; Chonillo Pionce, P; Narváez Campana, W; Fuentes Figueroa, T; Ayón Villao, F. 2022. Evaluación de cuatro bioestimulantes en la inducción de la resistencia sistémica en pepino (*Cucumis sativus* L.) y tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) en monocultivo y cultivo asociado en invernadero. *Journal of the Selva Andina Research Society* 13(2):69-79. DOI: <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2022.130200069>
- Gabriel-Ortega, J; Delvalle-García, J; Padilla-Piloso, J; Pincay-Quijije, N; Ayón-Villao, F; Narváez-Campana, W; González-Vázquez, A. 2020. Innovaciones en la matriz productiva hortícola para reducir el efecto del cambio climático en Puerto La Boca, Jipijapa, Ecuador (en línea). *Journal of the Selva Andina Research Society* 11(1):2-17. Consultado 6 set. 2023. Disponible en [http://www.scielo.org/bo/pdf/jsars/v11n1/v11n1\\_a02.pdf](http://www.scielo.org/bo/pdf/jsars/v11n1/v11n1_a02.pdf)
- Halpern, M; Bar-Tal, A; Ofek, M; Minz, D; Muller, T; Yermiyahu, U. 2015. The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake. *Adv. Agron.* 130:141-174.
- Kulkarni, MG; Rengasamy, KRR; Pendota, SC; Gruz, J; Plačková, L; Novák, O; Doležal, K; Van Staden, J. 2019. Bioactive molecules derived from smoke and seaweed *Ecklonia maxima* showing phytohormone-like activity in *Spinacia oleracea* L. *New Biotechnol.* 48:83-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.08.004>
- Lobos, P; Vega, B; Carrasco, J. 2020. Producción de hortalizas bajo invernadero. Utilización de una unidad de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias in *Manual de prácticas y lecciones aprendidas para adaptación al cambio climático para la agricultura de secano de la región de O'Higgins Chile* (en línea). Consultado 19 set. 2023. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/68837/Capitulo%209.pdf?sequence=12&isAllowed=y>
- Petropoulos, SA. 2020. "Practical applications of plant biostimulants in greenhouse vegetable crop production". *Agronomy* 10(10):1569. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10101569>
- Ribaut, JM; Poland, D. 2000. Molecular approaches for the genetic improvement of cereals for stable production in water-limited environments. *Texcoco: CIMMYT, Texcoco, México*. Consultado 19 set. 2023. Disponible en <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/583/70296.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez Millán, KA; Monreal Vargas, CT; Huerta Diaz, J; Soria Colunga, JC; Jarquín Gálvez, R. 2013. Aporte de microorganismos benéficos por la Incorporación al suelo de residuos deshidratados de Col (*Brassica oleracea* var capitata) y su Efecto en el pH. *Revista mexicana de fitopatología (en línea)* 31(1):29-44. Consultado 6 set. 2023. Disponible en <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmfi/v31n1/v31n1a4.pdf>
- Romero, R. 2011. Efecto de tres sistemas de poda y aplicación de bioestimulantes en el cultivo de melón *Cucumis melo* L. híbrido Edisto. Tesis, Machala, Ecuador Universidad Técnica de Machala. sp. Consultado 6 set. 2023 Disponible en [https://rrae.cedia.edu.ec/Record/UTMACH\\_cbea1587809ff3e2cfb554c8da0172c6](https://rrae.cedia.edu.ec/Record/UTMACH_cbea1587809ff3e2cfb554c8da0172c6)
- Ronga, D; Biazzi, E; Parati, K; Carminati, D; Carminati, E; Tava, A. 2019. Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. *Agronomy* 9:192. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9040192>
- Rouphael, Y; Kyriacou, MC; Petropoulos, SA; De Pascale, S; Colla, G. 2018. Improving vegetable quality in controlled environments. *Sci. Hort.* 234:275-289. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.033>
- Ruzzi, M; Aroca, R. 2015. Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture. *Sci. Hort.* 196:124-134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.042>
- Starobinsky, G; Monzón, J; Di Marzo Broggi, E; Braude, E. 2021. Bioinsumos para la agricultura que demandan esfuerzos de investigación y desarrollo (en línea). *Capacidades existentes y estrategia de política pública para impulsar su desarrollo en Argentina*. Documentos de Trabajo del CCE N° 17. Consejo para el Cambio Estructural - Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación. Consultado 6 set. 2023. Disponible en [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2021/03/dt\\_17\\_-\\_bioinsumos.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2021/03/dt_17_-_bioinsumos.pdf)
- Szparaga, A; Kuboń, M; Kocira, S; Czerwinska, E; Pawłowska, A; Hara, P; Kobus, Z; Kwaśniewski, D. 2019. sustainable agriculture-agronomic and economic effects of biostimulant use in common vean cultivation. *Sustainability* 11:4575. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11174575>
- Tejada, M; Benitez, C; Gómez, I; Parrado, J. 2011. Use of biostimulants on soil restoration: Effects on soil biochemical properties and microbial community. *Appl. Soil Ecol.* 49:11-17. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.009>

- Van Oosten, MJ; Pepe, O; De Pascale, S; Silletti, S; Maggio, A. 2017. The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 4:1-12. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-017-0089-5>
- White, CA; Holmes, HF; Morris, NL; Stobart, RM. 2016. A review of the benefits, optimal crop management practices and knowledge gaps associated with different cover crop species (en línea). Warwickshire: Agriculture and Horticulture Development Board. 94 p. Consultado 6 set. 2023. Disponible en <https://ahdb.org.uk/a-review-of-the-benefits-optimal-crop-management-practices-and-knowledge-gaps-associated-with-different-cover-crop-species>



Agronomía Costarricense. Universidad de Costa Rica. Se encuentra licenciada con Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para mayor información escribir a [rac.cia@ucr.ac.cr](mailto:rac.cia@ucr.ac.cr)

Revisión de literatura

## POTENCIAL HÍDRICO Y CONTENIDO DEL AGUA EN EL SUELO: MÉTODOS DE ANÁLISIS DISPONIBLES Y SUS IMPLICACIONES EN EL MANEJO DE LOS RECURSOS SUELO Y AGUA

*Carlos Hidalgo-Campos<sup>1</sup>, Manuel E. Camacho-Umaña<sup>2/\*</sup>*

**Palabras clave:** física de suelos; hidrología; riego y drenaje; gestión de recursos naturales; metrología.

**Keywords:** soil physics; hydrology; irrigation and drainage; natural resources management; metrology.

**Recibido:** 05/01/24

**Aceptado:** 28/04/24

### RESUMEN

**Introducción.** En la actualidad, los sistemas agropecuarios y forestales se han visto fuertemente afectados por la variabilidad de los fenómenos climáticos, entre ellos El Niño Oscilación Sur (ENOS). Debido a estas circunstancias, un manejo adecuado y eficiente de los recursos naturales como el suelo y agua resulta imperativo para garantizar una producción sostenible. Para ello, el estudio de las variables físicas del suelo, tales como el contenido del agua en el suelo y su correspondiente estado energético (potencial hídrico total) es fundamental. **Objetivo.** Describir las principales metodologías para la determinación del contenido de agua y el potencial hídrico en el suelo, así como las potenciales implicaciones de la selección de un método en el manejo de los recursos naturales (agua y suelo). **Metodología.**

En la determinación del contenido de agua en el suelo se hizo referencia a los métodos de determinación directa como el análisis gravimétrico y a otras metodologías indirectas que utilizan las propiedades electromagnéticas del suelo para inferir su contenido de agua. En la evaluación y determinación del potencial hídrico se abordaron los métodos que se realizan tanto en condiciones de campo como en el laboratorio. En el caso de las determinaciones en laboratorio se dividieron según el rango de medición desde valores altos de potencial (cercanos al suelo húmedo; tensiones < 0,1 MPa) hasta valores de potencial muy bajos (cercanos al suelo seco; 0,1 - 1,5 MPa de tensión). **Análisis.** Se contrastaron las distintas metodologías en función de sus fortalezas, limitaciones, así como su potencial uso en sistemas agrícolas. **Conclusión.** Una adecuada selección de los métodos de análisis para estas dos variables físicas del suelo resulta fundamental para gestionar

\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: manuel.camachoumana@ucr.ac.cr

1 Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Centro de Investigaciones Agronómicas, San Pedro, Costa Rica.

 0009-0008-7383-6729.

2 Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Centro de Investigaciones Agronómicas, San Pedro, Costa Rica.

 0000-0001-7589-8327.

eficazmente los recursos suelo y agua, generando a su vez un impacto positivo en la productividad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas, forestales y los servicios ecosistémicos asociados.

## ABSTRACT

**Soil water potential and content: A concise review of their methods of analysis and implications within soil and water management. Introduction.** Currently, agricultural and forestry systems have been strongly affected by the variability in climatic phenomena such as El Niño Southern Oscillation (ENSO). Due to these circumstances, a proper and efficient management of natural resources like soil and water becomes mandatory to attain sustainability. Therefore, the study of soil physical properties such as soil water content and its corresponding energy state (known as water potential) is fundamental. **Objective.** To describe the main methodologies employed to determine soil water content and soil water

potential, as well as the selection criteria and its possible implications in natural resources (soil and water) management. **Methods.** Within soil water content, we refer to direct methodologies such as gravimetric measurements, as well as indirect methods based on the assessment of soil electromagnetic properties. Meanwhile, methods to determine soil water potential can be separated as field and laboratory measurement methods. Within the last methods, they can be categorized depending on the range of measurement, being those high-water potential values (close to wet soil state; tension < 0.1 MPa) and low-water potential values (close to dry soil state; 0.1 - 1.5 MPa tension). **Analysis.** All these aforementioned methodologies were contrasted by their strengths, weaknesses, as well as its potential use within different agricultural systems. **Conclusion.** A proper choosing of methods for analysis of both soil physical properties becomes fundamental for a proper management of soil and water resources, impacting positively the productivity and sustainability of agriculture and forestry systems, and their associated ecosystemic services.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los diversos ecosistemas terrestres se destaca al suelo como un recurso natural esencial y un elemento fundamental en el ciclo hidrológico (Hartge *et al.* 2016). Este cuerpo natural, compuesto de partículas, poroso y heterogéneo se considera una membrana que cubre la superficie del planeta y cumple diversas funciones específicas (Hillel 1998). Entre ellas destacan la interacción con la atmósfera del planeta y sus fenómenos, el almacenamiento de energía, agua, y componentes biogeoquímicos, así como el papel de acervo genético de gran cantidad de especies y un medio de reserva para el carbono (Lal 2012, Hartge *et al.* 2016).

Dada su naturaleza porosa, los suelos exhiben la capacidad de retener y conducir agua,

lo que les confiere una propiedad fundamental para el desarrollo de diversos organismos vivos. Entre dichos organismos, destacan las plantas y su papel crucial en la interacción del continuo suelo-planta-atmósfera (Anderson *et al.* 2003). En efecto, la vida en el planeta ha sido posible gracias a la presencia del agua y sus características fisicoquímicas particulares, las condiciones de presión y temperatura ambientales (Hillel 1998), en adición a la disponibilidad de un medio como el suelo que almacene, purifique y recicle este líquido.

Sin embargo, la variabilidad climática asociada con fenómenos atmosféricos como El Niño Oscilación Sur (ENOS) ha venido afectando fuertemente a los ecosistemas terrestres, así como a las reservas de agua, la ocurrencia de huracanes y otros eventos climáticos severos

(Collins *et al.* 2010). Uno de los efectos tangibles del fenómeno ENOS es la reducción en la magnitud y la distribución de la precipitación pluvial, lo cual puede generar eventos de déficit hídrico inclusive en regiones donde las condiciones climáticas normales generan superávit hídrico (Muñoz-Jiménez *et al.* 2019). Esto impacta de forma directa las relaciones masa-volumen de las fracciones sólida, líquida y gaseosa del suelo, afectando su funcionalidad como un hábitat para el crecimiento vegetal (Hartge *et al.* 2016).

Por todo lo anterior, un manejo apropiado y eficiente de los recursos suelo y agua resulta fundamental para asegurar no solamente una producción sostenible dentro de los sistemas agrícolas y forestales; también para mitigar el potencial impacto de la degradación de los suelos en el país.

Dicha degradación del recurso suelo impacta los servicios ecosistémicos asociados, debido a que el suelo es la matriz en la que ocurren gran cantidad de procesos biológicos, químicos y físicos que tienen implicaciones tanto ambientales como sociales (Powlson *et al.* 2011). En específico, se requiere un conocimiento sobre el contenido de agua en el suelo asociado con su respectivo valor de energía potencial (potencial hídrico total), las cuales son variables físicas primordiales que se utilizan en el modelado hidrológico, la gestión del agua para uso agrícola y la mayoría de los estudios de suelos (Gardner 1986).

También, la determinación de estas dos variables físicas del suelo permite una mejor comprensión de la dinámica climática global, debido al papel fundamental de la humedad del suelo en el balance hídrico y energético de la superficie de los paisajes, así como su impacto en la distribución y magnitud de las lluvias, la temperatura ambiental y evapotranspiración (Seneviratne *et al.* 2010). Por lo anterior, el estudio del potencial hídrico y el contenido del agua

en el suelo resulta de utilidad en diversidad de investigaciones, como los eventos extremos por inundaciones y sequías, el ciclo del carbono, la estimación del rendimiento de los cultivos, y muchas otras aplicaciones en ciencias exactas y agrarias.

El presente trabajo pretende describir de forma concisa las principales metodologías de análisis empleadas en la determinación del contenido de agua y el potencial hídrico en el suelo, así como las potenciales implicaciones de la selección de un método en el manejo de los recursos naturales (agua y suelo). Para esto se definen los conceptos de contenido y potencial del agua en el suelo, abordando en conjunto las principales metodologías de análisis y determinación empleadas. Además, se contrastan los métodos en función de sus fortalezas y debilidades, en adición a su potencial uso en suelos agrícolas. Por último, se discuten las implicaciones de los resultados obtenidos bajo distintos métodos sobre las decisiones en el manejo del riego agrícola y sus potenciales consecuencias e implicaciones en los sistemas de producción.

## **Contenido y potencial del agua en el suelo**

### **1. Contenido de agua en el suelo**

En física de suelos se estudia el suelo como un sistema heterogéneo, polifásico, compuesto de partículas, disperso, y poroso, con límites definidos y compuestos por tres fases principales: 1) Fase sólida, 2) Fase líquida, y 3) Fase gaseosa (Hillel 1998). Debido al carácter poroso y tridimensional del suelo, el agua se puede almacenar en los espacios vacíos del mismo, los cuales constituyen una red compleja denominada porosidad (Figura 1). También, el agua se puede adsorber a la superficie de las partículas individuales dentro del suelo, cubriendo las superficies de estos elementos de la fase sólida.

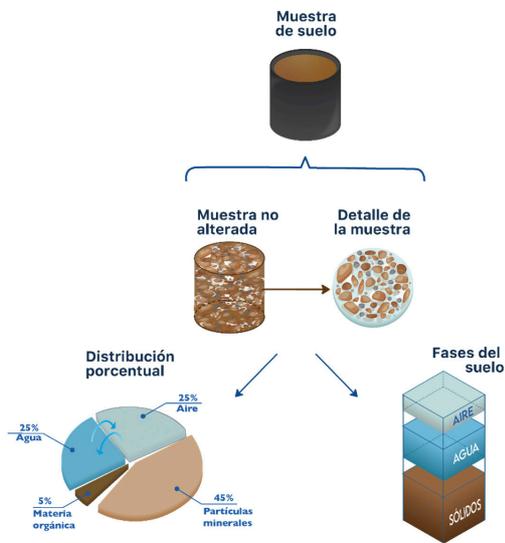


Figura 1. El suelo como un ente tridimensional, sus fases y porcentajes aproximados de los distintos componentes en un suelo ideal.

Esta capacidad de almacenamiento o retención de agua obedece a dos fuerzas principales: 1) Fuerza de adhesión o fuerzas de atracción entre las moléculas de agua y partículas de suelo debido a cargas electrostáticas, y 2) Fuerzas de cohesión o de atracción entre partículas de agua debido a enlaces del tipo puente de hidrógeno y fuerzas van der Waals (Hillel 1998, Hartge *et al.* 2016). De forma más precisa, el contenido de agua en el suelo se define como la cantidad de agua presente, ya sea por unidad de masa de suelo seco ( $\text{g g}^{-1}$ ) o bien por unidad de volumen de suelo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ). Por lo general, esta última expresión del agua en el suelo es preferida debido a su utilidad en los cálculos de hidrología y física de suelos, por ejemplo, las necesidades de riego y drenaje en agricultura (Calvo 2005), o bien en los cálculos dentro de distintos modelos numéricos que permiten la simulación del movimiento de agua y solutos en el suelo (Skaggs *et al.* 2012, Šimůnek *et al.* 2016).

Para la medición y determinación del contenido de agua en el suelo, existe una diversidad

de metodologías que se clasifican comúnmente en dos categorías: métodos directos e indirectos (Tabla 1). Estos métodos (Figura 2) se describen en detalle a continuación.



Figura 2. Metodologías y dispositivos para la determinación del contenido de agua en el suelo. A) Gravimetría mediante horno convectivo. B) Gravimetría mediante horno de microondas. C) Sensor del tipo reflectometría del dominio del tiempo (TDR) CS616 (Campbell Scientific). D) Sensor del tipo reflectometría de la frecuencia del dominio (FDR) EC-5 (METER Group Inc.). Sensores basados en la capacitancia del suelo: E) Teros 10 (METER Group Inc.) y F) Sensores de capacitancia con acople a un microprocesador (Arduino).

Tabla 1. Principales métodos utilizados para determinar el contenido de agua en el suelo y sus consideraciones generales.

Método	Principio de medición	Rango de medición	Tiempo necesario	Exactitud	Costo aproximado	Ventajas	Desventajas	Referencias
Métodos directos								
Horno convectivo	Cambio de masa por secado	w 0-100%	24 horas	± 0,01 g en muestras de 100 g suelo	~\$440	Considerado como método estándar. Método muy preciso. Sencillo de realizar. Viable con equipo básico de laboratorio.	Método destructivo. Requiere más tiempo. Presencia de rocas afecta la precisión. Altos contenidos de MO afectan la precisión. Requiere de P <sub>h</sub> para convertir w a $\theta$ .	Schmugge <i>et al.</i> (1980). Gardner (1986). Topp y Ferré (2002).
Horno microondas	Cambio de masa por secado	w 0-100%	~5-20 minutos	± 0,01 g en muestras de 10-50 g suelo	~\$120	Amplia disponibilidad del equipo. Costo mínimo. Facilidad de transporte. Secado rápido de las muestras.	Se requiere regular el tiempo de secado porque la temperatura puede elevarse por encima de los 105 °C, y generar ignición o un calentamiento desigual de las muestras. Requiere de contenedores de teflón o porcelana.	Gee y Dodson (1981). Diprose (2001). Topp y Ferré (2002). Kramarenko <i>et al.</i> (2016).
Métodos indirectos								
TDR	Constante dieléctrica ( $K_v$ )	$\theta$ 0-100%	~28 segundos	±0,01 %	\$450 – \$25150*	Técnica no destructiva. Portátil, fácil de instalar y operar. Alta exactitud y precisión. Mediciones continuas <i>in situ</i> . Capacidad de automatización. Independiente de otras variables del suelo, como textura o densidad aparente.	Alto costo respecto a otros sensores. Requiere calibración específica del suelo. Exactitud limitada en suelos salinos y arcillosos. Sensible al volumen de suelo en evaluación.	Topp <i>et al.</i> (2000). Noborio (2001). Walker <i>et al.</i> (2004). Bittelli (2011).

Método	Principio de medición	Rango de medición	Tiempo necesario	Exactitud	Costo aproximado	Ventajas	Desventajas	Referencias
FDR	Constante dieléctrica ( $K_v$ )	$\theta$ 0-100%	Instantáneo	$\pm 0,025$ %	\$10 – \$4370*	Costo económico medio. Facilidad de uso e instalación del equipo. Tiempo de respuesta rápido. Técnica no destructiva. Capacidad de automatización. Facilidad de uso e instalación del equipo.	Instalación cuidadosa es fundamental. Se afecta por contacto entre el sensor y el suelo. Son más sensibles a la temperatura del suelo. Se afecta por contenido de arcilla y espacios con aire. Requiere de una calibración específica del suelo.	Muñoz (2004). Seyfried <i>et al.</i> (2005). Minet <i>et al.</i> (2010). Hardie (2020).
Sensores de capacitancia	Constante dieléctrica ( $K_v$ )	$\theta$ 0-57%	Instantáneo	$\pm 1 - 3$ %	90\$ – \$200	Bajo costo económico. Facilidad de uso e instalación del equipo. Técnica no destructiva e <i>in situ</i> . Capacidad de automatización. Mediciones continuas. Facilidad de uso e instalación del equipo. Amplia variedad en el diseño del sensor.	Requiere de una calibración específica del suelo. Pueden sobrestimar el $\theta$ en suelos con una distribución no uniforme de la humedad. Sensibles a la salinidad del suelo (valores de conductividad eléctrica (EC) > 8 dS m <sup>-1</sup> ).	Paltineanu y Starr (1997). Starr y Paltineanu (2002). van den Elsen <i>et al.</i> (2014).

\*Incluye los sensores, datalogger y el software o interfaz.

## 1.1. Métodos directos

Estos métodos se basan en la cuantificación inmediata del agua presente en el suelo, mediante la remoción del agua de la matriz del suelo. Esta remoción o separación del agua normalmente se hace mediante técnicas gravimétricas, que estiman la masa de agua del suelo por diferencia de masa entre el suelo húmedo y el suelo seco posterior a la evaporación del agua (Forsythe 1985, Topp y Ferré 2002).

### 1.1.1. Gravimetría mediante secado en horno convectivo

El método gravimétrico es bastante simple (Figura 2A). Inicialmente se pesa una muestra de suelo húmedo, luego se calienta a una temperatura de referencia para eliminar el agua hasta que la muestra alcance masa constante y se pesa nuevamente para calcular el cambio de masa. De esta forma, se obtiene la relación entre la masa de agua atribuida a la medida inicial y la masa de suelo total resultante después del secado (Topp y Ferré 2002). Para la determinación del contenido de humedad del suelo, se toman muestras con una masa entre 50 y 100 g de suelo húmedo que se pueden pesar en campo mediante balanzas portátiles, o bien se pueden trasladar al laboratorio mediante bolsas o cilindros con sello hermético para evitar pérdida de agua por evaporación.

Las muestras húmedas se colocan en los recipientes metálicos y se pesan en una balanza granataria para posteriormente colocarlas en el horno convectivo, hasta que las muestras alcancen el peso constante, es decir, que la diferencia entre dos mediciones consecutivas del peso de la muestra no exceda la precisión de la escala (0,05 g). La temperatura de secado puede establecerse según los fines del estudio: 1) Una temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24-48 h, el cual es tiempo suficiente para que las muestras logren un peso constante; 2) Una temperatura de  $45^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  durante al menos una semana o hasta que alcancen peso constante, lo que evita problemas de precisión en la medición de muestras con materia orgánica que superan el 5%. Transcurrido el

tiempo, se colocan en un desecador con silicagel hasta se hayan enfriado a temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ) para volver a pesarlas.

Una vez que las muestras estén secas y a peso constante, se repite el procedimiento de pesado para obtener el valor de peso seco del suelo. Con los pesos obtenidos se calcula el contenido gravimétrico de agua  $w$  en el suelo ( $\text{g g}^{-1}$ ) de la siguiente manera:

$$w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m_{sw} - m_{ss} - m_c}{m_{ss} - m_c} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $w$  corresponde al contenido gravimétrico de agua en el suelo ( $\text{g g}^{-1}$ ),  $m_w$  es la masa de agua (g),  $m_s$  es la masa de suelo seco (g),  $m_{sw}$  es la masa de suelo húmedo (g),  $m_{ss}$  es la masa del suelo seco (g), y  $m_c$  es la masa del recipiente de pesado (g).

A partir del parámetro  $w$ , y si se conoce el valor de densidad aparente del suelo, o bien si las muestras de suelo fueron recolectadas con un cilindro muestreador de volumen conocido, es posible determinar el contenido volumétrico de agua en el suelo  $\theta$  mediante la siguiente fórmula:

$$\theta = w \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\rho_b$  la densidad aparente del suelo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), y  $\rho_w$  la densidad del agua ( $\sim 1,00 \text{ g cm}^{-3}$ ). En general, este método directo es ampliamente utilizado por su facilidad en cuanto a procedimiento y equipos necesarios. En adición, se utiliza normalmente como método de referencia para comparar o calibrar otros tipos de mediciones del contenido de agua en el suelo, ya que este procedimiento anteriormente mencionado presenta un límite del error de 0,01% (Gardner 1986, Topp y Ferré 2002).

Sin embargo, este método presenta ciertas debilidades asociadas a la génesis del suelo que se esté evaluando (Tabla 1). Por ejemplo, en suelos cuyo contenido de materia orgánica es mayor al 5% pueden afectar la precisión de la medición

debido a la oxidación y volatilización de componentes orgánicos, si no se secan las muestras a la temperatura adecuada. En suelos con un alto contenido de grava u rocas (porosas) se debe considerar el volumen que ocupan en la muestra que se analiza para el ajuste del contenido volumétrico de agua en el suelo (Topp y Ferré 2002).

Otro aspecto por considerar es que este método es considerado como destructivo, ya que el suelo se disturba al tomar la muestra, y se limita a un valor específico de humedad en el continuo tiempo. Lo cual impide observar la posible dinámica intrínseca de esta variable comparado con otras metodologías del tipo indirecto (Hillel 1998, Topp y Ferré 2002).

### 1.1.2. Gravimetría mediante secado en horno de microondas

Consiste en el mismo principio que el secado por horno de convección, a excepción que el secado de la muestra se genera a través de la energía de microondas que penetra y vaporiza el agua contenida en la muestra de suelo (Figura 2B). Las moléculas de agua contenidas en la muestra de suelo absorben las microondas, generando una vibración que produce calor y su posterior vaporización (Topp y Ferré 2002). Los pasos por seguir para la determinación del contenido de humedad mediante este método son los mismos descritos en la sección anterior, donde se pesan al menos 30 g de la muestra húmeda a la mayor brevedad para luego ponerse a secar por 20 minutos en un horno de microondas convencional (600 - 1000 W de potencia y frecuencia de trabajo de 2.45 GHz) (Topp y Ferré 2002). La muestra se pone en un desecador hasta que se enfríe a temperatura ambiente para determinar la masa de suelo seco, y el posterior cálculo de  $w$  mediante la ecuación 1.

Una ventaja de este método es que se puede realizar en un periodo muy corto de tiempo en comparación con el secado en horno convectivo, lo cual puede incrementar el número de muestras a procesar por día. En adición, Gee y Dodson (1981) encontraron una muy buena correlación entre los valores del contenido de

agua del suelo obtenidos en ambos métodos de gravimetría para 15 series de suelo. Sin embargo, este método tiene la desventaja que en suelos con alto contenido de materia orgánica, la muestra puede generar combustión y encenderse (Gee y Dodson 1981, Topp y Ferré 2002). Lo cual generaría un error positivo en la determinación, así como potenciales accidentes en el laboratorio. Otra desventaja es que este método no ha sido tan rigurosamente estandarizado como el método de gravimetría por horno convectivo (Topp *et al.* 2008). Se recomienda el uso de muestras de un máximo de 30 g para garantizar uniformidad de secado, y por razones de seguridad, los recipientes que contienen el suelo deben ser de cerámica o nylon.

## 1.2. Métodos indirectos

Por otra parte, los métodos indirectos se basan en la medición directa de una propiedad física o química del suelo que varía en función del contenido de agua. Algunos ejemplos de estas propiedades son la constante dieléctrica, la capacidad térmica, el contenido de hidrógeno, y la susceptibilidad magnética. En estos métodos la precisión y exactitud de la medición va a depender del grado de relación entre la propiedad medida, el contenido de agua del suelo y la precisión con que el instrumento mide la propiedad indirecta (por ejemplo, voltaje). A continuación, se describen los métodos más utilizados en estudios sobre la dinámica en el contenido de humedad del suelo (Tabla 1).

### 1.2.1. Reflectometría del dominio del tiempo (TDR)

Este método se basa en la medición de la constante dieléctrica del suelo (Figura 3). Esta propiedad describe la capacidad de un material para almacenar energía electrostática y varía según las propiedades de este. Se utiliza la escala dieléctrica que asigna un valor de 1 al aire y de 80 al agua (Figura 3), los cuales se utilizan como referencia para comparar la permitividad

eléctrica en distintos materiales, en este caso el suelo (Topp *et al.* 2000).

La reflectometría del dominio del tiempo (TDR por sus siglas en inglés) utiliza elementos electrónicos que emiten una onda electromagnética (voltaje incidente) la cual recorre el medio y regresa al lugar de origen en un tiempo

determinado. El tiempo que tarda dicha onda puede incrementar debido a la presencia del agua en el suelo, la cual difunde la onda en el medio (debido a su alta capacidad dieléctrica) y la retrasa de su curso original, incrementando el tiempo de recorrido (Davis y Chudobiak 1975).

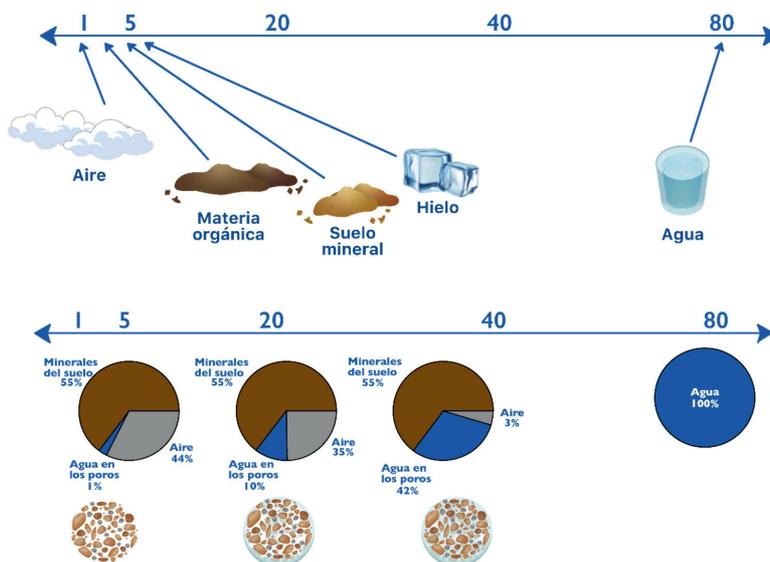


Figura 3. Valores de constante dieléctrica para distintos materiales y sus posibles valores correspondientes del contenido de humedad del suelo. Adaptado de METER Group Inc.; [www.metergroup.com](http://www.metergroup.com)

El sensor TDR consta de dos electrodos paralelos que se insertan en el suelo (Figura 2C). La onda transmitida viaja a través de ellos y regresa en un tiempo determinado, en el cual un osciloscopio registra la magnitud de la onda respecto al tiempo (Figura 4A). La amplitud de la onda electromagnética y el tiempo de viaje varían en función de las propiedades del suelo. Para ello, se estima la constante dieléctrica  $K_a$  con la información que se obtiene del sensor TDR mediante la siguiente fórmula:

$$K_a = (ct/2L)^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde  $t$  es el tiempo de recorrido de la señal (s),  $c$  es la velocidad de una onda electromagnética viajando en un medio libre ( $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ) y  $L$  es la longitud de los electrodos del sensor. Una vez obtenida esta constante dieléctrica, esta se puede relacionar con el contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ) mediante una ecuación empírica (Topp *et al.* 1980):

$$\theta = -5,5 \times 10^{-2} + 2,9 \times 10^{-2} K_a - 5,5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad \text{Ecuación 4}$$

Esta ecuación genera una curva general de calibración de  $\theta$  y el valor de  $K_a$  (Figura 4B).

Dentro de las ventajas de este método, destacan su carácter no destructivo, lo que permite realizar mediciones *in situ* en tiempo real con alta precisión. También requiere de bajo mantenimiento y pueden automatizarse debido a su carácter de sensores basado en microprocesador y bajo el protocolo interfaz estándar digital 12 (en inglés SDI-12) en registradores de datos externos (en inglés dataloggers), lo que potencia su uso. Por otro lado, esta técnica es independiente de la textura del suelo, la densidad aparente y la temperatura. Todo esto permite ubicar

los sensores a diferentes profundidades y obtener información de la distribución del contenido de humedad en todo el perfil del suelo (Heimovaara y Bouten 1990, Noborio 2001).

Sin embargo, presenta algunas desventajas como un alto costo económico comparado a otros sensores. También en suelos con valores altos de conductividad eléctrica o en suelos salinos puede afectar significativamente las mediciones (Sun *et al.* 2000). De igual forma, se recomienda realizar una calibración de los sensores para cada sitio debido a la heterogeneidad inherente del suelo (Mittelbach *et al.* 2012, Topp y Ferré 2002).

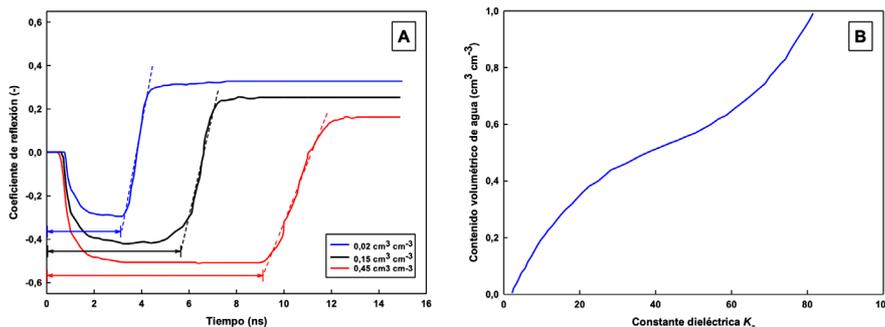


Figura 4. Fundamentos de la reflectometría del dominio del tiempo (TDR) como método para la determinación del contenido del agua en el suelo. A) Ejemplos de ondas electromagnéticas obtenidas con el TDR para tres suelos con diferentes contenidos de humedad, donde se observa el retraso en la formación de la onda debido a un incremento considerable de la humedad en el suelo (Adaptado de Noborio 2000). B) Curva general de calibración para determinar el contenido volumétrico de agua en el suelo a partir de la constante dieléctrica aparente del suelo (Adaptado de Topp *et al.* 1980).

### 1.2.2. Reflectometría de frecuencia del dominio (FDR)

Esta técnica se basa en el mismo principio del TDR, el cual relaciona la constante dieléctrica del suelo y el contenido volumétrico de agua en el suelo. En este caso, la constante dieléctrica

está en función de la frecuencia máxima de resonancia que alcanza una onda electromagnética, considerando el tiempo que tarda en emitirse y reflejarse a través de una línea de transmisión conectada al sensor instalado en el suelo (Susha *et al.* 2014).

El sensor FDR conforma una matriz con los electrodos metálicos y el suelo, el cual actúa como un elemento dieléctrico. Un generador emite una onda electromagnética a través de un cable coaxial que se dirige a los electrodos del sensor FDR instalado (Figura 2D). La frecuencia máxima de resonancia va a depender del tiempo que tarda la onda en viajar desde el inicio hasta el final del electrodo del sensor y su retorno, lo cual está relacionado con el contenido de agua en el suelo (Minet *et al.* 2010, Veldkamp y O'Brien 2000).

Dentro de las ventajas del FDR destaca la recopilación de datos en un amplio rango de frecuencia aumentando el contenido de información en comparación al análisis del dominio del tiempo (Seyfried *et al.* 2005). Otra ventaja es que el costo inicial de estos instrumentos es relativamente más bajo que el de TDR (Susha *et al.* 2014). Sin embargo, para configurar un sistema FDR se pueden requerir numerosas calibraciones, una gran cantidad de parámetros a determinar y varias suposiciones sobre la resistencia de circulación de corriente sobre la línea de transmisión y la sonda FDR (Heimovaara *et al.* 2004, Shuai *et al.* 2009). Estas calibraciones generalmente se estiman en condiciones controladas de laboratorio, por lo que pueden verse afectadas en el campo por las propiedades intrínsecas de cada tipo de suelo, así como por variaciones de temperatura y salinidad (Sevostianova *et al.* 2015). En adición, la sonda FDR presenta una alta sensibilidad en la medición del contenido volumétrico de agua en suelos relativamente secos, por lo que se requiere una frecuente calibración durante su implementación (Rao y Singh 2011).

### 1.2.3. Sensores basados en capacitancia

En este método se usa la capacidad dieléctrica del suelo para estimar el contenido de agua. Estos sensores (Figura 2 E y F) se basan en la propiedad del agua que le permite almacenar una carga eléctrica. Por lo anterior, los sensores se conforman de un oscilador, dos electrodos o cilindros metálicos que forman un capacitor utilizando el suelo como dieléctrico para formar un

circuito que detecta los cambios en el contenido de humedad según las frecuencias de oscilación en que opera el sensor. De forma que, cuando el suelo se humedece, la capacidad dieléctrica aumenta debido a la presencia de agua, lo que provoca un cambio en la capacitancia de los sensores (Chernyak 1964, Campbell 1990, Gardner *et al.* 1998, Starr y Paltineanu 2002).

Estos sensores pueden automatizarse, proporcionando mediciones continuas y en tiempo real de la humedad del suelo, lo que permite un mejor manejo del riego y la optimización de los recursos hídricos (Bogena *et al.* 2007). Estos mismos se han utilizado ampliamente en la agricultura y la investigación del suelo debido a su precisión, bajo costo y facilidad de uso. Por ejemplo, el uso de sensores genéricos acoplados a un microprocesador Arduino® resulta muy económico en comparación con otros métodos. Sin embargo, debido a su bajo costo y carácter comercial, no son muy robustos ni resistentes a condiciones de campo, por lo que tienden a fallar o dañarse con facilidad (Figura 2F). Pese a ello, se encuentran en el mercado dispositivos basados en capacitancia del suelo, mucho más robustos y confiables como los Teros 10 (Figura 2E) los cuales permiten su acople a dataloggers, con grandes redes de detección sin perder precisión.

En adición, como cualquier otro sensor se deben calibrar para obtener mediciones precisas, ya que la capacidad dieléctrica del suelo puede verse afectada por factores como texturas gruesas, arcillas expansivas del tipo 2:1, alto contenido de materia orgánica o suelos salinos (Paltineanu y Starr 1997).

## 2. Potencial hídrico del agua en el suelo

En la sección anterior, nos referimos al contenido del agua en el suelo y la diversidad de métodos para su cuantificación y evaluación. Si bien es cierto este dato es de suma importancia, por sí mismo resulta insuficiente para un adecuado manejo del recurso agua y suelo en los agroecosistemas, ya que no nos permite una comparación directa entre suelos distintos, o bien

entre paisajes o ecosistemas diferentes (Radcliffe y Šimůnek 2018).

Sin embargo, si al contenido de agua en el suelo le adicionamos su correspondiente estado de energía, incrementamos el detalle de la información y nos permite evaluar dicho contenido de agua desde una perspectiva más completa y global, incluyendo la posibilidad de comparar estas cantidades de agua en el suelo con valores de contenido de agua en mantos acuíferos, en plantas y árboles, así como en la misma atmósfera (Radcliffe y Šimůnek 2018).

Para poder entender la importancia del nivel de energía del agua, nos referiremos al concepto de energía como la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo, y bajo dos formas principales: 1) *energía cinética* que es producto del movimiento de un cuerpo, y 2) *energía potencial* que es producto de la posición de un cuerpo en un campo de fuerzas. Debido a que el movimiento del agua en el suelo se considera muy lento (normalmente  $0,1 \text{ m h}^{-1}$ ), el componente de energía cinética se considera despreciable (Hillel 1998, Or *et al.* 2023). Por lo tanto, el componente de energía potencial adquiere mayor importancia y se vuelve fundamental para la determinación del estado energético y movimiento del agua en el suelo.

El potencial hídrico total en el suelo ( $\psi_t$ ) se define como la diferencia de energía potencial del agua en el suelo con respecto a la energía potencial del agua en su estado estándar, es decir, cuando su potencial arbitrariamente asignado es cero (Buckingham 1907). Para estimar  $\psi_t$  se deben considerar distintos componentes activos, los cuales varían en función del contenido de agua en el suelo (Jury y Horton 2004, Radcliffe y Šimůnek 2018, Luo *et al.* 2022).

Por ejemplo, si el suelo está en condiciones de saturación, este potencial se estima según la siguiente ecuación:

$$\psi_t = \psi_z + \psi_p + \psi_s \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $\psi_z$  es el potencial gravitacional,  $\psi_p$  es el potencial de presión hidrostática, y  $\psi_s$  es el potencial de los solutos del suelo (Radcliffe y Šimůnek 2018). Este último término resulta de importancia en suelos salinos, o suelos bajo aplicaciones frecuentes de sales (Luo *et al.* 2022).

Por otro lado, si el suelo se encuentra en estado no saturado,  $\psi_t$  se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\psi_t = \psi_z + \psi_m + \psi_s + \psi_a \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde  $\psi_m$  es el potencial matricial y  $\psi_a$  es el potencial del aire.

El potencial del agua en el suelo se representa como una medida de energía por unidad de agua. Por tanto, puede expresarse como energía por unidad de peso ( $\text{J kg}^{-1}$ ) o como energía por unidad de volumen de agua ( $\text{J m}^{-3}$ ).

De esta forma, la energía por unidad de peso suele expresarse como una carga hidráulica (H) ejercida por una columna de agua a una determinada altura y la energía por unidad de volumen se define en términos de presión ( $\psi$ ). Comparando ambas unidades se establece que una columna de agua de 10 metros de altura es equivalente a  $0,1 \text{ MPa}$  (1 bar de presión). Al considerar el potencial hídrico como la energía por unidad de peso (carga hidráulica) que se requiere para transferir el agua en el suelo a su estado estándar se expresa en números negativos, lo que en ocasiones resulta confuso, por lo cual se utilizan los términos de succión o tensión para representar el potencial hídrico en números positivos (Bittelli 2010).

## 2.1. Curva de retención de humedad del suelo

Al relacionar el potencial del agua en el suelo ( $\psi$ ) con su respectivo contenido volumétrico ( $\theta$ ) se determina la curva de retención de humedad que permite conocer la cantidad de agua que un suelo puede almacenar a un valor específico de potencial (Or *et al.* 2002). Esto es de especial interés para estimar el contenido de agua en el suelo que condiciona el desarrollo óptimo de las plantas, según su facilidad de aprovechamiento conocido como agua útil (Forsythe 1985, Letey 1985, da Silva *et al.* 1994, da Silva y Kay 1997).

Comúnmente, el agua útil para las plantas se estima como la diferencia entre el contenido de agua retenido entre dos valores específicos de potencial hídrico en el suelo, cuya denominación ha trascendido al uso de dos términos habituales (da Silva *et al.* 1994): 1) Contenido de agua a capacidad de campo (CC) (tensión = 0,03 MPa) y 2) Contenido de agua a punto de marchitez permanente (PMP) (tensión = 1,5 MPa).

Un aspecto importante para considerar es que estos valores de potencial correspondientes a estos dos puntos (CC y PMP) tienen un carácter arbitrario que facilita el cálculo del agua útil. Por ejemplo, Romano y Santini (2002) mencionan

que el valor de potencial hídrico a CC varía según la textura del suelo, donde un valor tensión de 0,01 MPa correlaciona muy bien con suelos arenosos, 0,035 MPa con suelos franco-limosos, y 0,05 MPa con suelos arcillosos. Los mismos autores también se refieren al valor de tensión de 1,5 MPa como un valor promedio de potencial para describir el momento en el cual la planta se marchita de forma irreversible (PMP). Dicho valor fue determinado por Richards y Weaver (1943) para la marchitez de plantas de girasol enanas, consideradas como un buen cultivo indicador general, bajo el supuesto que cualquier planta se marchita al llegar a este valor (Briggs y Shantz 1912).

La evaluación y medición del potencial del agua en el suelo se basa en el principio del equilibrio hidráulico teóricamente alcanzado por la fase líquida o fase de vapor del agua retenida en el suelo y el dispositivo de medición o en el ambiente con un valor nominal de potencial. Cabe destacar que no existe una única técnica capaz de medir el potencial hídrico en todo el rango (entre el suelo saturado y el suelo seco), por lo que es necesario el uso de varias técnicas independientes que se ejecutan tanto bajo condiciones de campo (Tabla 2) como en el laboratorio (Tabla 3).

Tabla 2. Principales métodos de campo utilizados para determinar o evaluar el potencial del agua en el suelo y sus consideraciones generales.

Consideraciones generales	Piezómetros	Tensiómetros	Sensores dieléctricos
Componente estimado	Potencial de presión hidrostática ( $\psi_p$ )	Potencial matricial ( $\psi_m$ )	Potencial matricial ( $\psi_m$ )
Rango de lectura	Elevación de la tabla de agua (nivel freático)	0 - 0,1 MPa.	0 - 100 MPa.
Exactitud	±0,000005 MPa. (0,05 cm H <sub>2</sub> O)	± 0,001 MPa.	± (10% de la lectura + 0,002 MPa) entre lecturas de 0,005 a 0,1 MPa.
Costo aproximado	Variable	\$80 – \$270	\$500 - \$900
Ventajas	Aplicaciones agrícolas como el diseño del drenaje agrícola. Capacidad de automatización. Facilidad de monitoreo del nivel freático. Permite la estimación de otras variables como $K_s$ .	Medición discreta y directa en campo. Medición continua mediante transductores de presión y dataloggers. Facilidad de uso e instalación. Bajo costo. Insensible a la salinidad de suelo.	Alta precisión. Rango de medición amplio. Posibilidad de registro continuo de datos. Requiere mantenimiento mínimo en los sensores.
Desventajas	Alto costo de instalación. Mantenimiento periódico requerido. No es recomendado en suelos rocosos. Susceptible a cambios de temperatura y presión atmosférica.	Rango de medición limitado. Tiempo de equilibrio prolongado. Cavitación del implemento y pérdida de tensión.	Instalación cuidadosa es fundamental. Requiere calibración específica para cada suelo en estudio. Requiere de cuidados durante la instalación del sensor. Potenciales errores por un bajo contacto suelo-sensor.
Referencias	Young (2002); Or y Wraith (2002); Amoozegar (2002).	Young y Sisson (2002); Sisson <i>et al.</i> (2002); Muñoz (2004).	Or y Wraith (1999); Scanlon <i>et al.</i> (2002); Bittelli (2010); Yu <i>et al.</i> (2021); METER (2023).

Tabla 3. Principales métodos de laboratorio utilizados para determinar o evaluar el potencial del agua en el suelo y sus consideraciones generales.

Método	Componente estimado	Rango de medición	Tiempo necesario	Exactitud	Costo aproximado	Ventajas	Desventajas	Referencias
Rango de baja tensión (0-0,1 MPa)								
Celdas de presión (Tempe cells)	Potencial matricial ( $\psi_m$ )	0 - 0,1 MPa.	24 - 72 horas*	±0,001 MPa	~\$1.000	Método muy preciso. Determinaciones sucesivas en la misma muestra. Facilidad de análisis de muestras individuales. Volumen elemental representativo adecuado. Facilidad de manipulación.	Rango de medición limitado. Cantidad limitada de muestras para procesar. Costo económico elevado. Requiere de mantenimiento continuo. Requiere de equipo y repuestos especializados.	SoilMoisture (1995). Dane y Hopmans (2002); Tuller <i>et al.</i> (2004).
Columnas de agua coligantes	Potencial matricial ( $\psi_m$ ) Potencial gravitacional ( $\psi_j$ )	0-0,03 MPa.	48-72 horas*	±0,000005 MPa. (0,05 cm H <sub>2</sub> O)	\$150 - \$1.000	Método muy sencillo y preciso. Diseño fácil de replicar. Equipo básico de laboratorio. Bajo costo económico. No requiere de compresores ni reguladores de presión.	Rango de medición limitado. Cavitación del implemento y pérdida de tensión. Medición limitada a la altura del implemento. Cantidad limitada de muestras para procesar. Requiere de mantenimiento continuo.	Klute (1986). Vanapalli <i>et al.</i> (2008). Dixon <i>et al.</i> (2023).
Mesas de tensión Cajas de arena	Potencial matricial ( $\psi_m$ ) Potencial gravitacional ( $\psi_j$ )	0 - 0,05 MPa.	48 - 72 horas*	±0,000005 MPa. (0,05 cm H <sub>2</sub> O)	\$500 - \$1.200 \$7.000	Método muy sencillo y preciso. Diseño fácil de replicar. Bajo costo económico. Capacidad para gran cantidad de muestras (40). Facilidad de manipulación. Disponible también de forma comercial.	Rango de medición limitado. Cavitación del implemento y pérdida de tensión. Medición limitada a la altura del implemento. Requiere de mantenimiento continuo. Potenciales errores por un bajo contacto suelo-arena. Costo económico elevado para forma comercial.	Stakman <i>et al.</i> (1969). Ball y Hunter (1988). Lima y da Silva (2008). Eijkelkamp (2016). Eijkelkamp (2022).
Método de evaporación	Potencial matricial ( $\psi_m$ )	0-0,1 MPa	24 - 72 horas	±0,001 MPa	\$500 - \$3500	Método sencillo y preciso. Diseño fácil de replicar. Equipo básico de laboratorio. Bajo costo económico. No requiere de compresores ni reguladores de presión.	Rango de medición limitado. Cantidad limitada de muestras para procesar. Requiere definición adecuada de intervalos de tiempo para las mediciones. No se recomienda extrapolar por encima del rango de medición de los tensiómetros	Halbertsma y Veerman (1994). Peters y Durner (2008). Šimůnek <i>et al.</i> (1998). Hopmans <i>et al.</i> (2002)

Método	Componente estimado	Rango de medición	Tiempo necesario	Exactitud	Costo aproximado	Ventajas	Desventajas	Referencias
Rango de alta tensión (0,1 - 1,5 MPa)								
Ollas de presión	Potencial matricial ( $\psi_m$ )	0,001 - 1,5 MPa.	72 horas - 75 días**	$\pm 0,007$ MPa entre 0,01-0,05 MPa.	~\$32.000	Método considerado como el estándar. Método rutinario de laboratorio. Rango amplio de mediciones. Capacidad para gran cantidad de muestras (80). Disponible de forma comercial. Mediciones rápidas (<5 min).	Potenciales errores por un bajo contacto suelo-plato. Potenciales errores por dispersión de la muestra. Requiere de equipo y repuestos especializados. Tiempo de equilibrio prolongado. Costo económico elevado.	Solone <i>et al.</i> (2012). van Lier <i>et al.</i> (2019). Parker y Patignani (2022).
Potenciometría de punto de rocío	Actividad del agua ( $A_w$ ) Potencial del agua ( $\psi_f$ )	0 - 300 MPa.	5 -25 minutos	$\pm 0,005$ MPa entre 0 y 5,0 MPa. $\pm 1\%$ entre 5,0 y 300 MPa.	~\$10.000	Método sencillo y preciso. Rango amplio de mediciones. Posibilidad de registro de datos continuos. Calibración rápida y robusta. Facilidad de uso e instalación.	Baja precisión en bajos valores de potencial hidrico. Sensible a la salinidad de suelo. Requiere de mantenimiento continuo. Requiere de equipo y repuestos especializados. Costo económico elevado.	Bittelli y Flury (2009). Scanlon <i>et al.</i> (2002). Gubiani <i>et al.</i> (2013). METER (2021).

\*Este tiempo de equilibrio varía según la clase textural del suelo, porosidad total y manipulación de la muestra.  
 \*\*Este tiempo de equilibrio varía según la clase textural del suelo, y factores asociados al contacto entre el suelo y los platos porosos (Bittelli y Flury 2009).

## 2.2. Métodos para la evaluación y determinación del potencial hídrico bajo condiciones de campo

### 2.2.1. Piezómetros

Los piezómetros consisten en la perforación de pozos de un diámetro relativamente pequeño en el suelo (lo suficiente para que no genere capilaridad), donde se inserta una tubería con un extremo abierto sobre la superficie y otro extremo con perforaciones ubicado por debajo del nivel freático (Kirkham 1946). En este método, el componente estimado es el potencial  $\psi_p$  o la presión ejercida por la altura de una columna de agua que se extiende desde el nivel freático hasta un punto de referencia en el suelo, normalmente su superficie (Amoozegar 2002).

El nivel freático o tabla de agua representa la zona saturada del suelo donde el agua subterránea fluctúa según los gradientes de carga hidráulica. En este punto, el potencial  $\psi_p$  es lo suficientemente alto para permitir el ingreso del agua en la tubería del piezómetro según los cambios en el nivel freático (Reeve 1986). De esta forma, el sistema hidráulico se equilibra cuando la presión hidrostática iguala la presión atmosférica, que equivale al flujo de agua que ingresa a la tubería y se eleva a la misma altura del nivel freático (Young 2002). La elevación del nivel freático dentro del piezómetro se puede determinar utilizando técnicas de medición manuales o automatizadas mediante transductores de presión diferenciales acoplados a dataloggers (Figura 5A) (Or *et al.* 2023). El uso de piezómetros se ha utilizado ampliamente para la determinación del nivel del agua, el gradiente hidráulico y la calidad del agua en una variedad de entornos hidrogeológicos (Young 2002, Salama *et al.* 1993).

En las aplicaciones agrícolas se utiliza para el diseño de sistemas de drenaje, análisis del movimiento de solutos, monitoreo de la contaminación de aguas subterráneas, medición de potenciales de oxidación-reducción y la definición de regímenes de humedad del suelo (Ghassemi *et al.* 1988, MacFarlane *et al.* 1983,

Vepraskas *et al.* 2006). Dentro de sus desventajas (Tabla 2) destacan el potencial costo de su instalación, no es un método práctico para suelos rocosos por la dificultad de perforación y es susceptible a cambios en la temperatura y presión atmosférica (Rasmussen y Crawford 1997).

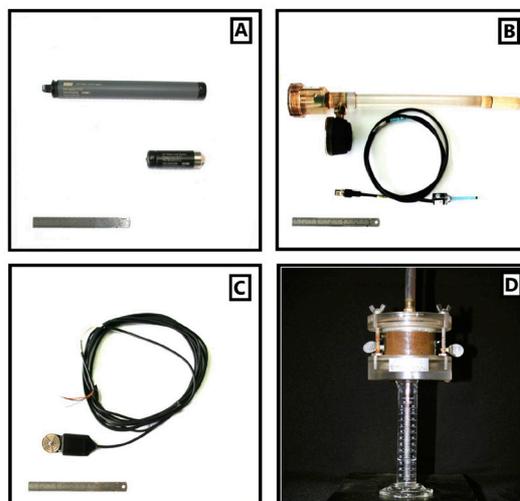


Figura 5. Dispositivos y sensores para la determinación del potencial del agua en el suelo. A) Sensor piezométrico de nivel freático (Onset® HOBO®). B) Tensiómetro y mini tensiómetro. C) Sensor de potencial hídrico Teros 21 (METER Group Inc.). D) Celda de presión o Tempe Cell (Soilmoisture Inc) para establecer bajas tensiones. Regla metálica como escala (17 cm).

### 2.2.2. Tensiómetros

Este método se basa en el uso de dispositivos llamados tensiómetros (Figura 5B). Estos se conforman de tres elementos básicos conectados entre sí: 1) una copa porosa de cerámica, 2) un capilar saturado con agua (reservorio), y 3) un manómetro de tensión o transductor de presión (Young y Sisson 2002). Su principio de funcionamiento se basa en el movimiento del agua entre el reservorio del tensiómetro y el agua presente en el suelo como respuesta al gradiente

del potencial matricial del suelo ( $\psi_m$ ), también conocido como succión matricial (Papendick y Campbell 1981).

Este componente cuantifica el efecto de la capilaridad y adsorción sobre la energía del agua en el suelo y el agua estándar en condiciones no saturadas. De esta forma, el equilibrio hidráulico se alcanza cuando el potencial del agua en el suelo y dentro del tensiómetro se igualan (Richards 1965). Este método presenta ventajas (Tabla 2) como la medición directa del potencial, no es afectado por la salinidad, facilidad de uso e instalación, bajo costo, y posibilidad de automatización al reemplazar los manómetros por transductores de presión y acoplarlos con dataloggers para obtener lecturas continuas (Sisson *et al.* 2002).

Dentro de las desventajas de este método (Tabla 2), destaca su limitación a potenciales entre 0 y 0,1 MPa (0 y 1 bar), ya que valores por encima de este hacen que el tensiómetro cavite y pierda la tensión. De igual forma, las dimensiones y características del tensiómetro pueden limitar el rango de medición utilizable conocido como presión de burbujeo (Cassel y Klute 1986, Tamari *et al.* 1993).

Dependiendo de la posición del tensiómetro durante su instalación, o bien la posición del manómetro o traductor de presión, la lectura del tensiómetro se debe ajustar por la diferencia de altura entre este y la copa cerámica mediante la siguiente ecuación:

$$\psi_m = \psi_{\text{manómetro}} + \rho_w g L \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde  $\psi_{\text{manómetro}}$  es el potencial de lectura en el manómetro del tensiómetro (kPa o cbar),  $\rho_w$  es la densidad del agua ( $\sim 1,00 \text{ g cm}^{-3}$ ), es la constante de gravedad ( $98,0 \text{ cm s}^{-1}$ ) y L es la distancia entre el manómetro y la copa cerámica (cm).

### 2.2.3. Sensores dieléctricos de potencial

Este método se basa en el uso de sensores más complejos (Figura 5C), cuya composición consiste en un sensor de capacitancia

(mencionados con anterioridad), ubicado en medio de dos placas de cerámica porosa con propiedades hídricas conocidas y sujetadas por dos placas metálicas (Or *et al.* 2023). El sensor dieléctrico, se equilibra con el contenido de humedad del suelo y dicho contenido se determina mediante el sensor de capacitancia. Las mediciones del potencial del agua se obtienen a partir de curvas de calibración basadas en la relación del contenido de agua y el potencial hídrico de las placas de cerámica porosa (Bittelli 2010, Or *et al.* 2023).

La primera aplicación de esta técnica fue propuesta por Or y Wraith (1999) quienes encontraron resultados consistentes en la determinación del potencial matricial en cuatro suelos. Actualmente existen versiones comerciales como el Teros 21 desarrollado por METER Group® (METER Group, Inc., Pullman, WA, USA). Este sensor permite determinar el potencial matricial y temperatura en condiciones de campo con alta precisión. Es muy sencillo de usar, costo accesible, tiene un amplio rango de medición de potencial que va desde saturación hasta suelo secado al aire y puede integrarse a un datalogger, ofreciendo mediciones continuas (METER 2023). Una limitante para el uso de este sensor resulta en suelos que presentan una salinidad elevada (valores de conductividad eléctrica (EC)  $> 8 \text{ dS m}^{-1}$ ). En general, los sensores dieléctricos son métodos indirectos de medición por lo que se recomienda su calibración en cada sitio de medición. En este método, un cuidado importante a tener es asegurar buen contacto entre la cerámica y el suelo circundante para evitar problemas de mediciones.

### 2.3. Métodos de evaluación y determinación del potencial hídrico bajo condiciones de laboratorio

Anteriormente se describieron los métodos para la determinación y evaluación *in situ* del potencial hídrico en el suelo o en la capa freática. Sin embargo, debido a costos y logística asociados a estos anteriores (Tabla 2), se vuelve necesario el muestreo y el uso de métodos de

análisis en laboratorio. Los análisis destinados a evaluar o determinar el potencial hídrico en el suelo pueden ser clasificados en función de los valores nominales de potencial que se deseen evaluar. En la presente revisión, dichos rangos se han definido en función de los métodos a describir donde los valores menores a 0,1 MPa constituyen el rango de baja tensión en la curva de retención de humedad (Tabla 3) y los valores comprendidos entre 0,1 y 1,5 MPa o superiores se designan como rango de alta tensión (Hillel 1998, Or *et al.* 2002).

#### 2.4. Métodos empleados en el rango de baja tensión (0 - 0,1 MPa)

Estos métodos se basan en el equilibrio hidráulico del agua en el suelo a un valor nominal de potencial del agua en el suelo. Dicho equilibrio se logra mediante la aplicación de presión en ambientes confinados semi cerrados, o bien el uso de la tensión (presión negativa). Debido a que los valores de potencial evaluados son altos, se requiere de una muestra de suelo no alterada. A continuación, se describen los métodos más comúnmente utilizados.

##### 2.4.1. Celdas de presión (Tempe cells)

En este método (Figura 5D), se somete una muestra no alterada de suelo (previamente saturada) a una presión de valor conocido (potencial) en un medio semi hermético (una celda), con el objetivo de alcanzar el equilibrio hidráulico a ese valor entre el agua y el suelo. El agua que no está en equilibrio se drena fuera de la celda. El diseño de estas celdas de presión (conocidas como Tempe cells) comprende tres elementos: el conjunto de tapa superior e inferior, el cilindro muestreador y una placa de cerámica porosa, la cual permite el paso del agua, pero no del aire (SoilMoisture 1995).

La tapa superior de la celda de presión se conecta a una fuente de presión de aire y por medio de reguladores se controla con precisión la carga de presión aplicada, mientras que la tapa inferior sostiene la placa porosa y drena el agua.

Antes de realizar la medición, la muestra de suelo contenida en el cilindro y la placa de cerámica porosa se saturan por 24 h y luego se sellan con el conjunto de tapas (Tuller *et al.* 2004). Una vez ensamblado el cilindro con el conjunto de tapas y la placa cerámica en la celda (Figura 5D), se aplica la presión que representa el valor de  $\psi_m$ .

La muestra se mantiene presurizada hasta que deje de drenar la válvula de salida de la tapa inferior, indicando el punto donde se alcanza el equilibrio hidráulico. Posteriormente, se determina por gravimetría el contenido de humedad asociado a ese valor nominal de  $\psi_m$ . Esta técnica ofrece determinaciones muy precisas en el rango de baja tensión del potencial hídrico cercanas a saturación y el hecho de realizarse con muestras no alteradas representa muy bien las condiciones de campo que regulan el estado de energía del agua en el suelo (Hillel 1998, Or *et al.* 2002). Sin embargo, su capacidad limitada de una muestra puede ser un factor desfavorable para mediciones de rutina (Dane y Hopmans 2002).

##### 2.4.2. Método de evaporación

El método de evaporación (Figura 6) fue propuesto por Gardner y Miklich (1962), y consiste en someter una muestra de suelo a experimentos de evaporación del agua, donde se registra la pérdida de peso y el cambio en el potencial matricial en intervalos de tiempo consecutivos. Con estos valores y técnicas de modelado inverso como la propuesta por Wind (1968), es posible estimar la retención de humedad y la conductividad hidráulica no saturada del suelo. Para esto se requiere una muestra de suelo no alterada recolectada en un cilindro. Dicha muestra se satura, y posteriormente se coloca sobre una balanza granataria (Figura 6A) y a la cual se le introducen mini tensiómetros (Figura 6B) a diferentes alturas para determinar y registrar las diferencias de potencial matricial. Al mismo tiempo, se registra el cambio de peso producto de la pérdida de agua en el suelo por evaporación, que ocurre desde el límite superior del cilindro (Halbertsma y Veerman 1994, Peters y Durner 2008).

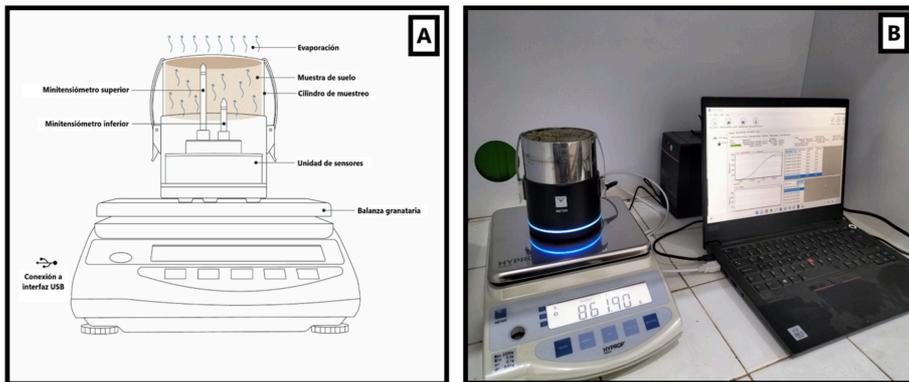


Figura 6. Método de evaporación para la determinación del potencial del agua en el suelo bajo condiciones de laboratorio. A) Diagrama de ensamble de la balanza, sensores y la muestra no alterada, para la determinación del potencial del agua en una muestra no alterada mediante el dispositivo HYPROP 2 (Fotografía cortesía de METER Group Inc.; [www.metergroup.com](http://www.metergroup.com)). B) Instalación del dispositivo HYPROP 2 en una muestra no alterada y registro de los datos mediante una computadora portátil. Foto cortesía de Gabriel Garbanzo-León.

Cada mini tensiómetro es acoplado a un transductor de presión y junto a la balanza granataria se registran los datos en una computadora o se puede automatizar al integrarlo a un datalogger para el posterior análisis de datos. Para inducir la evaporación se puede utilizar las condiciones naturales de laboratorio o por medio de un ventilador para acelerar la salida del agua en la superficie de la muestra de suelo. El experimento concluye una vez que se alcanzan valores muy bajos de potencial matricial ( $> 0,01 \text{ MPa} \sim 1000 \text{ cm H}_2\text{O}$ ) asociados al límite de resolución de los mini tensiómetros (Hopmans *et al.* 2002). Luego se lleva la muestra a un horno de secado para determinar su humedad gravimétrica y con la densidad aparente obtener el valor de humedad volumétrica asociado a cada cambio de peso en la muestra de suelo.

Este método destaca por su simplicidad y precisión (Tabla 3). En adición, se puede implementar con equipos estándar de física del suelo, como una balanza, tensiómetros, horno de secado, un reloj y una computadora son suficientes para realizar el análisis. Otra ventaja es el tiempo de determinación que puede tardar entre unos pocos días para suelos de texturas gruesas

y algunas semanas para suelos de texturas finas (Halbertsma y Veerman 1994). Entre las limitaciones, la cantidad de muestras a procesar se reduce a una sola y se asume la homogeneidad de las propiedades hidráulicas para una sola muestra. Por otra parte, la selección de los intervalos de tiempo de mediciones debe ser adecuada para minimizar errores y no se recomienda la extrapolación de datos más allá del rango de medición de los tensiómetros porque se puede incurrir en un alto nivel de incertidumbre (Halbertsma y Veerman 1994, Šimůnek *et al.* 1998).

### 2.4.3. Columnas de agua colgantes

La técnica de columnas de agua colgantes consiste en colocar una muestra de suelo saturada sobre una cámara con una placa porosa de cerámica conectada a través de un tubo flexible a un depósito de agua abierto a la atmósfera (Figura 7A). La columna se crea mediante el contacto hidráulico entre el agua contenida en el suelo y el agua en el depósito ubicado a una menor elevación, lo que genera que el agua fluya desde la muestra hacia el depósito hasta alcanzar el equilibrio hidráulico. Los componentes considerados en esta técnica corresponden al  $\psi_m$  que

retiene el agua en la muestra de suelo y el  $\psi_z$  representado por la diferencia de elevación entre la muestra de suelo y el depósito agua (Radcliffe y Šimůnek 2018).

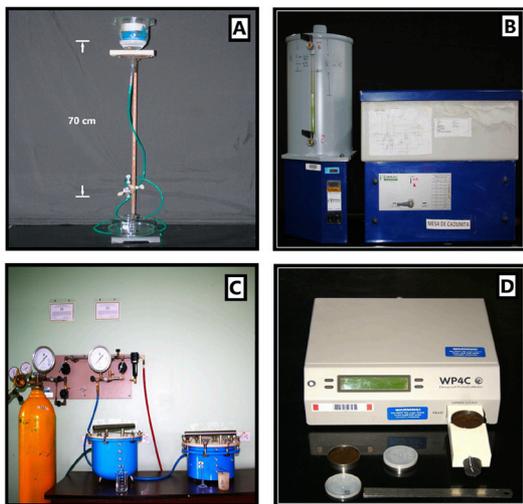


Figura 7. Metodologías y dispositivos para la determinación del potencial del agua en el suelo. A) Columna colgante diseñada en el laboratorio para establecer bajas tensiones. B) Mesa de tensión o caja de arena-caolinita (Royal Eijkelpamp). C) Ollas de presión (Soilmoisture Inc.). D) Potenciómetro WP4C (Decagon Inc., actualmente METER Group Inc.). Regla metálica como escala (17 cm).

Por lo tanto, la tensión generada por el  $\psi_m$  en la muestra de suelo provoca una disminución del contenido de humedad que se compensa con un mayor  $\psi_z$  debido a la diferencia de elevación respecto al depósito. De esta forma, la longitud efectiva de la columna corresponde a la carga de presión o potencial matricial y el contenido de humedad asociado a ese punto se va a determinar por gravimetría, una vez que se alcance el equilibrio entre el potencial del agua en el suelo y la columna (Klute 1986).

Esta técnica es bastante simple y permite obtener valores de potencial hídrico muy cercano al estado saturado, los cuales son críticos para

describir el comportamiento de agua en la matriz del suelo. No requiere el uso de compresores ni reguladores de presión y su diseño es fácil de replicar. Sin embargo, su capacidad de medición se ve limitada a una sola muestra y a la elevación que se puede alcanzar en un laboratorio, en adición a que puede ocurrir evaporación del agua durante la medición por lo que se deben realizar correcciones (Dane y Hopmans 2002).

#### 2.4.4. Mesa de succión o caja de arena

La mesa de tensión (Figura 7B) consiste en un recipiente que contiene varias capas de materiales finos y muy finos (arena, caolín o yeso) que funcionan como barrera porosa donde se colocan muestras de suelo no alteradas y previamente saturadas (Stakman *et al.* 1969). Este método trabaja con el mismo principio de las columnas colgantes donde se establece una diferencia de  $\psi_m$  según la diferencia de elevación entre el agua contenida en la muestra de suelo y un reservorio, la cual se logra mediante una manguera flexible, o a través de una bomba de vacío que genera una tensión equivalente a dicha diferencia de elevación.

El contacto hidráulico entre el agua en las muestras de suelo y el reservorio ocurre a través de las capas de arena o caolín que se saturan previamente y actúan como barrera porosa. Por medio del desnivel entre la caja y el reservorio o bien la tensión generada por la bomba de vacío, se establece un nivel de tensión en función de una altura establecida con respecto al límite inferior de la muestra no alterada (Lima y da Silva 2008).

Para que la tensión ocurra, el recipiente se aísla de la presión atmosférica al cubrirlo con una tapa (Figura 7B) y se abre la salida del reservorio de agua conectado a final de la manguera (Lima y da Silva 2008, Townend *et al.* 2001). El equilibrio hidráulico va a depender de la altura de las muestras y las propiedades del suelo. Para determinar si dicho equilibrio se ha alcanzado, se pesan las muestras de suelo en dos ocasiones sin que cambie la masa en 0,1 g, o bien en función del tiempo según el nivel de tensión aplicado, el

cual puede variar de 2 a 25 días según la textura de la muestra de suelo (Topp y Zebchuk 1979, Ball y Hunter 1988).

Entre las principales ventajas (Tabla 3) destacan el establecimiento del potencial del agua con valores entre saturación 0 MPa (0 cm H<sub>2</sub>O) y 0,02 MPa (200 cm H<sub>2</sub>O), con capacidad para procesar una gran cantidad de muestras, hasta 40 muestras dependiendo de las dimensiones del recipiente. Es de fácil operación y su configuración es sencilla, además de ser independiente de fuentes de energía como electricidad o baterías. El equipo completo se puede conseguir comercialmente con valores de operación de hasta 0,05 MPa (500 cm H<sub>2</sub>O) (Eijkelkamp 2016, Eijkelkamp 2022), o bien diseñarse a un bajo costo según las necesidades de investigación (Lima y da Silva 2008).

Sin embargo, debe revisarse periódicamente para asegurar que no ocurra una entrada de aire al sistema porque la formación de burbujas entre las capas de arena o caolín van a afectar el contacto hidráulico, por lo que se recomienda el uso de agua desgasificada, la cual puede ser hervida o tratada con N<sub>2</sub>. Otra limitación puede ser el extenso tiempo requerido para que las muestras alcancen el equilibrio (Ball y Hunter 1988, Romano *et al.* 2002).

### 2.5. Métodos empleados en el rango de alta tensión (0,1 - 1,5 MPa)

Un factor común en los métodos empleados en el rango de alta tensión del suelo es el uso de muestras alteradas (homogenizadas a fracción tierra fina o < 2 mm). La retención de agua en el suelo a valores de potencial menores de 0,1 MPa (rango de baja tensión) está influenciada principalmente por la estructura del suelo y la distribución natural del tamaño de los poros (Hillel 1998, Or *et al.* 2002), por lo que se recomienda el uso de muestras no alteradas. Por el contrario, se prefieren muestras de suelo alteradas en la determinación del potencial entre 0,1 y 1,5 MPa (rango de alta tensión), ya que la retención de agua a esos valores de potencial está más asociada a la adsorción del agua en la superficie de

las partículas del suelo (Or *et al.* 2002, Luo *et al.* 2022). Los métodos que describiremos a continuación difieren en la determinación de los valores de potencial, ya que uno mide directamente el valor del potencial del agua, y el otro se basa en la aplicación de valores nominales.

#### 2.5.1. Ollas de presión

De forma similar a los métodos en el rango de baja tensión de la curva, este método utiliza aplicaciones de valores nominales de potencial y un posterior equilibrio hidráulico. Dicho método consiste en el uso de platos cerámicos porosos saturados donde se colocan muestras de suelo saturadas que se introducen en ollas de presión (Figura 7C) y se les aplica diferentes valores nominales de carga de presión (Dane y Hopmans 2002).

El potencial  $\psi_m$  es el componente considerado en este método, el cual se equipara al potencial  $\psi_p$  aplicado sobre las muestras de suelo una vez se alcance el equilibrio. Dicha carga de presión ejercida sobre las muestras va a desplazar el agua del suelo fuera de las ollas a través de los platos cerámicos porosos hasta alcanzar el equilibrio hidráulico del agua en el suelo (Or *et al.* 2002). Luego, se retiran las muestras de suelo de las ollas, se determina el contenido de agua mediante gravimetría y con estos datos, se puede conocer la retención de humedad del suelo.

Este método se consideró como el estándar en la determinación de la retención de humedad (Tabla 3), ya que desde su establecimiento en los años 1940's ha sido empleado y validado por laboratorios de distintas latitudes (Richards y Fireman 1943), en un rango de medición que va de 0,001 a 1,5 MPa según los fabricantes (SoilMoisture 2008, SoilMoisture 2015). Tiene la ventaja que se pueden someter hasta 80 muestras de forma simultánea a un mismo valor nominal de potencial.

Sin embargo, se han reportado errores asociados a potenciales hídricos por debajo de 0,5 MPa de tensión asociados con un pobre contacto entre el suelo y la placa porosa del plato (Gee *et al.* 2002). También, presenta problemas

asociados con la dispersión de la muestra de suelo durante la evaluación (Bittelli y Flury 2009, Cresswell *et al.* 2008). En adición, el equipo es bastante costoso en general, al igual que sus repuestos y accesorios.

### 2.5.2. Potenciometría de punto de rocío

Distinto de la metodología anteriormente descrita, este método determina directamente el valor de potencial de una muestra de suelo, mediante un dispositivo electrónico denominado potenciómetro (Figura 7D). Originalmente fue desarrollado por Decagon Devices, Inc. (Decagon 2007) y entre los modelos disponibles, el más reciente es el WP4C Dewpoint potentialMeter® (METER 2021).

Este dispositivo mide la actividad del agua ( $A_w$ ) para calcular el potencial  $\psi_t$  (MPa) en una muestra de suelo (Rawlins y Campbell 1986, Gee *et al.* 1992) según la siguiente ecuación:

$$\psi_t = \frac{RT}{M_w} \ln(A_w) = \frac{RT}{M_w} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde  $R$  es la constante del gas ideal (8,31 J °K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>),  $T$  es la temperatura de la muestra (°K),  $M_w$  es la masa molecular del agua (0,018 kg mol<sup>-1</sup>),  $P$  es la presión de vapor del aire (MPa) en equilibrio con la fase líquida, y  $P_0$  es la presión de vapor saturado del agua (MPa) de la fase líquida al valor de temperatura de la muestra ( $T$ ).

Su medición se basa en equilibrar en una cámara sellada el agua en fase líquida de una muestra de suelo, con el agua en fase de vapor que se encuentra en el aire sobre la muestra (Gee *et al.* 1992). En el punto de equilibrio se registra la temperatura del punto de rocío del aire y la temperatura de la muestra.

La temperatura de punto de rocío se determina con un sensor óptico, que detecta el momento en que el agua en fase de vapor presente en el aire de la cámara sellada se condensa hasta formar rocío sobre un espejo de acero inoxidable enfriado y para medir la temperatura de la muestra se utiliza un termómetro infrarrojo (Gee *et al.* 1992). Con estos valores se calcula

la humedad relativa del aire en equilibrio con la muestra y por medio de la ecuación de Kelvin se deriva el potencial hídrico (Campbell *et al.* 2007) de la siguiente forma:

$$\psi_t = \frac{RT}{M_w} \ln \frac{e_s(T_d)}{e_s(T_s)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde  $e_s(T_d)$  es la presión de vapor del aire (MPa) al valor de la temperatura del punto de rocío (°K), y  $e_s(T_s)$  es la presión de vapor en saturación (MPa) al valor de temperatura de la muestra del suelo (°K).

En general, este dispositivo permite realizar mediciones rápidas (menos de 5 minutos) y muy precisas hasta valores muy negativos de potenciales hídricos (alta tensión), y se pueden registrar los datos de forma manual o automáticamente por medio de una computadora. Tiene como ventaja un proceso de calibración rápido, mediante soluciones salinas con un potencial conocido. Sin embargo, su precisión puede disminuir a valores de potencial hídrico cercanos a cero, y por efecto de la salinidad del suelo (Scanlon *et al.* 2002). Pese a esto, esta metodología ha venido ganando terreno como el método de referencia para el análisis del potencial del agua en el suelo (Bittelli y Flury 2009, Bittelli 2010, Solone *et al.* 2012).

## 3. Selección del método y sus implicaciones en el manejo de los sistemas de producción

### 3.1. Criterios de selección de la metodología

Al evaluar las metodologías anteriormente mencionadas para su posterior selección y uso, se debe considerar: 1) la variable en estudio (contenido o potencial de agua en el suelo), 2) el alcance de la variable (investigación, criterios de riego, drenaje, o conservación del suelo), 3) alcance de la metodología (datos continuos o puntuales), 4) la precisión del método, 5) la logística asociada (calibración, transporte del equipo, mantenimiento, conocimiento técnico), 6) la versatilidad del método (mediciones a múltiples

profundidades en el suelo), 7) el respaldo científico de la metodología y, 8) su costo económico. Estos criterios se sintetizan en las Tablas 1, 2 y 3 para comparar entre los métodos descritos en el presente trabajo.

Un componente importante en los métodos directos de determinación del contenido de agua en el suelo es el equipo disponible en el laboratorio. En estos métodos, las dos mayores fuentes de variabilidad son: 1) la precisión y la incertidumbre de las balanzas, y 2) el tiempo de secado y las condiciones de recirculación de aire dentro del horno (Topp y Ferré 2002). A esto se le debe sumar el uso de desecadores para enfriar apropiadamente la muestra de suelo y evitar daños en la balanza por cambios en la temperatura de la muestra y potencial reabsorción de agua por higroscopia (Hillel 1998). Una vez controlados estos dos aspectos anteriores (mediante rutinas de calibración y monitoreo), el método directo se considera como un método estándar de referencia para otros métodos indirectos (Tabla 1).

Un aspecto fundamental por considerar en los métodos indirectos del contenido de agua en el suelo es la incertidumbre asociada al dispositivo o el sensor empleado, más aún si este se está utilizando como una herramienta de decisión para el manejo del riego en condiciones de campo (Sharma *et al.* 2021a). A esto se le suma el efecto del tipo del suelo sobre la calibración de fábrica del sensor y sus resultados, lo que implica la necesidad de una calibración específica en el sitio y posterior validación contra valores obtenidos con otros métodos directos (Sharma *et al.* 2021b). Esta calibración incrementa el desempeño de los sensores de un 31% hasta un 89%. En la literatura (Bittelli 2011, Kukul *et al.* 2019) se encuentran guías de asistencia para la selección de estos sensores como herramientas de decisión en el manejo del riego, donde se evalúan factores como el costo económico, facilidad de operación, precisión y desempeño de forma similar a los criterios disponibles en la Tabla 1.

Para los métodos de medición y determinación del potencial hídrico en el suelo, existe gran cantidad de recursos bibliográficos donde se

comparan las distintas metodologías disponibles (Campbell 1988, Dane y Hopmans 2002, Durner y Or 2006, Bittelli 2010), estableciendo pautas similares a las mencionadas en las Tablas 2 y 3 para la selección del método más adecuado en función de las condiciones de campos y laboratorio. Un aspecto muy importante para considerar es el ámbito de valores de potencial que se desee monitorear o determinar. Por ejemplo, bajo potenciales entre 0 y 0,1 MPa se podrían utilizar tanto tensiómetros y sensores dieléctricos en campo, como columnas colgantes o mesas de tensión mediante muestras no alteradas (Dane y Hopmans 2002). Mientras que en un ámbito de potenciales más bajos (0,1 – 1,5 MPa), los métodos de laboratorio se vuelven una mejor opción debido al abundante respaldo científico disponible en la literatura (Bittelli 2010).

### 3.2. Implicaciones en el manejo del agua y suelo en sistemas de producción

La demanda de agua del sector agrícola representa 69% de las extracciones mundiales, la cual es destinada para las tierras de riego que generan alrededor del 40% de la producción mundial de productos agrícolas (UNESCO 2020). Actualmente, los sistemas de producción agrícola y forestal enfrentan grandes retos asociados con la variabilidad en los fenómenos climáticos, los cuales afectan de forma directa la disponibilidad de las lluvias y la dinámica de la temperatura (Muñoz-Jiménez *et al.* 2019). Esto genera cambios drásticos en la dinámica del agua en el suelo y su contribución a la atmósfera y el ciclo del agua (Heitman *et al.* 2023).

Por lo tanto, mejorar la gestión del recurso hídrico en la agricultura es fundamental para encontrar una respuesta adaptativa a estos desafíos (Pereira 2017). Una alternativa para incrementar la adaptabilidad de estos sistemas a los cambios en los fenómenos atmosféricos es el monitoreo y determinación del contenido y el potencial del agua en el suelo mediante el uso de sensores, recopilando información en el campo necesaria para la toma de decisiones sobre la fertilización (como la identificación de condiciones de humedad óptima del suelo para aplicación de los fertilizantes) y el riego de precisión permitiendo hacer un uso más

racional del agua y el suelo (Bitelli 2010, Kukul *et al.* 2019, Lu *et al.* 2022). Este tipo de enfoques resaltan la importancia de la conservación del suelo al emplear prácticas que reducen la erosión y escorrentía de la capa superior mejorando la infiltración y retención de humedad del suelo (Ingrao *et al.* 2023).

Considerando lo anterior, las curvas de retención de humedad del suelo son herramientas fundamentales no solamente para la determinación del agua aprovechable por las plantas y las

necesidades de riego y drenaje (Figura 8), sino también en la solución numérica de ecuaciones fundamentales como la ecuación de Richards y la ecuación de la advección-dispersión (Radcliffe y Šimůnek 2018, Solone *et al.* 2012, Bittelli y Flury 2009). Con esta información, es posible realizar el modelado de fenómenos como la dinámica del agua (Figura 9) y/o solutos en el suelo a partir de variables como precipitación pluvial y la evaporación (Šimůnek *et al.* 2016).

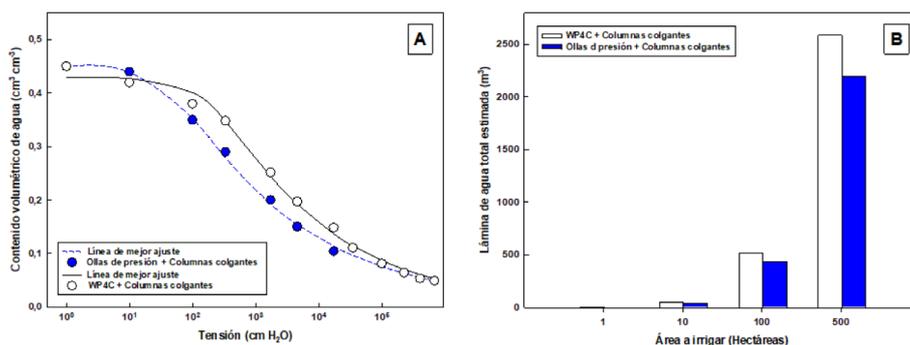


Figura 8. Implicaciones del método de determinación de la retención de humedad del suelo en las necesidades de riego en los cultivos. A) Curvas de retención de humedad determinadas mediante dos métodos distintos de análisis para un suelo franco limoso. B) Lámina de agua requerida para un área determinada de terreno, calculada mediante los datos obtenidos a partir de ambos métodos de análisis.

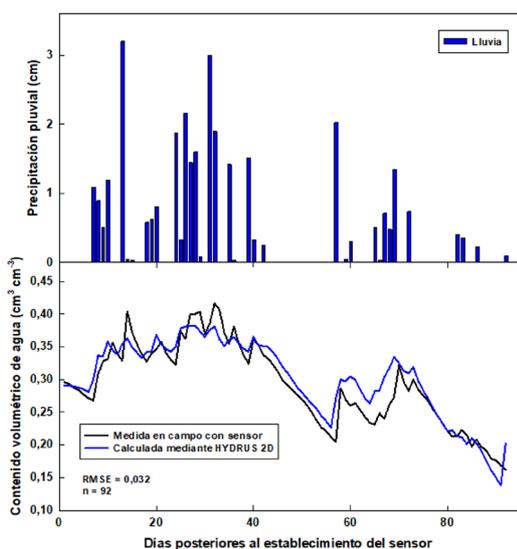


Figura 9. Implicaciones del método de medición del contenido de agua en el suelo. Evaluación de la precipitación pluvial y su efecto sobre la variabilidad en el contenido de agua en el suelo determinado en el horizonte superficial en un campo de golf en Lake Wheeler, North Carolina. Línea continua negra representa los valores medidos mediante un sensor FDR EC-5, y la línea continua azul representa los valores estimados mediante el software HYDRUS 2D. Adaptado de Camacho *et al.* (2003).

Para generar estas curvas de retención de humedad, se deben seleccionar los métodos más adecuados según el rango de potenciales en la curva, donde para los valores altos de potencial del agua en el suelo (0-0,1MPa) se prefiere la mesa de tensión o columnas colgantes (Dane y Hopmans 2002), el método de evaporación (Peters y Durner 2008), mientras que en los potenciales bajos (0,1-1,5MPa), las ollas de presión han sido más comúnmente utilizadas (Dane y Hopmans 2002). Actualmente se está recomendado el uso de potenciometría de punto de rocío como alternativa a las ollas de presión (Bittelli y Flury 2009), ya que las ollas de presión pueden presentar problemas asociados a dispersión de las muestras y un mal contacto entre el plato poroso y el suelo.

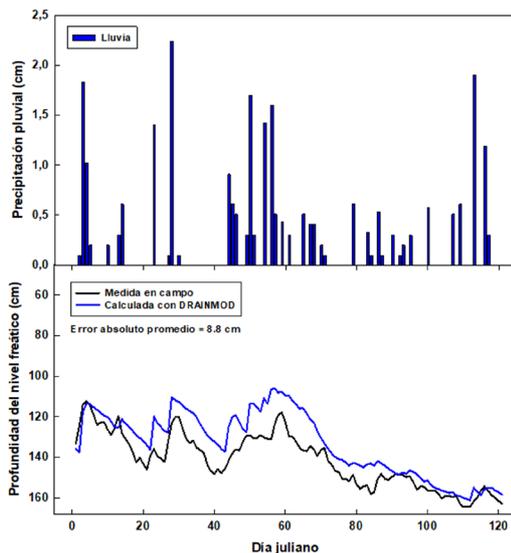


Figura 10. Precipitación pluvial y su efecto sobre la variabilidad en la profundidad del nivel freático en una finca de producción de maíz en Elizabeth City, North Carolina, USA. Línea continua negra representa los valores medidos mediante un piezómetro, y la línea continua azul representa los valores estimados mediante el software DRAINMOD.

Lo anterior, puede generar errores significativos en la interacción entre el contenido de agua y su potencial correspondiente (Figura 8), lo que repercute en el cálculo del balance hídrico del suelo (Solone *et al.* 2012). Estos errores podrían generar sub o sobre estimación de las necesidades del riego en sistemas de producción agrícola, cuyo efecto directo podría tener consecuencias drásticas en distritos de riego (Kaune *et al.* 2017), así como serias implicaciones socioeconómicas debido al costo incremental del agua en estas regiones.

Por otro lado, el uso de los tensiómetros y su facilidad de automatización han permitido no solamente el monitoreo del potencial hídrico, sino también la sistematización de los eventos de riego y la optimización del recurso agua en cultivos agrícolas y forestales de importancia económica como el olivo *Olea europaea* L. (Aziz *et al.* 2022), o el álamo blanco chino *Populus tomentosa* Carr (Jiao *et al.* 2021) en ambientes con déficit hídrico.

De forma similar, el uso de sensores del tipo TDR, FDR o de capacitancia para medir el contenido de humedad del suelo (Figura 9) como herramienta de decisión para el riego ha venido en aumento en países como Estados Unidos, donde grandes extensiones agrícolas han implementado el uso de estos dispositivos (Kukal *et al.* 2019). Dichos sensores de humedad también han sido utilizados para la calibración y validación de modelos hidrológicos como HYDRUS 2D (Šimůnek *et al.* 2016, Camacho *et al.* 2023), los cuales podrían utilizarse como herramientas de predicción de la dinámica y el contenido de agua en el suelo ante escenarios adversos (Figura 9).

También, el monitoreo del potencial de presión mediante técnicas piezométricas permite no solamente evaluar este componente del potencial de agua, sino también el cálculo de la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) (Amoozegar 2002), el monitoreo del nivel freático del suelo (Figura 10), y sus posibles efectos sobre el crecimiento de las plantas. Estos datos son necesarios para la solución de las ecuaciones de drenaje interno mediante programas de cómputo

especializados como DRAINMOD (Skaggs *et al.* 2012), que permiten la estimación de las necesidades de drenaje y su efecto en el rendimiento de cultivos de importancia agrícola.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describió las metodologías para el análisis y la determinación del potencial hídrico y contenido del agua en el suelo, las cuales han sido ampliamente estudiadas, empleadas y validadas en múltiples trabajos sobre física de suelo, pedología e hidrología. Dichas metodologías fueron resumidas, comparadas y contrastadas según sus ventajas y limitaciones. Esto ofrece una serie de pautas para facilitar al lector la elección de la metodología más apropiada para la determinación del potencial y contenido de agua en el suelo en función de sus objetivos y necesidades.

En el panorama actual, las variaciones en los fenómenos atmosféricos y su impacto directo sobre los sistemas de producción agrícola y forestal requieren de un manejo técnico e integrado de los recursos suelo y agua con miras a la producción sostenible. Dicho manejo ha de incluir el monitoreo y determinación de las variables contenido y potencial del agua en el suelo, las cuales son clave para el manejo del riego y drenaje en sistemas de producción agrícola.

Las aplicaciones potenciales de las metodologías descritas en el presente trabajo podrían representar una herramienta de gran utilidad para la optimización de los recursos en estos sistemas productivos. Por ejemplo, el desarrollo de estudios de modelizado hidrológico, calibración y validación de modelos numéricos y sus implicaciones en el manejo del agua y el drenaje en sistemas agrícolas y forestales requieren de información fidedigna en materia de las variables físicas del suelo, por lo que la selección del método de análisis resulta fundamental.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece profundamente a la Ing. Agr. Lucía Cordero Vásquez por su colaboración con el diseño e ilustración de las Figuras.

## LITERATURA CITADA

- Amoozegar, A. 2002. 3.4. 3.5 Piezometer Method (Saturated Zone). In Dane, JH; Topp, CG (eds.). Methods of soil analysis: Part 4. Physical Methods, 5.4. Madison, Wisconsin, USA, SSSA. p. 870-877.
- Anderson, MC; Kustas, WP; Norman, JM. 2003. Upscaling and downscaling-A regional view of the soil-plant-atmosphere continuum. *Agronomy Journal* 95(6):1408-1423.
- Aziz, M; Khan, M; Anjum, N; Sultan, M; Shamshiri, RR; Ibrahim, SM; Balasundram, SK; Aleem, M. 2022. Scientific irrigation scheduling for sustainable production in olive groves. *Agriculture* 12(4):564.
- Ball, BC; Hunter, R. 1988. The determination of water release characteristics of soil cores at low suctions. *Geoderma* 43(2-3):195-212.
- Bittelli, M. 2010. Measuring soil water potential for water management in agriculture: A review. *Sustainability* 2(5):1226-1251.
- Bittelli, M. 2011. Measuring soil water content: A review. *HortTechnology* 21(3):293-300.
- Bittelli, M; Flury, M. 2009. Errors in water retention curves determined with pressure plates. *Soil Science Society of America Journal* 73(5):1453-1460.
- Bogena, HR; Huisman, JA; Oberdörster, C; Vereecken, H. 2007. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology* 344(1-2):32-42.
- Briggs, LJ; Shantz, HL. 1912. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. *Bull. 230. USDA Bur. Plant Ind., Washington, DC.* 18 p.
- Buckingham, E. 1907. Studies on the movement of soil moisture. U.S. Department of Agriculture. Bureau of Soils. *Bull.* (38).
- Calvo, LR. 2005. Métodos de riego: un enfoque práctico para el diseño. Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 168 p.
- Camacho, ME; Faúndez-Urbina, CA; Amoozegar, A; Gannon, TW; Heitman, JL; Leon, RG. 2023. Subsurface Lateral Solute Transport in Turfgrass. *Agronomy* 13(3):903.
- Campbell, GS; Smith, DM; Teare, BL. 2007. Application of a dew point method to obtain the soil water characteristic. In *Experimental unsaturated soil mechanics*. Berlin, Heidelberg, Springer. p. 71-77.

- Campbell, GS. 1988. Soil water potential measurement: An overview. *Irrigation Science* 9:265-273.
- Campbell, JE. 1990. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. *Soil Science Society of America Journal* 54(2):332-341.
- Cassel, DK; Klute, A. 1986. Water potential: tensiometry. *In Klute, A (ed.). Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 5.1. 2 ed. Madison, Wisconsin, USA, SSSA Book Series. p. 563-596.
- Chernyak, GY. 1964. Dielectric methods for investigating moist soils. *In Ogil'vi, NA (ed.). Works of the All-Union Research Institute of Hydrology and Engineering Geology*. New Ser. N°. 5. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel. sp.
- Collins, M; An, SI; Cai, W; Ganachaud, A; Guilyardi, E; Jin, FF; Jochum, M; Lengaigne, M; Power, S; Timmermann, A; Vecchi, G; Wittenberg, A. 2010. The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nature Geoscience* 3(6):391-397.
- Cresswell, HP; Green, TW; McKenzie, NJ. 2008. The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention. *Soil Science Society of America Journal* 72(1):41-49.
- da Silva, AP; Kay, BD; Perfect, E. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal* 58(6):1775-1781.
- da Silva, AP; Kay, BD. 1997. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of America Journal* 61(3):877-883.
- Dane, JH; Hopmans, JW. 2002. Laboratory. *In Dane, JH; Topp, CG (eds.). Methods of soil analysis: Part 4. Physical Methods*, 5.4. Madison, Wisconsin, USA, SSSA. p. 675-720.
- Davis, JL; Chudobiak, WJ. 1975. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. *Geological Survey of Canada Paper* 75-1A:75-79.
- Decagon Devices, Inc. 2007. WP4 Dewpoint Potentiometer, Operator's manual, for models WP4 and WP4-T. Version 5. Decagon Devices, Pullman, WA.
- Diprose, MF. 2001. Some considerations when using a microwave oven as a laboratory research tool. *Plant and Soil* 229:271-280.
- Dixon, C; Blakeslee, A; Mills, M; Sheng, W; Jones, SB. 2023. Automated hanging water column for characterizing water retention and hysteresis of coarse-textured porous media. Technical note. *Soil Science Society of America Journal* 1-11.
- Durner, W; Or, D. 2006. Soil Water Potential Measurement. *In Anderson, MG; McDonnell, JJ (eds.). Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Chapter 73. John Wiley & Sons, Ltd. p. 1089-1102.
- Eijkelkamp, Equipment. 2016. Sand / Kaolin Box. User Manual, Royal Eijkelkamp (en línea). Consultado 21 ago. 2023. Disponible en <https://www.royaleijkelkamp.com/media/nkpftyf4/manual-sand-kaolin-box.pdf>
- Eijkelkamp, Equipment. 2022. Sandbox for pF-determination. User Manual, Royal Eijkelkamp (en línea). Consultado 21 ago. 2023. Disponible en <https://www.royaleijkelkamp.com/media/nyllqhyr/m-0801e-sandbox-for-pf-determination.pdf>
- Forsythe, WM. 1985. Manual de laboratorio de física de suelos. San José, Costa Rica. IICA. 212 p.
- Gardner, CMK; Dean, TJ; Cooper, JD. 1998. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71(4):395-403.
- Gardner, WH. 1986. Water content. *In Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 5.1. 2 ed. Madison, Wisconsin, USA, SSSA Book Series. p. 493-544.
- Gardner, WR; Miklich, FJ. 1962. Unsaturated conductivity and diffusivity measurements by a constant flux method. *Soil Science* 93(4):271-274.
- Gee, GW; Campbell, MD; Campbell, GS; Campbell, JH. 1992. Rapid measurement of low soil water potentials using a water activity meter. *Soil Science Society of America Journal* 56(4):1068-1070.
- Gee, GW; Dodson, ME. 1981. Soil Water Content by Microwave Drying: A Routing Procedure. *Soil Science Society of America Journal* 45(6):1234-1237.
- Gee, GW; Ward, AL; Zhang, ZF; Campbell, GS; Mathison, J. 2002. The influence of hydraulic nonequilibrium on pressure plate data. *Vadose Zone Journal* 1(1):172-178.
- Ghassemi, F; Thomas, GA; Jakeman, AJ. 1988. Effect of groundwater interception and irrigation on salinity and piezometric levels of an aquifer. *Hydrological processes* 2(4):369-382.
- Gubiani, PI; Reichert, JM; Campbell, C; Reinert, DJ; Gelain, NS. 2013. Assessing Errors and Accuracy in Dew-Point Potentiometer and Pressure Plate Extractor Measurements. *Soil Science Society of America Journal* 77(1):19-24.
- Halbertsma, JM; Veerman, GJ. 1994. A new calculation procedure and simple set-up for the evaporation method to determine soil hydraulic functions. Wageningen, the Netherlands: DLO Winand Staring Centre. sp.
- Hardie, M. 2020. Review of novel and emerging proximal soil moisture sensors for use in agriculture. *Sensors* 20(23):6934.
- Hartge, KH; Horn, R; Horton, R; Bachmann, J; Peth, S. 2016. *Essential Soil Physics*. Stuttgart, Germany, Schweizerbart Science Publisher. 391 p.

- Heimovaara, TJ; Bouten, W. 1990. A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water contents. *Water Resources Research* 26(10):2311-2316.
- Heimovaara, TJ; Huisman, JA; Vrugt, JA; Bouten, W. 2004. Obtaining the spatial distribution of water content along a TDR probe using the SCEM-UA Bayesian inverse modeling scheme. *Vadose Zone Journal* 3(4):1128-1145.
- Heitman, JL; Kool, D; Carvalho, HD. 2023. Soil management considerations for water resiliency in a changing climate. *Agronomy Journal* 115(5):2127-2139.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. San Diego, CA., Academic Press. 771 p.
- Hopmans, JW; Šimůnek, J; Romano, N; Durner, W. 2002. Inverse Methods. In Dane, JH; Topp, CG (eds.). *Methods of soil analysis: Part 4. Physical Methods*, 5.4. Madison, Wisconsin, USA, SSSA. p. 963-1008.
- Ingrao, C; Strippoli, R; Lagioia, G; Huisman, D. 2023. Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts, and approaches for reducing the risks. *Heliyon* 9(8):18507. DOI: doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18507
- Jiao, M; Yang, W; Hu, W; Clothier, B; Zou, S; Li, D; Di, N; Liu, J; Lui, J; Duan, J; Xi, B. 2021. The optimal tensiometer installation position for scheduling border irrigation in *Populus tomentosa* plantations. *Agricultural Water Management* 253:106922.
- Jury, WA; Horton, R. 2004. *Soil physics*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons. 384 p.
- Kaune, A; Werner, M; Rodríguez, E; Karimi, P; De Fraiture, C. 2017. A novel tool to assess available hydrological information and the occurrence of sub-optimal water allocation decisions in large irrigation districts. *Agricultural Water Management* 191:229-238.
- Kirkham, D. 1946. Proposed method for field measurement of permeability of soil below the water table. *Soil Science Society of America Journal* 10(C):58-68.
- Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. In Klute, A (ed.). *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 5.1. 2 ed. Madison, Wisconsin, USA, SSSA Book Series. p. 635-662.
- Kramarenko, VV; Nikitenkov, AN; Matveenko, IA; Molokov, VY; Vasilenko, YS. 2016. Determination of water content in clay and organic soil using microwave oven. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 43(1):012029.
- Kukal, MS; Irmak, S; Sharma, K. 2019. Development and application of a performance and operational feasibility guide to facilitate adoption of soil moisture sensors. *Sustainability* 12(1):321.
- Lal, R. 2012. Climate change and soil degradation mitigation by sustainable management of soils and other natural resources. *Agricultural Research* 1:199-212.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci* 1:277-294.
- Lima, HVD; da Silva, ÁP. 2008. Mesa de tensão com areia: procedimentos para montagem e validação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32:2209-2214.
- Lu, Y; Liu, M; Li, C; Liu, X; Cao, C; Li, X; Kan, Z. 2022. Precision fertilization and irrigation: Progress and applications. *AgriEngineering* 4(3):626-655.
- Luo, S; Lu, N; Zhang, C; Likos, W. 2022. Soil water potential: A historical perspective and recent breakthroughs. *Vadose Zone Journal* 21(4):e20203. DOI: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20203>
- MacFarlane, DS; Cherry, JA; Gillham, RW; Sudicky, EA. 1983. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study: 1. Groundwater flow and plume delineation. *Journal of Hydrology* 63(1-2):1-29.
- METER, Group Inc. 2021. WP4C Soil Water Potential Lab Instrument. Manual Web (en línea). Consultado 21 ago. 2023. Disponible en [https://library.metergroup.com/Manuals/20588\\_WP4C\\_Manual\\_Web.pdf](https://library.metergroup.com/Manuals/20588_WP4C_Manual_Web.pdf)
- METER, Group Inc. 2023. TERSO 21 Gen 2 Soil Water Potential Sensor. Manual Web (en línea). Consultado 21 ago. 2023. Disponible en [https://library.metergroup.com/Manuals/20854\\_TERSO21\\_Gen2\\_Manual\\_Web.pdf](https://library.metergroup.com/Manuals/20854_TERSO21_Gen2_Manual_Web.pdf)
- Minet, J; Lambot, S; Delaide, G; Huisman, JA; Vereecken, H; Vanclooster, M. 2010. A generalized frequency domain reflectometry modeling technique for soil electrical properties determination. *Vadose Zone Journal* 9(4):1063-1072.
- Mittelbach, H; Lehner, I; Seneviratne, SI. 2012. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *Journal of Hydrology* 430:39-49.
- Muñoz, R. 2004. *Field Devices for Monitoring Soil Water Content*. Department of Agricultural and Biological Engineering, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, IFAS/TREC, University of Florida, BUL343/AE266. sp.
- Muñoz-Jiménez, R; Giraldo-Osorio, JD; Brenes-Torres, A; Avendaño-Flores, I; Nauditt, A; Hidalgo-León, HG.; Birkel, C. 2019. Spatial and temporal patterns, trends and teleconnection of cumulative rainfall deficits across Central America. *International Journal of Climatology* 39(4):1940-1953.
- Noborio, K. 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computers and electronics in agriculture* 31(3):213-237.
- Or, D; Tuller, M; Wraith, JM. 2023. Water potential In Goss, MJ; Oliver, M (eds.). *Encyclopedia of Soils in the Environment* 2 ed. Academic Press. p. 159-167.

- Or, D; Wraith, JM. 1999. A new soil metric potential sensor based on time domain reflectometry. *Water Resources Research* 35(11):3399-3407.
- Or, D; Wraith, JM; Warrick, AW. 2002. Soil water content and water potential relationships. *In* Warrick, AW (ed.). *Soil physics companion*. Boca Ratón, FL., USA, CRC Press. p. 49-84.
- Paltineanu, IC; Starr, JL. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Science Society of America Journal* 61(6):1576-1585.
- Papendick, RI; Campbell, GS. 1981. Theory and measurement of water potential. *Water potential relations in soil microbiology* 9:1-22.
- Parker, N; Patignani, A. 2022. Revisiting laboratory methods for measuring soil water retention curves. *Soil Science Society of America Journal* 84(2):417-424.
- Pereira, LS. 2017. Water, agriculture and food: challenges and issues. *Water Resources Management* 31(10):2985-2999.
- Peters, A; Durner, W. 2008. Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology* 356(1-2):147-162.
- Powlson, DS; Gregory, PJ; Whalley, WR; Quinton, JN; Hopkins, DW; Whitmore, AP; Goulding, KW. 2011. Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food policy* 36:S72-S87.
- Radcliffe, DE; Šimůnek, J. 2018. *Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications*. Boca Ratón, FL., USA, CRC Press. 388 p.
- Rao, BH; Singh, DN. 2011. Moisture content determination by TDR and capacitance techniques: a comparative study. *International Journal of Earth Sciences and Engineering* 4(6):132-137.
- Rasmussen, TC; Crawford, LA. 1997. Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers. *Groundwater* 35(3):502-511.
- Rawlins, SL; Campbell, GS. 1986. Water potential: Thermocouple psychrometry. *In* Klute, A (ed.). *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 5.1. 2 ed. Madison, Wisconsin, USA, SSSA Book Series. p. 597-618.
- Reeve, RC. 1986. Water potential: piezometry. *In* Klute, A (ed.). *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 5.1. 2 ed. Madison, Wisconsin, USA, SSSA Book Series. p. 545-561.
- Richards, LA; Fireman, M. 1943. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. *Soil Science* 56(6):395-404.
- Richards, LA; Weaver, L.R. 1943. Fifteen-atmosphere percentages as related to the permanent wilting percentage. *Soil Science* 56(5):331-340.
- Richards, SJ. 1965. Soil suction measurements with tensiometers. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling* 9. p. 153-163.
- Romano, N; Hopmans, JW; Dane, JH. 2002. 3.3. 2.6 Suction table. *In* Dane, JH; Topp, CG (eds.). *Methods of soil analysis: Part 4. Physical Methods*, 5.4. Madison, Wisconsin, USA, SSSA. p. 692-698.
- Romano, N; Santini, A. 2002. Water retention and storage: Field. *In* Dane, JH; Topp, CG. (eds.). *Methods of soil analysis: Part 4. Physical Methods*, 5.4. Madison, Wisconsin, USA, SSSA. p. 721-738.
- Salama, RB; Farrington, P; Bartle, GA; Watson, GD. 1993. Distribution of recharge and discharge areas in a first-order catchment as interpreted from water level patterns. *Journal of hydrology* 143(3-4):259-277.
- Scanlon, BR; Andraski, BJ; Bilskie, J. 2002. 3.2. 4 Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. *In* Dane, JH; Topp, CG (eds.). *Methods of soil analysis: Part 4. Physical Methods*, 5.4. Madison, Wisconsin, USA, SSSA. p. 643-670.
- Schmugge, TJ; Jackson, TJ; McKim, HL. 1980. Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research* 16(6):961-979.
- Seneviratne, SI; Corti, T; Davin, EL; Hirschi, M; Jaeger, EB; Lehner, I; Orłowsky, B; Teuling, AJ. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews* 99(3-4):125-161.
- Sevostianova, E; Deb, S; Serena, M; Van Leeuwen, D; Leinauer, B. 2015. Accuracy of two electromagnetic soil water content sensors in saline soils. *Soil Science Society of America Journal* 79(6):1752-1759.
- Seyfried, MS; Grant, LE; Du, E; Humes, K. 2005. Dielectric Loss and Calibration of the Hydra Probe Soil Water Sensor. *Vadose Zone Journal* 4(4):1070-1079.
- Sharma, K; Irmak, S; Kukal, MS. 2021a. Propagation of soil moisture sensing uncertainty into estimation of total soil water, evapotranspiration and irrigation decision-making. *Agricultural Water Management* 243:106454.
- Sharma, K; Irmak, S; Kukal, MS; Vuran, MC; Jhala, AJ; Qiao, X. 2021b. Evaluation of soil moisture sensing technologies in silt loam and loamy sand soils: Assessment of performance, temperature sensitivity, and site-And sensor-specific calibration functions. *Transactions of the ASABE* 64(4):1123-1139.
- Shuai, X; Wendroth, O; Lu, C; Ray, C. 2009. Reducing the complexity of inverse analysis of time domain reflectometry waveforms. *Soil Science Society of America Journal* 73(1):28-36.

- Šimůnek, J; van Genuchten, MT; Šejna, M. 2016. Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal* 15(7):1-25.
- Šimůnek, J; van Genuchten, MT; Wendroth, O. 1998. Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal* 62(4):894-905.
- Sisson, JB; Gee, GW; Hubbell, JM; Bratton, WL; Ritter, JC; Ward, AL; Caldwell, TG. 2002. Advances in tensiometry for long-term monitoring of soil water pressures. *Vadose Zone Journal* 1(2):310-315.
- Skaggs, RW; Youssef, MA; Chescheir, GM. 2012. DRAINMOD: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4):1509-1522.
- SoilMoisture, Equipment Corp. 1995. Tempe Pressure Cell, 1400-1405. Operation Instructions. Santa Barbara, CA 93105 USA.
- SoilMoisture, Equipment Corp. 2008. 1600 5 Bar Pressure Plate Extractor Operating Instructions. Santa Barbara, CA 93105 USA.
- SoilMoisture, Equipment Corp. 2015. 1500 F2 15 Bar Pressure Plate Extractor. Operating Instructions. Santa Barbara, CA 93105 USA.
- Solone, R; Bittelli, M; Tomei, F; Morari, F. 2012. Errors in water retention curves determined with pressure plates: Effects on the soil water balance. *Journal of Hydrology* 470:65-74.
- Stakman, WP; Valk, GA; Van der Harst, GG. 1969. Determination of soil moisture retention curves. I. Sand box apparatus. Range pF 0 to 2.7. Wageningen, Netherlands, Institute for Land and Water Management Research. p. 1-19.
- Starr, JL; Paltineanu, IC. 2002. Methods for measurement of soil water content: Capacitance devices. *In* Dane, JH; Topp, CG (eds.). *Methods of soil analysis: Part 4. Physical Methods*, 5.4. Madison, Wisconsin, USA, SSSA. p. 463-474.
- Sun, ZJ; Young, GD; McFarlane, RA; Chambers, B.M. 2000. The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time-domain reflectometry in sandy soil. *Canadian Journal of Soil Science* 80(1):13-22.
- Susha, SL; Singh, DN; Baghini, MS. 2014. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement* 54:92-105.
- Tamari, S; Gaudu, JC; Simonneau, T. 1993. Tensiometric measurement and metastable state of water under tension. *Soil Science* 156 (3):149-155.
- Topp, GC; Davis, JL; Annan, AP. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water resources research* 16(3):574-582.
- Topp, GC; Parkin, GW; Ferré, TPA. 2008. Chapter 70: Soil Water Content. *In* Carter, MR; Gregorich, EG (eds.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2 ed. Boca Ratón, FL., USA, CRC Press. p. 939-961.
- Topp, GC; Zebchuk, W. 1979. The determination of soil-water desorption curves for soil cores. *Canadian Journal of Soil Science* 59(1):19-26.
- Topp, GC; Zegelin, S; White, I. 2000. Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils. *Soil Science Society of America Journal* 64(4):1244-1252.
- Topp, CG; Ferré, P. 2002. The soil solution phase. *In* Dane, JH; Topp, CG (eds.). *Methods of soil analysis: Part 4. Physical Methods*, 5.4. Madison, Wisconsin, USA, SSSA. p. 417-545.
- Townend, J; Reeve MJ; Carter, A. 2001. Water release characteristics. *In* Smith KA; Mullins C (eds.). *Soil and environmental analysis: physical methods*, 2 ed. New York, NY., Marcel Dekker. p. 95-140.
- Tuller, M; Or, D; Hillel, D. 2004. Retention of water in soil and the soil water characteristic curve. *Encyclopedia of Soils in the Environment* 4:278-289.
- UNESCO. 2020. Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático. UNESCO, Paris, France. 20 p. (en línea). Consultado 21 ago. 2023. Disponible en <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611.locale=es>
- van den Elsen, HGM; Ritsema, CJ; Seeger, M; Keesstra, SD. 2014. Averaging performance of capacitance and time domain reflectometry sensors in nonuniform wetted sand profiles. *Vadose Zone Journal* 13(12):1-13.
- van Lier, QDJ; Pinheiro, EAR; Inforsato, L. 2019. Hydrostatic equilibrium between soil samples and pressure plates used in soil water retention determination: consequences of a questionable assumption. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 43:e0190014.
- Vanapalli, SK; Nicotera, MV; Sharma, RS. 2008. Axis translation and negative water column techniques for suction control. *In* Tarantino, A; Romero, E; Cui, YJ (eds.). *Laboratory and field testing of unsaturated soils*. Springer, Dordrecht. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8819-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8819-3_4)
- Veldkamp, E; O'Brien, JJ. 2000. Calibration of a frequency domain reflectometry sensor for humid tropical soils of volcanic origin. *Soil Science Society of America Journal* 64(5):1549-1553.
- Vepraskas, MJ; Richardson, JL; Tandarich, JP. 2006. Dynamics of redoximorphic feature formation under controlled ponding in a created riverine wetland. *Wetlands* 26(2):486-496.

- Walker, JP; Willgoose, GR; Kalma, JD. 2004. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal of Hydrology* 293(1-4):85-99.
- Wind, GP. 1968. Capillary conductivity data estimated by a simple method. *In* Rijtema, PE; Wassink, H (eds.). *Water in the unsaturated zone. Proceedings of the Wageningen Symposium, IASH Gentbrugge/Unesco, Paris.* p. 181-191.
- Young, MH. 2002. Piezometry. *In* Dane, JH; Topp, CG (eds.). *Methods of soil analysis: Part 4 Physical Methods, 5.4.* Madison, Wisconsin, USA, SSSA. p. 547-573.
- Young, MH; Sisson, JB. 2002. Tensiometry. *In* Dane, JH; Topp, CG (eds.). *Methods of soil analysis: Part 4 Physical Methods, 5.4.* Madison, Wisconsin, USA, SSSA. p. 575-608.
- Yu, S; Xu, Q; Cheng, X; Xiang, Y; Zhu, Y; Yan, X; Cheng, Q. 2021. In-situ determination of soil water retention curves in heterogeneous soil profiles with a novel dielectric tube sensor for measuring soil matric potential and water content. *Journal of Hydrology* 603:126829.



Agronomía Costarricense. Universidad de Costa Rica. Se encuentra licenciada con Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para mayor información escribir a [rac.cia@ucr.ac.cr](mailto:rac.cia@ucr.ac.cr)

# NORMAS DE PUBLICACIÓN

---

La Revista Agronomía Costarricense es una publicación semestral editada y financiada por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, funciona con el respaldo de profesionales de la Universidad de Costa Rica, el Colegio de Ingenieros Agrónomos y el Ministerio de Agricultura y Ganadería que conforman su Consejo Editorial.

## OBJETIVO DE LA REVISTA

El objetivo de la Revista Agronomía Costarricense desde su creación en 1977 ha sido publicar, visibilizar y facilitar el acceso de la investigación agropecuaria y forestal con temas de interés y actualidad científica del sector.

## TIPO DE PUBLICACIÓN

- Trabajos originales e inéditos de investigación, que tengan mérito científico o técnico a juicio del Consejo Editorial.
- Artículos.
- Notas técnicas, que son avances o resultados paralelos de investigaciones en marcha.
- Análisis y comentarios sobre temas relevantes, solicitados a especialistas.
- Revisiones de literatura exhaustivas sobre un tema específico.
- Reseñas de libros.

## NORMAS PARA PUBLICACIÓN

Los trabajos publicados en la Revista Agronomía Costarricense son el resultado de una selección rigurosa, por parte del Consejo Editorial en primera instancia y el arbitraje realizado por especialistas nacionales e internacionales, mediante el sistema de revisión por pares doble ciego.

Una vez que el Consejo Editorial evalúa previamente el mérito científico o técnico de los trabajos, son remitidos con el instrumento de evaluación, a especialistas nacionales e internacionales. El dictamen puede emitir los siguientes criterios:

- El documento se acepta sin reservas.
- Se acepta sólo si se incluyen las observaciones.
- No se acepta del todo para publicación.

En caso de que se presente controversia entre las evaluaciones realizadas para un mismo documento, se somete a otra revisión por parte de nuevas personas especialistas cuya valoración determine el resultado definitivo para publicar o no.

Si el documento es aceptado clasifica en una de las siguientes categorías:

- Artículo.
- Nota técnica.
- Otros: Análisis y comentario, revisión de literatura, reseñas de libros.

La persona editora en conjunto con quienes conforman el Consejo Editorial de la Revista Agronomía Costarricense, determinan si se acepta o rechaza la documentación presentada para posible publicación.

Los trabajos pueden ser escritos en español o inglés. Deben ajustarse a las normas de redacción establecidas para la estructura del manuscrito. Es recomendable que los manuscritos en inglés sean revisados y corregidos previamente por una persona especialista del tema cuya lengua materna sea el inglés. (El aporte del material recibido no será devuelto a las personas autoras).

- Los trabajos de investigación no deben ser mayores de 20 páginas y las notas técnicas no deben exceder las 6 páginas.
- La Revista Agronomía Costarricense no cobra por recibir manuscritos o por publicar investigaciones.
- El trabajo debe estar escrito en una versión actualizada de Word para Windows, a doble espacio y con tipo de letra arial 12.
- Las personas autoras deben seguir las normas del Sistema Internacional de Unidades tanto en el texto como en las tablas que suministren.
- El manuscrito debe ser enviado al correo electrónico de la Revista Agronomía Costarricense.
- Las tablas deben ser presentadas en Word y en Excel las figuras y gráficos en orden ascendente por números y letras según corresponda. Tanto las tablas como las figuras se deben presentar en páginas independientes impresas en buena calidad. Otras figuras y fotografías se deben presentar en formato eps, jpg o tiff con un mínimo de 240-300 dpi.

Los trabajos deben ser enviados o entregados por el autor o la autora principal a nuestra dirección electrónica:

rac.cia@ucr.ac.cr  
Teléfono 2511 2080

## ESTRUCTURA DEL MANUSCRITO

**Título.** Debe ser lo suficientemente claro de forma tal que oriente al lector sobre el contenido de la investigación y que no exceda de 15 palabras.

**Autor (a).** Escribir el nombre completo, con ambos apellidos separados por un guión como se muestra a continuación: Serrano-Velázquez. La instrucción aplica también para las personas coautoras. Deberán agregar al pie de página la afiliación institucional indicada con un número para cada una de las personas participantes en la investigación y sólo el correo electrónico institucional de la persona que el equipo investigador seleccione para correspondencia.

El documento presentado será evaluado dentro de la modalidad de artículo de investigación, nota técnica, revisiones de literatura sobre un tema específico, reseñas de libros y actualizaciones o análisis y comentarios sobre actividades agropecuarias específicas. La decisión final sobre la modalidad para publicación del manuscrito será con base en el criterio de las personas revisoras y recomendaciones de quienes integran el Consejo Editorial y Consejo Editorial Asesor Internacional.

**Código ORCID.** Sirve para identificar a la persona autora con un código único que le diferenciará de cualquier otra persona que publique. Dicho código es requerido para afiliar tanto a la persona que investiga como a las publicaciones que realice. Deberá registrar nombre completo, correo electrónico y una contraseña en el siguiente enlace: <http://orcid.org/>

El enlace señalado anteriormente generará automáticamente el código ORCID de la persona que publica. En el caso de que en una publicación participen varios (as) autores (as) deberá aparecer el

ORCID de cada una de las personas participantes en la publicación y no sólo la de la persona señalada como contacto para correspondencia. Ese código aparecerá al pie de la página para cada una de las personas participantes en la publicación.

**Resumen estructurado.** Este es un párrafo donde se debe señalar, en un máximo de 300 palabras, la introducción, el objetivo del trabajo, los materiales y métodos, los principales resultados y las conclusiones. Tratar de incluir cifras. Los términos “Introducción, Objetivo, Materiales y métodos, Resultados y Conclusión” deben ser destacados en negrita para diferenciar esos contenidos dentro del resumen.

**Abstract.** Debe ser exacto al resumen en español y debe incluir el título en inglés.

**Palabras clave.** Incluir hasta 5 palabras clave que le permitan a un usuario localizar en una plataforma digital la publicación.

**Introducción.** Debe incluir la justificación del trabajo, los antecedentes más relevantes sobre el tema y el objetivo concreto del trabajo.

**Materiales y métodos.** Se refiere a todos los materiales y métodos requeridos para el desarrollo de la investigación, con una detallada descripción de los mismos que le permitiera alcanzar resultados específicos del tema tratado. Si la persona autora requiere algún programa especializado debe presentar una descripción y conveniencia de su utilización para alcanzar los resultados.

**Resultados y discusión (pueden venir juntos o separados).** Su contenido se fundamenta en los resultados obtenidos a partir del objetivo planteado en la investigación. Independientemente de su complejidad, requieren ser expuestos de forma clara y sencilla. Los resultados pueden ser números, categorías o agrupaciones de los objetos o sujetos de estudio. La exposición de los resultados debe caracterizarse por la precisión y legitimidad de los hechos y cifras registradas, por lo que no se admiten resultados que se apoyen únicamente en calificativos como por ejemplo: mucho, poco, más, menos, bastante, pues podría conducir a una interpretación inexacta que debilita la investigación.

**Agradecimientos.** En esta sección sólo se incluye aquellas personas que hicieron un aporte muy significativo al trabajo.

**Literatura citada.** Debe redactar las referencias de acuerdo con el Manual “**Redacción de referencias bibliográficas: normas técnicas para ciencias agroalimentarias del IICA-CATIE**”. Disponible en <http://www.iica.int/sites/default/files/publications/files/2016/b4013e.pdf>

Ejemplos:

**Revista**

Saborío, A; Sánchez, J. 2014. Evaluación de la condición corporal en un hato de vacas Jersey en pastoreo en la zona alta de Cartago. Variaciones durante el ciclo productivo. *Agronomía Costarricense* 38(1):55-65.

**Libro**

Garita, RA. 2014. La piña. Cartago, Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 568 p.

### **Capítulo de un libro**

Molina, E; Alvarado, A. 2012. Manejo de la acidez y encalado de suelo. *In* Alvarado, A; Raigosa, J (eds.). Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. San José, Costa Rica, ACCS. p. 159-177.

### **Tesis**

Reyes, D. 2012. Compuestos GRAS para el control de patógenos poscosecha in vitro en mango (*Mangifera indica* L.), piña (*Ananas comosus* L.) y papaya (*Carica papaya* L.), y pruebas de eficacia in vivo en piña. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 92 p.

### **Referencias en Internet**

Autor, año. Título del trabajo (en línea). Ciudad, país. Fecha de consulta y vínculo. Se debe verificar el tipo de publicación según corresponda libro, revista, etc., para redactar la cita.

## **DERECHOS DE AUTOR**

El autor, la autora o los autores deben autorizar por escrito a la Revista Agronomía Costarricense el derecho de su primera publicación y mención que quedará registrada con la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional y conserva todos sus derechos y además, podrán incluir su publicación en un repositorio institucional que especifique su publicación en primera instancia, en la Revista Agronomía Costarricense.

Una vez publicado el volumen del periodo respectivo, se puede acceder a la versión digital, lo que permite gestionar un autoarchivo del documento o documentos de interés, en el sitio seleccionado por la persona autora.

El autor o la autora principal, debe dar fe por escrito, que la información presentada es original y no ha sido publicada en ningún otro medio. Además, desde el momento que entrega la documentación, debe contar con la autorización escrita de la institución donde se realizó la investigación.

## **POLÍTICA DE DETECCIÓN DE PLAGIO**

Mediante herramientas de Google y DupliChecker, la Revista Agronomía Costarricense es vigilante de las fuentes que se utilizan en la dinámica de investigación para determinar el uso de ideas originales sin la citación de la fuente o bien por la utilización de palabras de otros sin citarlos en el documento y en la lista de referencias bibliográficas.

De igual manera se incurre en plagio cuando se falsifican las palabras de otros para asumirlas como propias o bien cuando indica ser el autor o autora de una investigación cuando su propietario es otra persona. De ser detectado un plagio, se indicará por escrito al autor principal como se procederá.

## **POLÍTICA DE ACCESO ABIERTO**

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente la investigación al público, con el propósito de fomentar un mayor intercambio de conocimiento global.

## **ARCHIVO**

La revista cuenta con la preservación de sus archivos digitales, primeramente, los archivos se encuentran integrados en la base de datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería, la cual cuenta con un sistemas de respaldo, cuyas Políticas y Normas se pueden encontrar en el enlace: <https://www.mag.go.cr/sgmag/Nomas-Políticas-Generales-TI-2022.pdf>

Asimismo, se cuenta con el respaldo digital del repositorio Kérwá de la Universidad de Costa Rica, y el sistema de administración y publicación de revistas OJS. Además, semestralmente la revista envía un CD, con el volumen respectivo, al Sistema Nacional de Bibliotecas (SINABI); por lo que ahí se encuentra un respaldo de los manuscritos.

La revista también utiliza el sistema CLOCKSS para crear un archivo distribuido entre las bibliotecas participantes, lo que permite a dichas bibliotecas, crear archivos permanentes de la revista con fines de preservación y restauración. Se puede encontrar más información en el siguiente enlace: <http://thekeepers.org/>

## **CÓDIGO DE ÉTICA**

---

### **DEBERES DEL O LA EDITORA**

El o la editora, debe vigilar por publicaciones originales con mérito científico o técnico, con apoyo del Consejo Editorial. De esta manera, puede aceptar o rechazar un trabajo bajo los criterios expuestos en las normas de publicación de la revista y su contenido intelectual sin distinción de género, orientación sexual, ideología política o religiosa, nacionalidad u origen étnico de las personas. Los textos recibidos serán remitidos a especialistas nacionales e internacionales para su revisión por pares doble ciego. En todo el proceso, el editor o editora debe garantizar la confidencialidad a las partes, así que no puede revelar información acerca del contenido del manuscrito, tampoco los nombres de las personas que solicitan publicar o los nombres de quienes realizan la revisión y evaluación del documento.

### **DEBERES DE LAS PERSONAS QUE CONFORMAN EL CONSEJO EDITORIAL**

Quienes conforman el Consejo Editorial, les corresponde contribuir con la asignación de personas revisoras nacionales e internacionales según la temática del documento recibido; también deben auxiliar en la revisión preliminar de manuscritos sobre materias afines a su profesión y apoyar con la actualización, mejora y evaluación periódica de la revista.

### **DEBERES DE LAS PERSONAS AUTORAS**

Deben seguir los criterios expuestos en las normas de publicación de la Revista Agronomía Costarricense. Asimismo, deben documentar por escrito, que la información presentada es original,

que no ha sido publicada o considerada para su publicación en otro medio; además, debe incluir dentro de la documentación que presente, la autorización escrita de la institución donde se generó el documento. Quienes publiquen deben saber que la utilización de datos, información de otras personas autoras sin citarlas en el documento y en la lista de referencias bibliográficas, así como la adopción de ideas para asumirlas como propias, se podría presumir como plagio y de comprobarse, su texto no se tomaría en cuenta para la publicación. De esta forma deben citar completa y adecuadamente las fuentes bibliográficas de los textos que aportan en el trabajo presentado. Para la autoría, es preciso que se nombren como personas co-autoras, quienes contribuyan significativamente en el desarrollo del estudio. Deben citar en el texto todas las fuentes financieras en las que se apoyaron, al igual que cualquier conflicto económico o de intereses que podría influenciar en los resultados finales del manuscrito.

**En los documentos presentados no deben aparecer los nombres de productos o casas comerciales (®), pues compromete su publicación.** Por último, si quien publica identificara algún error en su artículo, deberá informarlo 15 días posteriores a la entrega del último documento que presentó para su publicación al correo [rac.cia@ucr.ac.cr](mailto:rac.cia@ucr.ac.cr)

## **DEBERES DE LAS PERSONAS REVISORAS**

A toda persona especialista le compete notificar al editor o editora, cuando se le consulte, si le es posible revisar el documento que se le solicita evaluar. De aceptar deberá realizar su trabajo de manera objetiva, sus críticas han de tener argumentos sustentados en la ciencia y no ha de tener ningún conflicto de intereses con la información presentada o la autoría, aspectos que deberá indicar antes de aceptar y llevar a cabo la evaluación del documento.

Quienes contribuyen en la revisión de los documentos presentados para posible publicación han de comunicar al editor o editora, acerca de cualquier comportamiento no ético identificado en el manuscrito revisado, además de los aportes de información crítica y constructiva para el mejoramiento del texto, o bien, para el rechazo del mismo. De igual forma, conocen que el material que se les entrega para su evaluación debe ser tratado con absoluta confidencialidad, por lo cual no podrán revelar a terceras personas ningún dato o utilizar la información del documento para proyectos personales.

Esta revista se terminó de imprimir en la  
Sección de Impresión del SIEDIN, en diciembre 2024.

Universidad de Costa Rica  
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica



# AGRONOMÍA COSTARRICENSE

---

## REVISTA EN LÍNEA

Si desea visitar la Revista Agronomía Costarricense puede hacerlo a través de:

**Ministerio de Agricultura y Ganadería** [http://www.mag.go.cr/rev\\_agr/index.html](http://www.mag.go.cr/rev_agr/index.html)

**Portal de Revistas Académicas de la Universidad de Costa Rica** <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost>

**Centro de Investigaciones Agronómicas** [www.cia.ucr.ac.cr](http://www.cia.ucr.ac.cr)

---

## DIRECCIÓN

REVISTA AGRONOMÍA COSTARRICENSE

Centro de Investigaciones Agronómicas

Universidad de Costa Rica

San José, Costa Rica

Teléfono 2511-2080

Correo electrónico: [rac.cia@ucr.ac.cr](mailto:rac.cia@ucr.ac.cr)

## Contents

### Scientific papers

- 1- Growth and nutrient accumulation in the Elbe-UCR potato variety.  
*Eric Ulloa-Calvo, Manuel E. Camacho-Umaña and Arturo Brenes-Angulo* . . . . . 9-29
- 2- Quality analysis of cocoa using portable Near-Infrared Spectroscopy (NIR):  
Challenges towards geographical differentiation.  
*Paola Quesada-Arguedas, Carlos Hernández-Aguirre, Alejandro Vargas-Martínez and Alejandra Mencía-Guevara* . . . . . 31-43
- 3- Erosive processes in Andisols cultivated with onion (*Allium cepa* L.):  
Contribution of sediment adhered to the bulb to soil and nutrient loss.  
*Silvia Marín-Araya, Mario Villatoro-Sánchez and Manuel E. Camacho-Umaña* . . . . . 45-63
- 4- Assessing two methods for agrochemical application (Tractor-Based and UAV) in rice fields.  
*Esteban Arroyo-Mejías, Isaac Venegas-Méndez, M. Melissa Rojas-Downing and Alejandra María Rojas-González* . . . . . 65-81
- 5- Effect of conservation agriculture practices on maize production in the milpa system in Yucatán, México.  
*Carlos Aldair Gamboa-Cimé, José Bernardino Castillo-Caamal, Rodolfo Vilchis-Ramos,  
Jorge Santiago Santos-Flores and Alan García-Lira* . . . . . 83-94
- 6- Postharvest quality of yam (*Dioscorea alata* L.) in Costa Rica: Factors that affect during curing and tuber storage.  
*Maricruz Ramírez-Sánchez, Johanny Castro-Chinchilla, Marco Vinicio Sáenz-Murillo and Gerardina Umaña-Rojas* . . . . . 95-110
- 7- Isolation and identification of potential nematophagous fungi in banana farms  
from the Huetar Atlantic Region of Costa Rica.  
*Berlioth Ugalde-Monge, Roy Artavia-Carmona, Irena Hilje-Rodríguez and Walter Peraza-Padilla* . . . . . 111-131
- Technical notes**
- 8- Determining the number of repetitions in agricultural experiments: Importance of effect size and variability.  
*Jorge Claudio Vargas-Rojas, Alejandro Vargas-Martínez and Eduardo Corrales-Brenes* . . . . . 133-142
- 9- Application cycles of a biostimulant on the development of coffee plants in nurseries.  
*Yusdel Ferrás-Negrín, Carlos Alberto Bustamante-González and Vidalina Pérez-Salina* . . . . . 143-149
- 10- Influence of *Ascophyllum nodosum* extract on rooting of *Mentha spicata* L.  
*Pablo Fernando Luna-Rodríguez, Hans Marcelino Munguía-Falcon, Isabel Elena Mogollón-Ortega,  
Excelsa Elizabeth Saavedra-Flores, Claudia Paz Romero-Ayala, María Fernanda Siancas-Carrasco,  
Martha Andrea Márquez-Bautista, Cecilia Emperatriz Figueroa-Serrudo, Isabel Maximiliana Montes-Yarasca  
and Héctor Baroni Cántaro-Segura* . . . . . 151-158
- 11- Effect of biostimulants on growth and production of cucumber and melon in greenhouse.  
*Julio Gabriel-Ortega, Mirian Chilan-Mata, Washington Narváez-Campana, Fernando Ayón-Villao,  
William Merchán-García, Heidi Flores-Ramírez and Gema Burgos-López* . . . . . 159-168
- Literature review**
- 12- Soil water potential and content: A concise review of their methods of analysis and implications  
within soil and water management.  
*Carlos Hidalgo-Campos and Manuel E. Camacho-Umaña* . . . . . 169-200