

ISSN 0377-9424
Versión digital ISSN 2215-2202

AGRONOMÍA COSTARRICENSE

REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

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

www.cia.ucr.ac.cr
www.mag.go.cr/rev_agr/index.html



Enero - Junio 2024

Volumen 48

Número 1

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 “Comportamiento vegetativo-generativo de tomate y chile dulce hidropónico en invernadero, sometidos a agotamiento hídrico” de Soto-Bravo y Betancourt-Flores.



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
Instituto Agronômico do Paraná, 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 Berta 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

ISSN 0377-9424

AGRONOMÍA COSTARRICENSE

REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

COLEGIO DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA

Volumen 48

2024

Número 1


EDITORIAL
UCR

REVISORES ESPECIALIZADOS

Revisores Nacionales

Adrian Pinto
 Alfredo Alvarado H.
 Alfredo Bolaños
 Alfredo Durán
 Allan González
 Álvaro Castro
 Álvaro Jiménez C.
 Álvaro Ramírez
 Amelia Paniagua
 Ana Gabriela Pérez
 Andrés Alpizar
 Antonio Bogantes
 Argerie Cruz
 Arturo Brenes A.
 Bernal Azofeifa
 Bernal Herrera
 Bernal Rodríguez
 Bernal Valverde
 Bernardo Vargas
 Bryan Alemán
 Carlos Alfaro
 Carlos Alpizar
 Carlos Henríquez
 Carlos Luis Loria
 Carlos Luna T.
 Carlos Méndez
 Carlos Pomareda
 Carlos Ramírez M.
 Carlos Rodríguez V.
 Carmela Velásquez
 Claudia Charpentier
 Claudia Fernández
 Cristina Chinchilla
 Cristina Vargas
 Dagoberto Arias
 Daniel Saborío
 David Mora
 Dennis Barquero
 Denis Hine
 Dennis León
 Diego Berrocal
 Diógenes Cubero
 Douglas Marín
 Edgar Aguilar
 Edgar Alvarado
 Edgar Gutiérrez
 Edgar Vidal
 Edgardo Alpizar
 Eduardo Barrantes
 Edwin Esquivel
 Edwin Orozco
 Elias de Melo
 Eloy Molina
 Eric Mora N.
 Eugenio Corea
 Eugenio González
 Federico Albertazzi
 Felipe Arauz C.
 Felipe Arguedas
 Fermín Subirós R.
 Florencia Antillón
 Francisco Mesén
 Francisco Romero
 Francisco Saborío
 Franklin Herrera
 Freddy Soto
 Gabriel Garbanzo
 Geiner Matamoros
 Geovanny Garro
 Gerardo Ávalos
 Gilbert Barrantes

Guillermo Araya
 Gustavo Fallas
 Gustavo Quesada
 Héctor Medrano
 Helga Blanco M.
 Hernán Castro E.
 Hugo Aguilar
 Ileana Moreira
 Ismael Hernández
 Johnny Montenegro
 Jorge Camacho
 Jorge Elizondo
 Jorge Leiva
 Jorge Mora B.
 Jorge Sandoval
 Jorge Segura
 José Bejarano
 Jose L. Corrales
 José P. Jiménez
 José Valerín
 Juan Araya
 Juan Carlos Madrigal
 Juan José Romero
 Juan Luis Fallas
 Juan Luis Morales
 Juan Manuel Hernández
 Juan Mora
 Juan R. Navarro
 Julieta Carranza
 Julio Arias
 Julio César Calvo
 Julio Mata
 Julio Rodríguez
 Karolina Villagra
 Kenneth Largaespada
 Kenneth Madriz
 Laura Segura
 Laura Solís
 Leida Castro
 Leslie Medina
 Lidieth Uribe
 Lisela Moreira
 Lolita Durán
 Lorena Flores
 Lorena Uribe
 Luis Barboza
 Luis Brenes Q.
 Luis Calvo
 Luis Carrera
 Luis Diego Arroyo
 Luis Vargas
 Luis Villalobos
 Luko Hilje
 Manuel E. Camacho U.
 Manuel Masis
 Marco Adamson
 Marco Lobo
 Marco V. Sáenz
 Marcos Chaves
 María Isabel González
 Maricruz Ramírez
 Mario Araya
 Mario Arias
 Mario Saborío
 Mario Villatoro
 Marta Montero
 Marta Valdéz M.
 Marvin Araya
 Marvin Vargas
 Milagro Granados
 Milton Villarreal
 Mónica Blanco

Natalia Barboza
 Natalia Soto
 Néstor Chaves
 Noé Salazar
 Olman Murillo
 Orlando Carrillo
 Orlando Chinchilla
 Oscar Castro
 Oscar Obando
 Oscar Quesada
 Patricia Quesada
 Patricia Ramírez
 Rafael Mata
 Ramiro Alizaga
 Ramón Mexzón
 Ramón Molina
 Randall Chacón
 Randy Chinchilla
 Raúl Botero
 Rebeca Zamora
 Renato Jiménez
 Ricardo Piedra
 Roberto Azofeifa
 Roberto Camacho
 Roberto Ramírez
 Roberto Villalobos
 Rodolfo Araya
 Rodrigo Jiménez
 Rodrigo Ríos
 Rodrigo Rosales
 Roger Fallas
 Roger Molina Coto
 Roger Muñoz
 Ronald Vargas
 Rose Marie Menacho
 Rubén Calderón
 Rubén Ortiz
 Ruth de la Asunción
 Ruth León G.
 Sergio Abarca
 Susana Cascante
 Sigso Acuña
 Victor Hugo Porras
 Victor Julio Vargas
 Victoria Artonis
 Victoria García
 Vidal Vega
 Walter Marín M.
 Walter Peraza
 Werner Rodríguez
 Wilbert Phillips
 William Hernández
 William Meléndez
 William Rivera
 William Sánchez
 Wilson Beita
 Yannery Gómez

Revisores Internacionales

Abellino Pitty (Honduras)
 Adriana Escudero (España)
 Adriana Murillo (EE.UU.)
 André Finkler (Brasil)
 Andrés Búcaro (Guatemala)
 Aura Morales (El Salvador)
 Beatriz Eibl (Argentina)
 Bernardo Villegas (Colombia)
 Carolina Zamorano (Colombia)
 Cesáreo Rodríguez H. (México)

Corina Bernigaud (Uruguay)
 Consuelo Estevez (Puerto Rico)
 Daniel Carreira (Argentina)
 Edgar Amezcua (Colombia)
 Emilio Olivares Sáenz (México)
 Ermita Hernández (Puerto Rico)
 Florencia Montagnini (EE.UU.)
 Francisco Coll (Cuba)
 Francisco Ibarra (México)
 Francisco P. Chaimsohn (Brasil)
 Géri E. Meneghello (Brasil)
 Guadalupe Valdovinos-Ponce (México)
 Guillermo Reyes (Nicaragua)
 Héctor Mario Andrade (México)
 Hernán Chiriboga (Ecuador)
 Hugo del Cid H. (Guatemala)
 Ildefonso Pla Sentis (España)
 Jaime Garzón (Colombia)
 Jorge Etchevers (México)
 José A. Ordoñez (Honduras)
 José E. Villarreal (Panamá)
 José L. Barrera Violet (Colombia)
 José M. Tapia (México)
 José Moure (España)
 José R. Bárcena (México)
 Juan Carlos Rosas (Honduras)
 Juan F. Gallardo (España)
 Juan Francisco Barrera (México)
 Juan Pedro Agostini (Argentina)
 Julián F. Becerra (Colombia)
 Kolima Peña Calzada (Cuba)
 Kellen Gatti (Colombia)
 Lérica Almaguel (Cuba)
 Leonides Castellanos (Colombia)
 Leopoldo Álvarez (Argentina)
 Luis Castresana (España)
 Luis Felipe Lata (Brasil)
 Manuel Reigosa (España)
 Manuel Sandoval (México)
 Marcela Guerrero (Colombia)
 Marta Nascimento (Brasil)
 Mauricio Arango (Colombia)
 Miguel Marchamalo (España)
 Nólver Arias Arias (Colombia)
 Olegario Muñiz Ugarte (Cuba)
 Oscar 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)
 Ronald Ochoa (EE.UU.)
 Rosa Mª Arias (México)
 Rubén Cabanillas Cruz (México)
 Santiago M. Sáenz (Colombia)
 Sergio Hernández (México)
 Sonia Ospina (Colombia)
 Tania Mulkay (Cuba)
 Thomas J. Smyth (EE.UU.)
 Victor Hugo Porras (Colombia)
 Victor 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

Centro de Investigaciones Agronómicas 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 1

Artículos científicos

Comportamiento vegetativo-generativo de tomate y chile dulce hidropónico en invernadero, sometidos a agotamiento hídrico 9-26
Freddy Soto-Bravo y Alejandro Betancourt-Flores

Adaptabilidad y estabilidad de mutantes de tomate en Los Santos, Panamá 27-38
Jorge Enrique Jaén-Villarreal, María Caridad González-Cepero, Ismael Camargo-Buitrago, Román Gordón-Mendoza, Ana Elida Sáez-Cigarruista y Francisco Alberto Centella-Pereira

Concentración de nitrógeno y clorofila en hojas de chile dulce hidropónico en invernadero bajo diferentes estrategias de manejo del riego y la nutrición 39-56
Freddy Soto-Bravo y María Alejandra Angulo-Guillén

Respuesta preliminar de la canavalia a la inoculación micorrízica en un ambiente edáfico de Jibacoa . . 57-66
Yusdel Ferrás-Negrín, Ramón Rivera-Espinosa, Vidalina Pérez-Salina y Ciro Sánchez-Esmori

Efecto de retardantes de crecimiento en la disminución del volcamiento de sorgo dulce forrajero . . 67-78
Deisy Lorena Flórez-Gómez, Karen Viviana Osorio-Guerrero, Gustavo Adolfo Rodríguez-Yzquierdo, Sair Jaramillo-Bonilla, Luis Ernesto Ortegón-Herrera, Evelin Gómez-Delgado y Guillermo Alberto Brochero-Aldana

Potencial forrajero de variedades de maíces costarricenses seleccionadas para grano 79-92
William Sánchez-Ledezma, Nevio Bonilla-Morales, Moisés Hernández-Chavez y Cinthia Granados-Marín

Incremento de la fijación biológica de nitrógeno y el crecimiento de la soya (*Glycine max*) mediante el uso de hongos solubilizadores de fósforo 93-109
Leida Castro-Barquero

Nota técnica

Cambios de algunas propiedades químicas en tres suelos salinos, tratados con cinco enmiendas cálcicas 111-123
Edgar Patricio Cedeño-Coll, Josué Otoniel Dilas-Jiménez y Manuel Danilo Carrillo-Zenteno

COMPORTAMIENTO VEGETATIVO-GENERATIVO DE TOMATE Y CHILE DULCE HIDROPÓNICO EN INVERNADERO, SOMETIDOS A AGOTAMIENTO HÍDRICO

Freddy Soto-Bravo^{1/*}, Alejandro Betancourt-Flores²

Palabras clave: *Capsicum annuum* L.; *Solanum lycopersicum* L.; fibra de coco; evapotranspiración del cultivo; riego deficitario; eficiencia de uso de agua.

Keywords: *Capsicum annuum* L.; *Solanum lycopersicum* L.; coir; crop evapotranspiration; deficit irrigation; water use efficiency.

Recibido: 27/06/23

Aceptado: 21/08/23

RESUMEN

Introducción. El uso de agua dulce en agricultura se encuentra limitado debido al deterioro de sus fuentes y su uso indiscriminado. El riego deficitario en agricultura protegida es una alternativa para mejorar la eficiencia en el uso del agua, a través de la reducción de la evapotranspiración del cultivo, sin comprometer su potencial productivo. **Objetivo.** Evaluar el efecto de 3 niveles de agotamiento del contenido de humedad volumétrica en un sustrato de fibra de coco, sobre el comportamiento vegetativo-generativo de los cultivos de tomate y chile dulce hidropónicos en invernadero. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. En ambos cultivos se aplicaron 3 tratamientos con 11, 22 y 32% de agotamiento hídrico en el sustrato, en un diseño experimental en bloques

completos al azar. Se evaluaron parámetros morfofisiológicos y productivos tales como área foliar (AF), número de hojas (NH), ancho (AH) y longitud de hoja (LH), longitud (LT) y diámetro del tallo (DT), número de nudos (NN), materia seca (MS), conductancia estomática (g_s), evapotranspiración del cultivo (ET_c), eficiencia de uso de agua (EUA), rendimiento de fruto comercial (Rc) de primera (F_1), segunda (F_2) y tercera (F_3), fruto de desecho (F_d) y rendimiento total (Rt). **Resultados.** En los tratamientos en tomate (TT) no hubo efecto sobre el NH, LH, LT y NN; mientras que con TT_{11} se obtuvieron valores superiores en AH, DT y MS. En chile dulce (TC), el TC_{11} obtuvo mayor NH, AH, LH, NN, DT y MS que los demás tratamientos; mientras que no hubo diferencias entre tratamientos en LT. En ambos cultivos, no hubo efecto sobre la ET_c y el Rt, sin embargo, con 11% de agotamiento se obtuvo mayor producción comercial de F_1 y F_2 por lo que consecuentemente hubo mayor EUA

* Autor para correspondencia. Correo electrónico: freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

1 Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Costa Rica.

 0000-0003-1959-9597.

2 Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Costa Rica.

 0000-0002-7757-5967.

con 37,32 kg.m⁻³ y 21,46 kg.m⁻³, respectivamente. Para ambos cultivos, la g_s fue diferente entre tratamientos. **Conclusión.** En ambos cultivos, los tratamientos con 11 y 22% de agotamiento hídrico evidenciaron un adecuado balance entre crecimiento vegetativo y productivo, que se reflejó en mayor producción de frutos comerciales de mejor calidad, menos desecho y mayor EUA.

ABSTRACT

Vegetative-generative of hydroponic tomato and sweet pepper produced under greenhouse, subjected to moisture content depletion. Introduction. The amount of usable water is currently limited due to the deterioration of its sources and indiscriminate use. An alternative to this problem is producing under green houses, where it is possible to obtain better water use efficiency (WUE) by reducing crop evapotranspiration (ET_c) without compromising its productive potential. **Objective.** To evaluate the effect of 3 levels of volumetric moisture content depletion in coir on the vegetative-generative behavior of hydroponic tomato and sweet pepper produced under greenhouse cultivation. **Materials and methods.** The study was conducted during August to December 2020 and January 2021, at Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Three treatments were applied: 11, 22 and 32% of water depletion in the substrate. Morphophysiological and reproductive parameters such as: the leaf area (AF), the

number of leaves (NH), width (AH) and length of the leaf (LH), the length (LT) and the diameter of the stem (DT), the number of nodes (NN), dry matter (DM), stomatal conductance (g_s), crop evapotranspiration (ET_c), water use efficiency (WUE), the total yield (Rt), the commercial (Rc) of first (F₁), second (F₂) and third (F₃) and waste fruits (Fd) were evaluated. **Results.** In the tomato treatments (TT) there was no effect on NH, LT, LH and NN; on the other hand, differences were reported in AH, DT and in MS, with treatment TT₁₁ obtaining the higher values. The sweet pepper (TC), the treatment TC₁₁ was statistically superior to the other treatments in number (NH), width (AH) and length (LH) of the leaf, in number of nodes (NN), production of fresh (MF) and dry matter (MS) and in diameter of the stem (DT), while there were no differences between treatments in stem length (LT). There were no differences in ET_c and Rt, for both crops, but there was a difference in the commercial yield once it was divided by quality of fruit, TT₁₁ presented the highest production of first and second fruit quality, while treatment TC₁₁ presented the highest production of first, second and third fruit quality. For both crops, there were significant differences between treatments in terms of stomatal conductance. TT₁₁ and TC₁₁ treatments obtained the highest value of EUA with 37.32 kg.m⁻³ and 21.46 kg.m⁻³, respectively. **Conclusion.** In both crops, treatments with 11 and 22% water depletion showed an adequate balance between vegetative and productive growth, which was reflected in greater production of better quality commercial fruits, less waste and greater WUE.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, el chile dulce (*Capsicum annuum*) es la sexta hortaliza más cultivada, con un área de cultivo aproximada de 500 ha, una producción de 8533 t, un consumo per cápita anual de 3,5 kg (SEPSA 2018) y un rendimiento de 8,2 a 43 t.ha⁻¹ en cultivo a campo abierto

(MAG 2007) y hasta 128 t.ha⁻¹ en invernadero (Soto-Bravo *et al.* 2020). En el 2014 se exportó aproximadamente 1,3 millones de kg a Estados Unidos (Mora *et al.* 2018).

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es el cultivo que más se siembra en Costa Rica, con el 90% a campo abierto y un 10% en ambiente protegido. En el 2015, su cultivo generó un ingreso

de \$37 millones, con un consumo per cápita de 17,3 kg (López 2017). En el 2018, el área cultivada se estimó en 1100 ha con una producción total de 57 238 t (INEC 2020).

Para la producción de ambos cultivos, se requiere de emplear una gran cantidad de recurso hídrico. Pero debido al agotamiento y contaminación de este recurso indispensable para la producción, junto al cambio climático y la creciente demanda de alimentos debido al acelerado crecimiento demográfico, se ha generado todo un reto que enfrentará la agricultura en el presente siglo, asegurar su sostenibilidad económica, social y ambiental. Paralelamente, se proyecta un incremento sustancial en la demanda de agua dulce para riego de cultivos en general, la cual representa el 1,5% del total del recurso hídrico disponible en el planeta, y donde el sector agrícola es el principal demandante con un 69% (FAO 2017).

De acuerdo con lo planteado anteriormente, es evidente la necesidad de mejorar la eficiencia de uso del agua (EUA) que representa la relación que existe entre la producción de biomasa (kg) y el consumo de agua (m^3) del cultivo. Para mejorar la EUA, una alternativa es la producción hidropónica en invernadero (Fernández y Camacho 2005, Fernández 2006). En dicho sistema de cultivo es posible mejorar la EUA al regular la evapotranspiración del cultivo (ET_c) a través de la reducción de sus componentes de evaporación y transpiración foliar. En sistemas hidropónicos, habitualmente el sustrato está cubierto de plástico, por lo que la evaporación de agua es despreciable, disminuyendo así la ET_c , ya que se limita únicamente al componente de transpiración.

Para disminuir la transpiración del cultivo se utilizan riegos deficitarios (RD), un método de irrigación en el cual se suministra un volumen de agua inferior al requerimiento (Chai *et al.* 2016) sin causar estrés fisiológico que pueda afectar el rendimiento del cultivo.

Para utilizar la técnica de RD con el fin de incrementar la EUA, es necesario determinar previamente los valores óptimos o umbrales de

agotamiento de humedad (UAH) en el sustrato (Nardella *et al.* 2012, Mattar *et al.* 2020). Los UAH se generan a partir de ensayos con tratamientos de RD decrecientes, con el objetivo de disminuir la ET_c manteniendo o incrementando el rendimiento del cultivo, lo que mejora así la EUA.

El manejo de la irrigación con UAH permite un adecuado balance entre el área foliar (fuente) y los frutos (sumidero), que en términos prácticos se conoce balance vegetativo-generativo en cultivos de fruto. Para esto es importante caracterizar los patrones morfofisiológicos y productivos del cultivo, para ser utilizados como indicadores del balance fuente/sumidero que permite obtener altos rendimientos. Dichos patrones dependen de la genética, del clima y del manejo del riego y la nutrición (Qian *et al.* 2012, Li *et al.* 2017), ya que influyen directamente en la distribución de asimilados y consecuentemente en el balance fuente/sumidero (Iqbal *et al.* 2015).

Diferentes estudios en distintos países han demostrado que el RD contribuye a mejorar la EUA en los cultivos. En Almería, España, en estudios realizados por Fernández y Camacho (2005) en cultivos bajo invernadero, obtuvieron una EUA de $37 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, mientras que, en México, Flores *et al.* (2007) reportaron valores de EUA de $35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Recientemente, en España, Valcárcel *et al.* (2019) demostraron que al reducir un 50% la ET_c durante el periodo reproductivo del cultivo de tomate, generó un ahorro del recurso hídrico de un 13% sin afectar la productividad, lo cual mejoró la EUA. En Países Bajos, se han obtenido EUA de hasta $66 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en invernaderos con el uso de calefacción e inyección de CO_2 (Pardossi *et al.* 2016).

Sin embargo, el manejo de la irrigación en cultivos hortícolas con RD basado en UAH bajo condiciones del trópico ha sido poco estudiado y la literatura es escasa, principalmente en cultivos hidropónicos bajo invernadero. Al respecto, Pacheco (2018) en un estudio en el cultivo de tomate en fibra de coco bajo invernadero, en Alajuela, Costa Rica, demostró que el control de riego a la demanda del cultivo con un 30% de agotamiento hídrico, mostró el mejor

comportamiento en el balance entre crecimiento vegetativo y generativo reflejado en un mayor rendimiento.

Por otra parte, para irrigar con precisión es determinante conocer las propiedades físico-hídricas del sustrato, y de esta forma determinar los UAH óptimos en sistemas de cultivo hidropónico según el cultivar, el manejo agronómico y las condiciones agroclimáticas. El objetivo final del manejo con RD con valores UAH, es reducir la ET_c y aumentar o mantener los rendimientos para mejorar la EUA. Dicho manejo consecuentemente se manifiesta en un adecuado equilibrio entre el crecimiento vegetativo y generativo reflejado en una balanceada arquitectura del dosel vegetal sin excesivo crecimiento vegetativo o un comportamiento muy generativo (Soto *et al.* 2020). El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de 3 niveles de agotamiento del contenido de humedad volumétrica en un sustrato de fibra de coco, sobre el comportamiento vegetativo-generativo de los cultivos de tomate y chile dulce hidropónicos en invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó entre agosto 2020 y enero de 2021 en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, ubicada en San José de Alajuela, Costa Rica ($10^{\circ} 01' N$ y $84^{\circ} 16' W$, 840 msnm), con valores promedios de precipitación anual, temperatura y humedad relativa de 1940 mm, $22^{\circ}C$ y 78%, respectivamente.

Se utilizó un invernadero multitúnel de hierro galvanizado, con cubierta de polietileno transparente ($200 \mu m$) y malla anti-insectos (50 mesh) en las paredes, formado por 4 módulos de 9,75 m de ancho y 50 m de largo, altura de 6 m al centro del túnel y 4 m a la canoa, orientado en dirección este-oeste. La ventilación fue pasiva en paredes laterales combinada con apertura automatizada de ventanas cenitales según la velocidad del viento e intensidad de lluvia.

Durante el experimento, dentro del invernadero se monitoreó la radiación solar global (Figura 1), (Piranómetro LI-COR Modelo LI-200SA), la temperatura (Figura 2) y la humedad del aire (Figura 3), (VAISALA Modelo HMP-35C); todos estos datos fueron almacenados en un "data logger" (Campbell Scientific. Mod. CR1000).

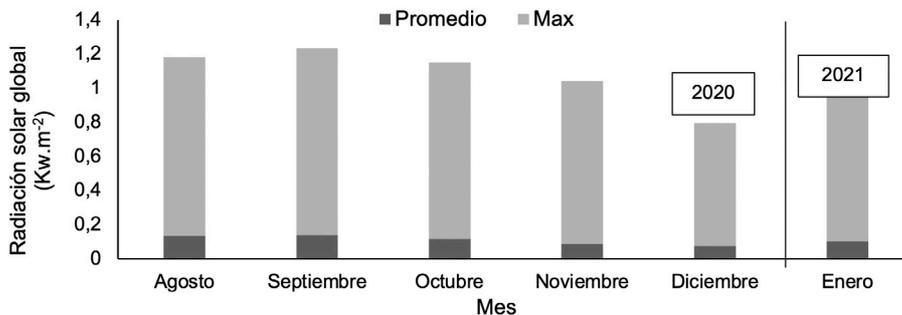


Figura 1. Valores promedio mensual de radiación solar global ($Kw.m^{-2}$) media y máxima en el interior del invernadero durante el desarrollo de la investigación.

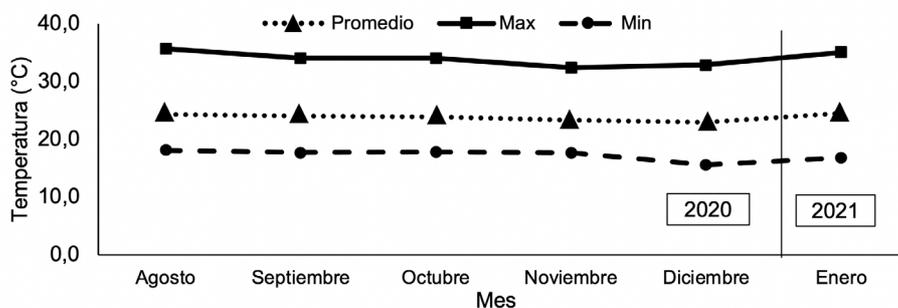


Figura 2. Valores promedio mensual de temperatura (°C) media, máxima y mínima en el interior del invernadero durante el desarrollo de la investigación.

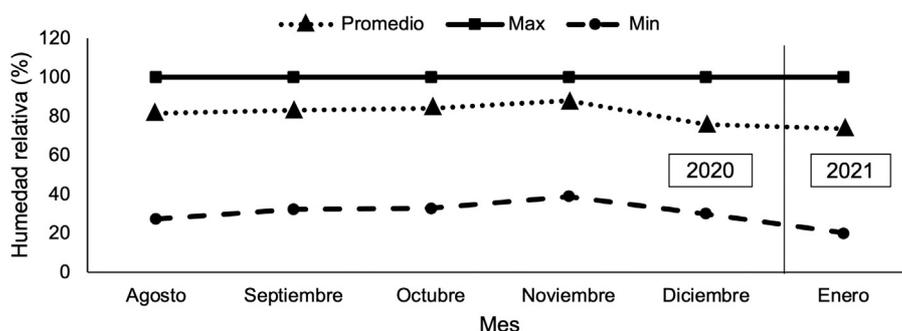


Figura 3. Valores promedio mensual de humedad relativa (%) media, máxima y mínima en el interior del invernadero durante el desarrollo de la investigación.

Se utilizó un sistema de cultivo hidropónico abierto sin recuperación de drenaje, con un sustrato de fibra de coco en tablas comprimidas (100 cm x 14 cm x 13 cm) con cobertura plástica

color blanco y un volumen aproximado 18,2 L. Las características físicas del sustrato (Tabla 1) se determinaron con la norma europea UNE-EN-13041 (AENOR 2007).

Tabla 1. Características físicas de la fibra de coco utilizada en el experimento como medio de cultivo.

Características físicas	Fibra de coco	% Óptimo*
Partículas > 4 mm (%)	54,25	--
Partículas entre 1 y 4 mm (%)	39,00	--
Partículas < 1 mm (%)	6,75	--
Densidad aparente (g.cm ⁻³)	0,096	--
Densidad real (g.cm ⁻³)	1,468	--
Porosidad total (%)	93,47	> 85%
Partículas sólidas (%)	6,53	< 15%

* Según Ansorena, 1994.

En el cultivo de chile dulce se utilizó el híbrido “Dulcítico” de crecimiento indeterminado, inicio de cosecha entre 75 y 90 días después de siembra, frutos de forma cónica color verde-rojizo, alto grado brix y un rendimiento de hasta 12,8 kg.m² (Soto-Bravo *et al.* 2020). En tomate se utilizó el híbrido “Gladiator”, el cual presenta crecimiento indeterminado vigoroso, inicio de cosecha de 70 a 100 DDT, con frutos de larga vida postcosecha, multilocular, de buen cierre pistilar y con peso medio de 180-240 g y resistencia a *Verticilium* y *Fusarium* razas 1 y 2.

En ambos cultivos, la siembra se realizó por trasplante el 20 de agosto de 2020, con plántulas de 35 días después de la siembra de edad en chile dulce y 28 días en tomate, con 5 a 6 hojas verdaderas, producidas en turba (peat moss) en bandejas plásticas de 98 celdas. Se sembraron 3 plantas por tabla de fibra de coco con distancias de 33,3 cm entre plantas y de 1,5 m entre hileras para una densidad de 2 plantas por metro cuadrado.

En prácticas culturales de chile dulce se realizaron deshijas por debajo de la primera bifurcación de la planta. El amarre en chile dulce se realizó con cuerdas de nylon que sujetaban 2 tallos principales desde la primera bifurcación que lo guiaban hasta un cable acerado ubicado a una

altura de 2,5 m. Todas las ramas emergentes se sujetaron con hilos de nylon a anillos colocados en las 2 cuerdas principales. En el cultivo de tomate se realizaron deshijas de los brotes laterales con el fin de formar la planta a un solo tallo, el cual fue conducido con cuerdas de nylon hasta los cables acerados del sistema de tutorado. Para el manejo de plagas y enfermedades en ambos cultivos se realizaron podas sanitarias de hojas senescentes, tallos y frutos dañados, y se realizó un monitoreo exploratorio semanal para determinar la presencia de plagas y la necesidad de aplicaciones fitosanitarias de productos biológicos, preventivos o erradicantes.

Para ambos cultivos, se aplicaron 3 tratamientos de agotamiento hídrico con una gradiente de disminución constante de la humedad volumétrica (θ) en la fibra de coco. Para ello se determinó la curva de retención de humedad volumétrica (θ) del sustrato (Figura 4) según la norma UNE-EN-13041 (AENOR 2007). Una vez definido el nivel de agotamiento hídrico, se estimó el volumen de riego para cada tratamiento con base en el porcentaje de agotamiento establecido, el volumen de sustrato (18,2 L) y un porcentaje de drenaje (15%) previamente establecido (Soto *et al.* 2020).

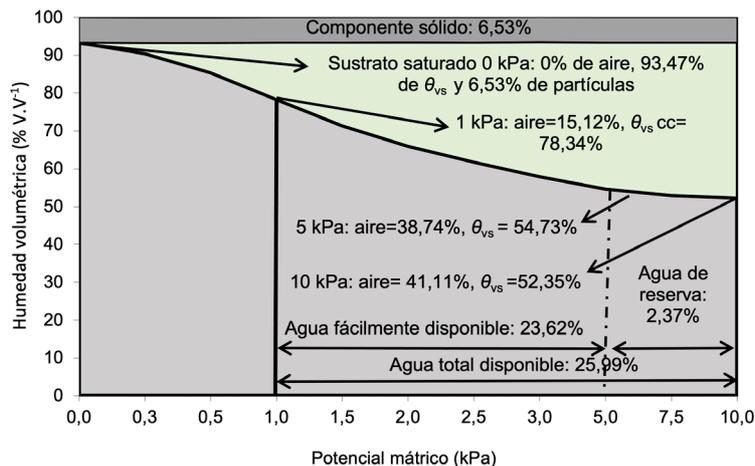


Figura 4. Contenido de partículas sólidas y curva de desorción de agua y capacidad de aireación a diferente potencial mátrico; y contenidos de agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en el sustrato de fibra de coco. Laboratorio de hortalizas, Estación Experimental Agrícola, Fabio Baudrit Moreno. Universidad de Costa Rica. Alajuela, Costa Rica. 2020.

En la Tabla 2 se resumen las características de los tratamientos de agotamiento hídrico

utilizados en los cultivos de tomate (TT) y chile dulce (TC).

Tabla 2. Tratamientos de agotamiento utilizados en los cultivos de tomate (TT) y chile dulce (TC) en fibra de coco, expresados en porcentaje de agotamiento, potencial mátrico, porcentaje de humedad volumétrica y litros de agua agotados del ATD en cada tabla de 18,2 L de sustrato.

Tratamiento	Porcentaje de agotamiento	Potencial mátrico (kPa)	Humedad volumétrica (%)	Litros de agotamiento
TT ₁₁ y TC ₁₁	11	1,70	69,90	1,54
TT ₂₂ y TC ₂₂	22	2,50	61,45	3,07
TT ₃₂ y TC ₃₂	32	7,50	53,01	4,61

El agua se suministró mediante un sistema de riego a la demanda del cultivo, que monitoreaba, en tiempo real, los volúmenes de agua aplicada (caudalímetro ARAD, Mod. SF 15) y de drenaje (pluviómetro Mod. ECRN-100, ECHO Rain) y el contenido de humedad volumétrica del sustrato con un sensor capacitivo (Decagon Devices) tipo TDR (Time domain reflectometry). Los datos recolectados se almacenaron en un “datalogger” (Decagon Devices ProCheck).

El área experimental de cada cultivo estaba compuesta por 12 hileras separadas a 1,5 m, con 17 sacos de fibra de coco/hilera. En cada saco se colocaron 3 plantas espaciadas a 0,33 m para una densidad de 2 plantas por m⁻² y un total de 612 plantas por cultivo. En ambos cultivos, se

utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar, donde cada tratamiento de agotamiento hídrico tenía 3 repeticiones para un total de 9 unidades experimentales/cultivo. Cada unidad experimental estaba formada por 15 sacos de fibra de coco distribuidas en 3 hileras de 5 sacos cada una. En cada saco se sembraron 3 plantas, para un total 45 plantas por unidad experimental.

La solución nutritiva utilizada correspondió a las concentraciones de nutrientes validadas para los cultivos de tomate y chile dulce por Duarte (2019) y Monge (2020), respectivamente (Tabla 3). La conductividad eléctrica estimada que incluyó los aportes del agua de riego (CE: 0,14 dS.m⁻¹) fue de 1,72 dS.m⁻¹.

Tabla 3. Concentración de nutrientes en la solución nutritiva utilizada para la producción de chile dulce y tomate en fibra de coco bajo invernadero.

Nutriente (mg.L ⁻¹)											CE	
Ca	K	Mg	N	S	P	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Mo	(dS.m ⁻¹)
160	203	45	140	65	35,4	1	0,3	0,8	0,3	0,5	0,1	1,58

Variables respuesta

Variables morfológicas: se evaluó quincenalmente el ancho (AH) y longitud de hoja (LH) y el diámetro basal del tallo (DT); y mensualmente el número de hojas (NH), la longitud de tallo (LT) y el número de nudos (NN). El área foliar (AF), la producción de materia seca (MS) se evaluaron 3 veces a lo largo del ciclo. Dichas variables se evaluaron en 3 plantas por unidad experimental para un total de 9 plantas por tratamiento.

- A. El AH se midió con cinta métrica en la parte media de la hoja.
- B. La LH se calculó desde la base hasta la punta del foliolo.
- C. El DT se midió con un caliper digital en la base del tallo a 2 cm por encima del nivel del sustrato.
- D. El NH por planta se cuantificó mediante un conteo manual por planta.
- E. La LT se midió con una cinta métrica, desde la base del tallo hasta el ápice del eje más largo.
- F. El número de nudos (NN) se determinó mediante conteo manual por planta de todos los nudos formados al momento de la evaluación.
- G. El AF se cuantificó al remover manualmente las hojas de cada planta y utilizar un medidor de área (LI-COR MODEL 3100).
- H. La producción de MS se evaluó en 3 muestreos de 3 etapas fenológicas: 1-fase vegetativa, 2- inicio de floración y cuaje de frutos y 3- al final de ciclo de producción. En cada evaluación se recolectaron 2 plantas por repetición para un total de 6 por tratamiento, se cuantificó la masa fresca, se colocaron en bolsas de papel y se secaron en estufa a 70°C hasta obtener peso constante.

Variables fisiológicas: se evaluó la conductancia estomática (g_s), la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la eficiencia de uso de agua (EUA). La g_s ($\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) se midió con un porómetro (Decagon, Mod. SC-1) cada 15 días en 3 plantas por repetición y un total de 9 plantas por tratamiento. La ET_c (L.m^{-2}) se determinó semanalmente mediante el método de balance de agua, a partir de los volúmenes (L.m^{-2}) de riego (R) y de drenaje (D) y la diferencia entre el contenido de humedad volumétrica del sustrato ($\Delta\theta = \theta_i - \theta_f$) al inicio (θ_i) y final (θ_f) de cada semana, según ecuación descrita por Soto (2018).

$$ET_c = R - D - (\theta_i - \theta_f) \quad \text{Ecuación 1}$$

Finalmente, la eficiencia de uso de agua (EUA) se determinó como el cociente entre rendimiento de fruto fresco (kg.m^{-2}) y la ET_c ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}$), tanto para el rendimiento comercial como para el rendimiento total (Salazar *et al.* 2014).

$$EUA = \frac{\text{rendimiento (kg.m}^{-2}\text{)}}{\text{volumen (m}^3.\text{m}^{-2}\text{)}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Variables productivas: durante 14 semanas del periodo de cosecha de ambos cultivos, se evaluó semanalmente el rendimiento de frutos en 12 plantas por repetición y 36 por tratamiento. Se evaluó el Rc con la clasificación de los frutos en 3 categorías de calidad según su peso, en primera (F_1), segunda (F_2) y tercera (F_3). En chile dulce se clasificaron los frutos en 3 calidades: F_1 con pesos entre 107 y 185 g sin deformaciones ni manchas, F_2 con pesos entre 81 y 132 g y F_3 con masas de 46-80 g con deformaciones y manchas leves según Monge (2020). En tomate se clasificaron los frutos en F_1 , F_2 y F_3 con diámetros aproximados a 8 cm, 6 cm y 4 cm, respectivamente.

Finalmente, para ambos cultivos se contabilizaron los frutos de desecho (F_d) con daños físicos y mecánicos, para estimar el rendimiento total de frutos (Rt) como la suma de Rc más desecho.

Análisis estadístico. El análisis de los datos se realizó mediante el programa estadístico R y con uso de las librerías: agricolae,

tidyverse, readxl, stringr, DT, car, carData y ggplot2 (Möhring *et al.* 2021). En primera instancia, se procedió a realizar un análisis de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) y homocedasticidad (Bartlett) para las variables teóricamente normales. Cuando se cumplían los supuestos anteriores, se realizó un análisis de varianza y si se detectaron efectos significativos, se realizó una comparación múltiple de medias ($p < 0,05$) según Di Rienzo *et al.* (2002) para contrastar las variaciones entre los tratamientos. Seguidamente se realizaron contrastes todos contra todos al ser solo 3 tratamientos. Cabe resaltar que los mismos no son ortogonales por lo tanto se utilizó la corrección de Bonferroni como α/k , donde k fue el número de comparaciones a realizar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento morfológico. En tomate, los tratamientos de agotamiento hídrico afectaron ($p < 0,05$) el AH, el DT, el AF y la producción de MS, mientras que no hubo efectos estadísticamente significativos ($p < 0,05$) sobre LH, NH, LT y NN (Tabla 4).

El promedio de AH en el cultivo de tomate mostró una tendencia a incrementar conforme se redujo el estrés hídrico, donde el TT_{11} fue similar a TT_{22} y superior a TT_{32} , sin diferencias entre TT_{22} y TT_{32} (Tabla 4). El patrón en el comportamiento del AH, aun cuando no hubo diferencias entre tratamientos en la LH, fue consecuente con un incremento en el AF conforme descendió el estrés hídrico. El TT_{11} obtuvo un 12,5% y un 26% más de área foliar con respecto a con TT_{22} y TT_{32} (Tabla 4).

Tabla 4. Valores promedio de ancho de hoja, área foliar, materia seca, diámetro del tallo, número de hojas, longitud de la hoja, número de nudos y longitud del tallo en plantas de tomate sometidas a 3 tratamientos de agotamiento hídrico de 11% (TT_{11}), 22% (TT_{22}) y 32% (TT_{32}) del contenido de humedad volumétrica del sustrato.

Variable respuesta	Tomate		
	TT_{11}	TT_{22}	TT_{32}
Ancho de hoja (cm)	44,28 a	42,11 ab	40,25 bc
Área foliar (cm ²)	11212 a	9800 b	8219 c
Materia seca (g)	222 a	185 b	157 bc
Diámetro de tallo (mm)	41,95 a	38,79 bc	37,46 c
Número de hojas	79 a	79 a	79 a
Longitud de hoja (cm)	49,66 a	46,05 a	44,71 a
Número de nudos	78 a	78 a	78 a
Longitud de tallo (LT)	576,6 a	577,2 a	575,6 a

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Consecuentemente, a menor agotamiento hídrico y mayor AF en T_{11} , la producción de MS fue superior, probablemente debido a una mayor capacidad fotosintética soportado por una mayor fuente de AF. En MS, el TT_{11} produjo un 16% más de MS respecto a TT_{22} y 30% más con respecto a TT_{32} ; donde estos 2 últimos no mostraron

diferencias entre sí (Tabla 4). Finalmente, el DT de plantas de tomate, fue menor conforme incrementó el agotamiento hídrico, donde el TT_{11} fue en promedio un 7,5% y un 10,7% superior a TT_{22} y TT_{32} , respectivamente, sin diferencias entre estos últimos (Tabla 4).

En el cultivo de chile dulce, todas las variables morfológicas fueron estadísticamente diferentes entre tratamientos. Las variables relacionadas con el tamaño de la fuente de la planta, tales como el AH, LH y NH, fueron estadísticamente superiores conforme disminuyó el estrés hídrico. Consecuentemente, el AF y la

producción de MS fue superior en el TC₁₁ respecto a TC₂₂ y TC₃₂. De forma similar al cultivo del tomate; el AH fue la variable que mantuvo un patrón consecuente con el comportamiento del AF, con una tendencia al incremento estadísticamente significativa, conforme se redujo el nivel de estrés hídrico (Tabla 5).

Tabla 5. Valores promedio de ancho de hoja, área foliar, materia seca producida, diámetro del tallo, número de hojas, longitud de la hoja, número de nudos y longitud del tallo en plantas de chile dulce sometidas a 3 tratamientos de agotamiento hídrico de 11% (TC₁₁), 22% (TC₂₂) y 32% (TC₃₂) del contenido de humedad volumétrica del sustrato.

Variable respuesta	Chile dulce		
	TC ₁₁	TC ₂₂	TC ₃₂
Ancho de hoja (cm)	11,44 a	10,39 b	9,64 c
Longitud de hoja (cm)	21,39 a	20,84 b	20,13 b
Número de hojas	1017 a	844 b	765 bc
Área foliar (cm ²)	11212 a	9800 b	8219 c
Materia seca (g)	222 a	185 b	157 bc
Número de nudos	907 a	794 b	725 bc
Longitud de tallo (cm)	310,3 a	286,1 b	276,2 b
Diámetro de tallo (mm)	34,80 a	32,29 b	29,58 b

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Similar al cultivo de tomate, el DT de plantas de chile dulce fue menor conforme disminuyó el agotamiento hídrico (Figura 3C), donde TC₁₁ fue superior un 7% que TC₂₂ y 15% más que TC₃₂, estos 2 últimos fueron iguales entre ellos (Tabla 5).

En ambos cultivos, las plantas con el menor agotamiento hídrico (TT₁₁ y TC₁₁) produjeron mayor biomasa aérea (MS) que los tratamientos con mayor agotamiento hídrico. Esto estuvo relacionado principalmente con el AH que repercutió positivamente en mayor tamaño de fuente reflejado en una superior AF. En respuesta a un mayor nivel de agotamiento hídrico, los tratamientos con 22 y 32% redujeron el AH, LH y el NH, variables que determinan el tamaño del AF foliar, la cual está directamente relacionada con la transpiración del cultivo y con la producción de biomasa (MS).

El anterior comportamiento ha sido evidenciado por estudios realizados en chile dulce por González *et al.* (2007) y Quesada (2015). El primero demostró que el déficit hídrico durante la etapa productiva redujo el AF y consecuentemente la producción de biomasa, mientras que Quesada (2015) en el cultivo bajo invernadero observó una tendencia a disminuir el AF conforme se aumentaba el agotamiento, lo que consecuentemente redujo la producción de MS.

En tomate, se ha demostrado que el estrés hídrico inhibe el crecimiento y limita la expansión foliar (García *et al.* 2004), debido a que el proceso de expansión celular es mucho más sensible a dicho estrés que el proceso de división celular (Florido y Bao 2014). Además, el déficit de agua reduce el crecimiento de la raíz y consecuentemente el crecimiento de la parte aérea (Potters *et al.* 2007), lo que afectó dicha relación.

Los resultados obtenidos en este estudio demostraron que el estrés hídrico en ambos cultivos inhibió el crecimiento vegetativo limitado por la expansión foliar (AH, LH, AF), lo que afecta consecuentemente el balance vegetativo-generativo del cultivo. Estas modificaciones en la arquitectura del dosel vegetal responden principalmente al manejo del riego y a su efecto sobre la relación entre los componentes vegetativo aéreo y el sistema radical (Potters *et al.* 2007). Esto debido a que las plantas requieren un sistema radicular suficientemente desarrollado para abastecer la demanda hídrica de los órganos aéreos (Peleg *et al.* 2011). Las raíces crecen adecuadamente cuando la humedad es óptima y uniforme en todo el volumen del sustrato, lo que favorece un buen volumen radicular.

Un manejo del riego con alto nivel de agotamiento hídrico implica riegos poco frecuentes que afectan una distribución uniforme de la humedad en el perfil del sustrato, lo que consecuentemente limita el crecimiento radical y afecta la relación entre el dosel vegetal y sistema radicular de la planta (Potters *et al.* 2007), como respuesta adaptativa a una menor capacidad radicular para abastecer la demanda transpiratoria. Al respecto, Bar-Tal *et al.* (1995) demostraron que en chile hidropónico bajo invernadero al reducir el volumen del contenedor se limitó el crecimiento radical y consecuentemente el AF.

En el presente estudio, las plantas de ambos cultivos modificaron el AF al variar la forma de la hoja, en términos de AH en tomate y el AH, LH y NH en chile dulce, en respuesta al nivel de estrés hídrico, como una forma de evitar la pérdida excesiva de agua, ya que el AF está estrechamente relacionada con la tasa de transpiración del cultivo (Taiz y Zeiger 2003, Qiu *et al.* 2013, Di Benedetto y Tognetti 2016).

El DT es una variable que está directamente relacionada con el manejo del riego de los cultivos, ya que su contracción y expansión es una respuesta morfofisiológica al estado hídrico de las plantas (Kumar *et al.* 2017). En

el presente estudio, el DT de las plantas de chile dulce y tomate con mayor agotamiento hídrico de 22 y 32%, fueron en promedio un 10% más delgados que el tratamiento de 11%. Al respecto, Kumar *et al.* (2017) demostraron que el DT en plantas de tomate disminuyó conforme se redujo el aporte hídrico, mientras que Taiz y Zeiger (2003) demostraron que la variación en el diámetro basal del tallo es un indicador de estrés hídrico en el cultivo de tomate.

Ante situaciones de estrés hídrico la planta modifica el DT, que está relacionado con el estado hídrico del cultivo. Además, modifica el NH, el AH y la LH que determinan su AF, la cual está directamente relacionada con la transpiración del cultivo (García *et al.* 2004, Dobermann 2007). Al respecto, Pacheco (2018) no obtuvo efecto ante 3 niveles de agotamiento hídrico (10, 20 y 30%) sobre el NH y LT en plantas de tomate hidropónico en invernadero, probablemente debido a que el nivel de estrés hídrico no fue suficiente para afectar los procesos fisiológicos de la planta.

En el cultivo de chile dulce en invernadero, estudios realizados por Gallardo *et al.* (2004), González *et al.* (2007) y Jara (2018), encontraron que el DT se redujo conforme aumenta el nivel de estrés hídrico, lo cual evidenció así que dicho parámetro es un indicador del estrés hídrico.

Conductancia estomática (g_s). Las plantas regulan la g_s mediante señales que involucran algunas fitohormonas, principalmente ABA, como mecanismo para mitigar el estrés hídrico y evitar la deshidratación.

En la presente investigación, en ambos cultivos, los tratamientos con 11% de agotamiento hídrico, obtuvieron los mayores valores de g_s , con una tendencia decreciente conforme aumentó el porcentaje de agotamiento hídrico (Figura 5). Asociado a la reducción del AF, el déficit hídrico promovió una reducción del potencial hídrico de las hojas, lo cual actúa como una señal hidráulica-hormonal que induce al cierre parcial de estomas (Khapte *et al.* 2019),

manifestándose en una reducción de la g_s , tal como como se evidenció en el presente estudio.

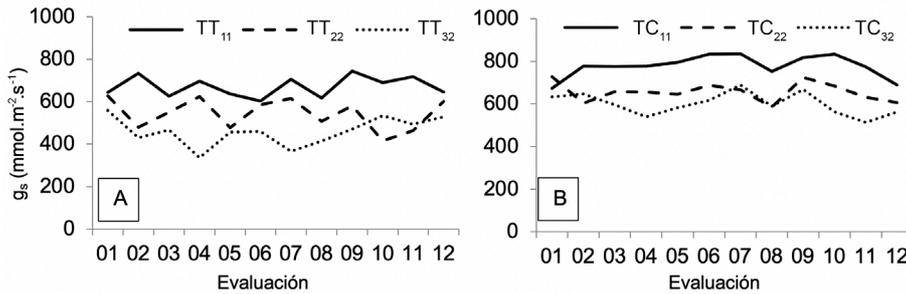


Figura 5. Valores promedio de conductancia estomática ($\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) en hoja, en tratamientos de 3 porcentajes de agotamiento hídrico de 11, 22 y 32% del contenido de humedad volumétrica del sustrato, en plantas de (A) tomate (TT_{11} , TT_{22} , TT_{32}) y (B) de chile dulce (TC_{11} , TC_{22} , TC_{32}).

En el cultivo de tomate, a lo largo del periodo, la g_s fluctuó entre los 400 y 800 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Figura 4A), con diferencias significativas entre todos los tratamientos. El tratamiento TT_{11} obtuvo los mayores valores de g_s , con una tendencia creciente conforme disminuyó el porcentaje de agotamiento hídrico, con valores promedios durante el ciclo de cultivo de 677,54 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, 543,74 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ y 463,67 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, para los tratamientos TT_{11} , TT_{22} y TT_{32} , respectivamente.

En el caso del cultivo de chile dulce la g_s fluctuó entre 400 a 900 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Figura 4B), con diferencias significativas entre todos los tratamientos. El TC_{11} presentó los mayores valores de g_s durante el ciclo de cultivo con 778,24 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, seguido de TC_{22} con 681,59 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ y finalmente TC_{32} con 611,35 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. En ambos casos las plantas sometidas al estrés hídrico regularon la apertura estomática principalmente debido a la acumulación de ABA, esta acumulación de fitohormonas ha sido ampliamente estudiada y está estrechamente ligada a una reducción en la g_s , la cual se puede utilizar como una medida indirecta, ya que es el mecanismo principal para mitigar la pérdida

de agua por evapotranspiración. En el cultivo de tomate valores de g_s de 800 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ son un indicativo de que no se está dando una adecuada circulación del agua y fotosíntesis (Davies *et al.* 2000, Campos *et al.* 2009, Giuliani *et al.* 2018).

La regulación en la pérdida de agua mediante el cierre parcial de estomas genera reducciones desde 33 hasta 44% en la g_s en cultivos de tomate bajo déficit hídrico (Savic *et al.* 2009). En este estudio, en tomate se determinó una disminución en la g_s de hasta un 31% en el tratamiento TT_{32} respecto a TT_{11} . En otro estudio realizado por Nemeskéri *et al.* (2019), al aplicar riego deficitario obtuvieron valores de g_s (893,4 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) inferiores a un cultivo de tomate bien irrigado (950 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

En el cultivo de chile dulce, Ismail *et al.* (2002) encontraron una reducción de hasta 160 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en las plantas con mayor nivel de estrés hídrico. Lo cual es coincidente con los resultados obtenidos en la presente investigación, ya que la g_s se redujo de TC_{32} a TC_{11} en 146 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en los picos más altos y de 128 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en los más bajos, debido probablemente a elevadas concentraciones de ABA. En otro estudio, Aladenola y Madramootoo (2014),

obtuvieron valores de g_s similares a los obtenidos por Ismail *et al.* (2002), con reducciones desde 15% hasta 25% en los tratamientos más agotados.

Evapotranspiración de los cultivos (ET_c) de tomate y chile dulce. En ambos cultivos, la

ET_c promedio total ($L.m^{-2}$) no fue estadísticamente diferente ($p < 0,05$) entre tratamientos (Figura 6). No obstante, se evidenció una tendencia a incrementar la ET_c conforme acrecentaba el agotamiento hídrico.

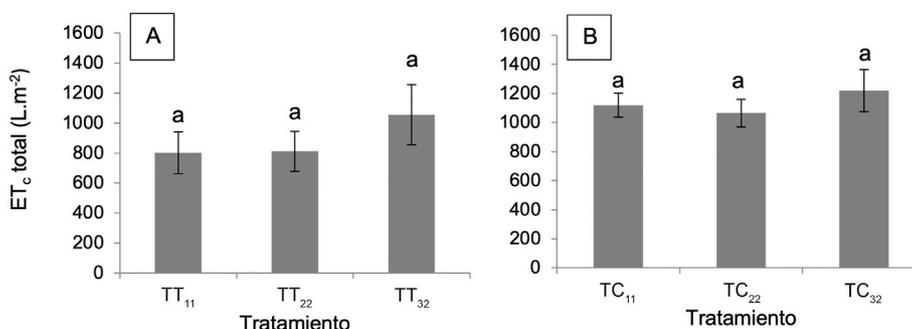


Figura 6. Valores promedio de evapotranspiración del cultivo (ET_c) de (A) tomate (TT) y (B) chile dulce (TC) sometidos a 3 tratamientos de agotamiento hídrico de 11% (TT₁₁, TC₁₁), 22% (TT₂₂, TC₂₂) y 32% (TT₃₂, TC₃₂) del contenido de humedad volumétrica en el sustrato.

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Esto probablemente fue debido a que, según el tratamiento hídrico, varió el manejo del riego. Al final del día el volumen total de riego aportado ($L.m^{-2}$) fue similar entre tratamientos, aunque con volúmenes y frecuencias de riego diferentes, ya que conforme incrementó el nivel de agotamiento, aumentó el volumen (cuánto) y la frecuencia de riegos (cuándo). Al respecto, Rodríguez *et al.* (2014) demostraron que el manejo del riego influye directamente en el comportamiento morfológico y productivo del cultivo.

Comportamiento productivo

En ambos cultivos, no hubo efecto ($p > 0,05$) de los tratamientos sobre el rendimiento de frutos total y de desecho. Sin embargo, hubo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) sobre el rendimiento comercial, debido

a las diferencias en la partición de frutos según calidad (Tabla 6).

En el cultivo de tomate se encontraron diferencias en cuanto a la producción de frutos de I y II calidad, no así en las calidades III y desecho. El tratamiento TT₁₁ obtuvo el mayor rendimiento en calidad I, con 320 g más por planta que los tratamientos TT₂₂ y TT₃₂, estos últimos fueron iguales entre sí (Tabla 6). Dicha diferencia equivale a 6,4 t.ha⁻¹ más de producción de frutos de I calidad.

En producción de II calidad, el TT₁₁ obtuvo 930 g más por planta con respecto a TT₃₂ (Tabla 6), no así con respecto a TT₂₂, pues estos fueron iguales. En t.ha⁻¹ dicha diferencia fue equivalente a 18,6 t.ha⁻¹ más de frutos de II calidad. Los tratamientos TT₂₂ y TT₃₂ fueron estadísticamente iguales. En rendimiento comercial

(I, II y III), el TT_{11} obtuvo 1270 g más que TT_{32} , equivalente a una diferencia de 25,4 t.ha⁻¹.

En el cultivo de chile, el rendimiento total de frutos no fue estadísticamente diferente entre tratamientos. En rendimiento de frutos de I, II y III calidad, el TC_{11} fue estadísticamente superior

a TC_{32} y similar a TC_{22} . Los tratamientos TC_{22} y TC_{32} fueron estadísticamente iguales en todas las calidades de fruta. El TC_{11} obtuvo un rendimiento de frutos de 330 g de I, 400 g de II y 110 g de III por planta, superior a TC_{32} (Tabla 5), equivalente a un aumento de 16,8 t.ha⁻¹.

Tabla 6. Rendimiento total, comercial y por calidad de frutos por planta, en los cultivos de tomate (TT) y (B) chile dulce (TC) sometidos a 3 tratamientos de agotamiento hídrico de 11% (TT_{11} , TC_{11}), 22% (TT_{22} , TC_{22}) y 32% (TT_{32} , TC_{32}) del contenido de humedad volumétrica en el sustrato.

Componente rendimiento	Tomate			Chile dulce		
	TT_{11}	TT_{22}	TT_{32}	TC_{11}	TC_{22}	TC_{32}
Primera (I) (kg.pl ⁻¹)	1,24 a	0,92 b	0,92 b	1,63 a	1,51 ab	1,30 bc
Segunda (II) (kg.pl ⁻¹)	4,83 a	4,70 ab	3,90 bc	1,71 a	1,53 ab	1,31 bc
Tercera (III) (kg.pl ⁻¹)	1,81 a	1,80 a	1,79 a	1,60 a	1,54 ab	1,49 bc
Desecho (kg.pl ⁻¹)	0,40 a	0,59 a	0,89 a	0,70 a	0,88 a	0,99 a
Comercial (kg.pl ⁻¹)	7,88 a	7,42 ab	6,61 bc	4,94 a	4,58 ab	4,10 c
Total (kg.pl ⁻¹)	8,28 a	8,01 a	7,50 a	5,64 a	5,46 a	5,09 a

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Eficiencia de uso de agua (EUA)

En la presente investigación, tanto en tomate como en chile dulce, los tratamientos con 11 y 22% de agotamiento hídrico obtuvieron una EUA similar, y superior a los tratamientos con un agotamiento de 32%. En el cultivo de tomate, el TT_{11} obtuvo un rendimiento 47,4% superior a TT_{32} ; mientras que, en chile dulce, el TC_{11} obtuvo un rendimiento 57,5% superior a TC_{32} (Figura 7).

Considerando que la EUA (kg.m⁻³) es la relación entre el rendimiento de frutos (kg.m⁻²) y la ET_c del cultivo (m³.m⁻²), esta mayor EUA fue producto de un mayor rendimiento comercial en las plantas con 11 y 22% de agotamiento respecto a 32%, ya que la ET_c no difirió entre tratamientos. A mayor agotamiento hídrico, la planta tiene que ejercer mayor succión (kPa) para extraer el agua del sustrato, lo que implica un mayor gasto energético a expensas del rendimiento.

Consecuentemente, se generan cambios morfológicos para adaptarse a la condición de agotamiento hídrico, que según su intensidad puede manifestarse en aumentos o disminuciones de la productividad (Rodríguez *et al.* 2014, Soto 2018).

Lo anterior se debe a que, en ambos cultivos, un mayor nivel de agotamiento hídrico tuvo como consecuencia un desbalance entre los componentes vegetativos y reproductivos (fuente/sumidero), lo que afectó el suministro de foto-asimilados para el buen llenado de frutos. Las plantas como respuesta a la condición de estrés adoptaron un comportamiento más reproductivo con el fin de preservar la especie (Soto 2018). Además, como respuesta al estrés hídrico, la planta aborta órganos reproductivos tales como flores y frutos recién cuajados, sosteniendo solo los que puede llenar (Ferrara *et al.* 2011, Tanaskovik *et al.* 2017). Por el contrario, los tratamientos con menor agotamiento hídrico

de 11 y 22%, evidenciaron un mejor balance entre crecimiento vegetativo y generativo, que

se tradujo en un mayor rendimiento comercial de frutos de primera y segunda calidad.

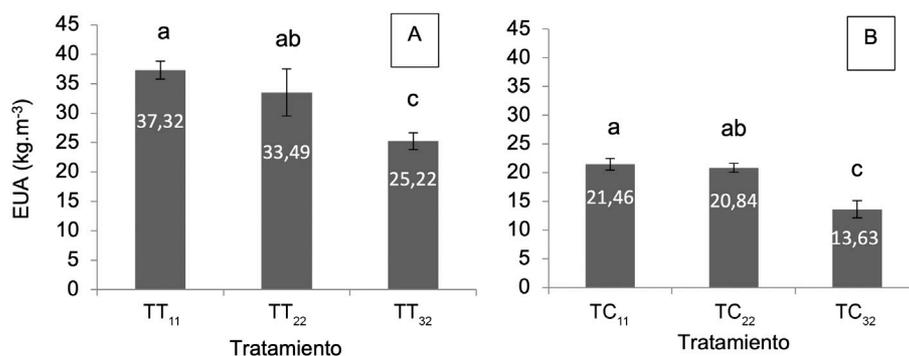


Figura 7. Eficiencia en el uso de agua con base en rendimiento comercial de los cultivos de tomate (A) y de chile dulce (B), sometidos a 3 tratamientos de agotamiento hídrico de 11% (T_{11}), 22% (T_{22}) y 32% (T_{32}) del contenido de humedad volumétrica del sustrato.

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

El contenido óptimo de humedad en el sustrato conocido como umbral de riego (UR), depende principalmente del clima, del cultivo y del tipo de sustrato, entre otros factores. La aplicación de estrategias de riego deficitario puede tener diferentes efectos sobre el cultivo. Por tanto, una apropiada estrategia de riego se refiere a la utilización de un valor de UR que permita incrementar la EUA (Kirda *et al.* 2004), así como reducir la ET_c y/o incrementar el rendimiento del cultivo (Ćosić *et al.* 2015). En la presente investigación, los tratamientos TT_{11} y TC_{11} permitieron mejorar la EUA en rendimiento comercial, ya que se obtuvo un incremento del rendimiento en frutos de I y II calidad, aun cuando la ET_c fue similar entre tratamientos. Coincidentemente, en un estudio realizado en Jordania en tomate, con el uso de riegos deficitarios se obtuvo un aumento de la EUA al reducir la ET_c , a pesar de una reducción en el rendimiento comercial (Mahadeen *et al.* 2011). De forma similar en España, la

EUA incrementó, ya que se obtuvo un apreciable ahorro de 28% en agua con una reducción de 16,4% en el rendimiento comercial (Lahoz *et al.* 2016). En otros estudios, Khapte *et al.* (2019) reportaron que, a pesar de las reducciones en rendimiento debido a un descenso en el número y tamaño de frutos, el déficit hídrico mejoró la calidad de frutos en firmeza, contenidos de licopeno, sólidos solubles, ácido ascórbico y la acidez, como consecuencia de una redistribución de los foto-asimilados en menos sumideros.

Los efectos de una estrategia de riego deficitario también varían según la etapa fenológica del cultivo. En estudios realizados con RD en el cultivo de tomate durante la etapa de floración, se reportaron valores de EUA de $19,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Nangare *et al.* 2016) y de $17,45 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Patanè *et al.* 2011) producto de un incremento en el rendimiento sin reducciones en el consumo de agua. Dichas EUA fueron apreciablemente inferiores a los valores obtenidos con 11 y 22%

de agotamiento hídrico en el cultivo de tomate ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) del presente estudio.

En Jordania se desarrolló un ensayo con agotamientos similares a los de esta investigación, en donde se utilizaron diferentes niveles de RD clásico durante todo el periodo productivo del cultivo de tomate. Los autores reportaron una reducción en el rendimiento, sin embargo, aumentó la EUA con $17\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y $23,9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en 2 diferentes cultivares (Mahadeen *et al.* 2011). Dichos valores de eficiencia fueron similares a los obtenidos en esta investigación, donde se obtuvo una máxima EUA de $37,32\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en el tratamiento TT_{11} , luego una de $33,49\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en el TT_{22} y finalmente una de $25,22\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en el TT_{32} .

En el cultivo de chile dulce, de forma similar al tomate, el rendimiento disminuyó conforme aumentó el nivel de agotamiento producto de modificaciones morfofisiológicas y reproductivas, que afectaron la EUA. Al respecto, Karam *et al.* (2009) reportó que reducciones del requerimiento hídrico de 80, 60 y 40% redujo el rendimiento en 11,3; 12,2 y 38,2%, respectivamente. Finalmente, Aladenola y Madramootoo (2014), en un estudio con tratamientos de RD clásicos durante la etapa productiva, demostraron que conforme aumentaba el nivel de agotamiento disminuía el rendimiento comercial. Así los valores de EUA fluctuaron desde $2,9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ hasta $31,6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

CONCLUSIONES

En chile y tomate el nivel de agotamiento hídrico no afectó el rendimiento total de frutos.

Los tratamientos con 11 y 22% de agotamiento hídrico incrementaron el rendimiento comercial debido a una mayor producción de frutos de primera y segunda calidad y menos desecho, lo cual se reflejó en una mayor eficiencia de uso de agua.

El incremento del rendimiento comercial está relacionado con un mejor balance entre crecimiento vegetativo y reproductivo debido a una mejor distribución de asimilados para el llenado de frutos de mayor calidad.

LITERATURA CITADA

- AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). 2007. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de las propiedades físicas. Densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total. Madrid, España. 19 p.
- Aladenola, O; Madramootoo, C. 2014. Response of greenhouse-grown bell pepper (*Capsicum annuum* L.) to variable irrigation. Canadian Journal of Plant Science 94(2):303-310.
- Ansorena, MJ. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Madrid, España, Mundi Prensa. 167 p.
- Bar-Tal, A; Feigin, A; Sheinfeld, S; Rosenberg, R; Sternbaum, B; Rylski, I; Pressman, E. 1995. Root restriction and N-NO₃ solution concentration effects on nutrient uptake, transpiration and dry matter production of tomato. Scientia Horticulturae 63:195-208.
- Campos, H; Trejo, C; Peña-Valdivia, CB; Ramírez-Ayala, C; Sánchez-García, P. 2009. Effect of partial rootzone drying on growth, gas exchange, and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Scientia Horticulturae 120(4):493-499.
- Chai, Q; Gan, Y; Zhao, C; Xu, HL; Waskom, RM; Niu, Y; Siddique, KHM. 2016. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. Agronomy for Sustainable Development 36(1):3.
- Ćosić, M; Djurović, N; Todorović, M; Maletić, R; Zečević, B; Stričević, R. 2015. Effect of irrigation regime and application of kaolin on yield, quality and water use efficiency of sweet pepper. Agricultural Water Management 159:139-147.
- Davies, WJ; Bacon, MA; Stuart Thompson, D; Sobeih, W; González, RL. 2000. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plants' chemical signalling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture. Journal of Experimental Botany 51(350):1617-1626.
- Di Benedetto, A; Tognetti, J. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. Ria 42(1900):258-282.
- Di Rienzo, JA; Guzmán AW; Casanoves F. 2002. A Multiple Comparisons Method based on the Distribution of the Root Node Distance of a Binary Tree. Journal of Agricultural, Biological and Environment Statistics 7(2):1-14.
- Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency. Measurement and management. In Kraus, A; Isherwood, K; Heffer, P (eds.). Fertilizers Best Management Practices. Proceeding of International fertilizer Industry Association. Brussels, Belgium. p. 1-22.
- Duarte, J. 2019. Eficiencia de uso de agua y nutrientes en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*)

- hidropónico bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica. Tesis Lic. Alajuela, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 83 p.
- FAO (Food agricultural Organization). 2017. Water for Sustainable Food and Agriculture Water for Sustainable Food and Agriculture. *In* A report produced for the G20 Presidency of Germany. www.fao.org/publications
- Ferrara, A; Lovelli, S; di Tommaso, T; Perniola, M. 2011. Flowering, Growth and Fruit Setting in Greenhouse Bell Pepper under Water Stress. *Journal of Agronomy* 10(1):12-19.
- Fernández, M; Camacho, JF. 2005. Eficiencia en el uso del agua. *Revista Viveros* 86-89.
- Fernández, M. 2006. Eficiencia en el uso del agua en distintos sistemas hortícolas. *Tecno Ambiente: Revista Profesional de Tecnología y Equipamiento de Ingeniería Ambiental* 131-134.
- Flores, J; Ojeda, W; López, I; Rojano, I. 2007. Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana* 25(2):127-134.
- Florido, M; Bao, L. 2014. Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales* 35(3):70-88.
- Gallardo, M; Thompson, RB; Valdez, LC; Fernández, MD. 2004. Response of stem diameter variations to water stress in greenhouse-grown vegetable crops. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 81(3):483-495.
- García, D; Petzall, C; Castrillo, M. 2004. Respuestas al déficit hídrico en las variedades de tomate Río Grande y Pera Quibor. *Agronomía Tropical* 54(4):411-433.
- Giuliani, MM; Carucci, F; Nardella, E; Francavilla, M; Ricciardi, L; Lotti, C; Gatta, G. 2018. Combined effects of deficit irrigation and strobilurin application on gas exchange, yield and water use efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae* 233:149-158.
- González, V; Orgaz, F; Fereres, E. 2007. Responses of pepper to deficit irrigation for paprika production. *Scientia Horticulturae* 114(2):77-82.
- Iqbal, S; Tak, HI; Inam, A; Inam, A; Sahay, S; Chalkoo, S. 2015. Comparative Effect of Wastewater and Groundwater Irrigation Along with Nitrogenous Fertilizer on Growth, Photosynthesis and Productivity of Chilli (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Plant Nutrition* 38(7):1006-1021.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). 2020. Anuario estadístico 2016-2018. San José, Costa Rica. 402 p.
- Ismail, MR; Davies, WJ; Awad, MH. 2002. Leaf growth and stomatal sensitivity to ABA in droughted pepper plants. *Scientia Horticulturae* 96(1-4):313-327.
- Jara, F. 2018. Efecto del abastecimiento hídrico en ambiente protegido sobre el rendimiento y variable morfológicas de chile (*Capsicum annuum*) y pepino (*Cucumis sativus* L.) en Heredia, Costa Rica. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional. 162 p.
- Karam, F; Masaad, R; Bachour, R; Rhayem, C; Roupshael, Y. 2009. Water and Radiation Use Efficiencies in Drip-irrigated Pepper (*Capsicum annuum* L.): Response to Full and Deficit Irrigation Regimes. *Europ. J. Hort. Sci.* 74(2):79-85.
- Khapte, PS; Kumar, P; Burman, U; Kumar, P. 2019. Deficit irrigation in tomato: Agronomical and physio-biochemical implications. *Scientia Horticulturae* 248:256-264.
- Kirda, C; Cetin, M; Dasgan, Y; Topcu, S; Kaman, H; Ekici, B; Derici, MR; Ozguven, AI. 2004. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 69(3):191-201.
- Kumar, P; Roupshael, Y; Cardarelli, M; Colla, G. 2017. Vegetable grafting as a tool to improve drought resistance and water use efficiency. *Front. Plant Sci.* 8:1130.
- Lahoz, I; Pérez De Castro, AM; Valcárcel-Gormes, M; Macua, JI; Beltran, J; Rosello Ripolles, S; Cebolla Cornejo, J. 2016. Effect of water deficit on the agronomical performance and quality of processing tomato. *Scientia Horticulturae* 200:55-65.
- Li, X; Kang, S; Li, F; Zhang, X; Huo, Z; Ding, R; Tong, L; Du, T; Li, S. 2017. Light Supplement and Carbon Dioxide Enrichment Affect Yield and Quality of Off-Season Pepper. *Agron. J.* 109:2107-2118.
- López, LM. 2017. Manual técnico del cultivo de tomate. San José, Costa Rica, INTA. 21 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2007. Agrocadena Regional Cultivo Chile Dulce. San José, Costa Rica, INTA. 76 p.
- Mahadeen, A; Mohawesh, O; Al-Absi, K; Al-Shareef, W. 2011. Effect of irrigation regimes on water use efficiency and tomato yield (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown in an arid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science* 57(1):05-114.
- Mattar, MA; Zin El-Abedin, TK; Alazba, AA; Al-Ghobari, HM. 2020. Soil water status and growth of tomato with partial root-zone drying and deficit drip irrigation techniques. *Irrigation Science* 38(2):163-176.
- Möhring, N; Kudsk, P; Nistrup-Jørgensen, L; Erik-Ørum, J; Finger, R. 2021. An R package to calculate potential environmental and human health risks from pesticide applications using the 'Pesticide Load' indicator applied in Denmark. *Computers and Electronics in Agriculture*. 191:106498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106498>
- Monge, JI. 2020. Evaluación de la morfología y fisiología de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) variedad

- Dulcítico en cultivo hidropónico bajo condiciones de invernadero. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 61 p.
- Mora, J; Echandi, C; Barrantes, L; Bonilla, K. 2018. Manual técnico basado en experiencias con el híbrido "Dulcítico" (*Capsicum annuum*). San José, Costa Rica, INTA. 84 p.
- Nangare, DD; Singh, Y; Kumar, PS; Minhas, PS. 2016. Growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis. *Agricultural Water Management* 171:73-79.
- Nardella, E; Giuliani, M; Gatta, G; de Caro, A. 2012. Yield Response to Deficit Irrigation and Partial Root-Zone Drying in Processing Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Agricultural Science and Technology* 2:209-219.
- Nemeskéri, E; Neményi, A; Bocs, A; Pék, Z; Helyes, L. 2019. Physiological Factors and their Relationship with the Productivity of Processing Tomato under Different. *Water Technology and Sciences* 11(3):586.
- Pacheco, D. 2018. Efecto del manejo del riego sobre la morfofisiología del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) híbrido Gladiador en hidroponía bajo invernadero. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 79 p.
- Pardossi, A; Tognoni, F; Incrocci, L. 2016. Mediterranean Greenhouse Technology. *Chronica Horticulturae* 44:28-34.
- Patanè, C; Tringali, S; Sortino, O. 2011. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Scientia Horticulturae* 129(4):590-596.
- Peleg, Z; Apse, MP; Blumwald, E. 2011. Engineering Salinity and Water-Stress Tolerance in Crop Plants: Getting Closer to the Field. *Advances in Botanical Research* 57:405-443.
- Potters, G; Pasternak, TP; Guisez, Y; Palme, KJ; Jansen, MAK. 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends in Plant Science* 12(3):98-105.
- Qian, T; Dieleman, JA; Elingsa, A; Marcelis, LFM. 2012. Leaf photosynthetic and morphological responses to elevated CO₂ concentration and altered fruit number in the semi-closed greenhouse. *Scientia Horticulturae* 145:1-9.
- Qiu, R; Song, J; Du, T; Kang, S; Tong, L; Chen, R; Wu, L. 2013. Response of evapotranspiration and yield to planting density of solar greenhouse grown tomato in northwest China. *Agricultural Water Management* 130:44-51.
- Quesada, G. 2015. Producción de chile dulce en invernadero bajo diferentes niveles de agotamiento en la humedad del sustrato. *Agronomía Costarricense* 39(1):25-36.
- Rodríguez, R; Rázuri, L; Swarowsky, A; Rosales, J. 2014. Efecto del riego deficitario y diferentes frecuencias en la producción del cultivo de pimentón. *Interciencia* 39(8):591-596.
- Salazar, R; Rojano, A; López, L. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Water Technology and Sciences* 5(2):177-183.
- Savic, S; Liu, F; Stikic, R; Jacobsen, SE; Jensen, CR; Jovanovic, Z. 2009. Comparative effects of partial rootzone drying and deficit irrigation on growth and physiology of tomato plants. *Archives of Biological Sciences* 61(4):801-810.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2018. Boletín Estadístico Agropecuario. San José, Costa Rica. 143 p.
- Soto, F. 2018. Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero. *Agronomía Costarricense* 42(2):59-73.
- Soto-Bravo, F; Araya, EA; Echandi, C. 2020. Efecto de la densidad de siembra y volumen de sustrato sobre parámetros de riego y rendimiento de chile dulce 'Dulcítico', en hidroponía bajo invernadero. *Agronomía Costarricense* 44(1):43-64.
- Taiz, L; Zeiger, E. 2003. *Plant physiology*. 3ª edición. *Annals of Botany* 91(6):750-751.
- Tanaskovik, V; Cukaliev, O; Spalevic, V; Moteva, M; Markoski, M. 2017. Effects of irrigation and fertilization on the number of formed flower and fruits sets in pruned pepper. *Agriculture and Forestry* 61:7-17.
- Valcárcel, M; Lahoz, I; Campillo, C; Martí, R; Leiva-brondo, M; Roselló, S; Cebolla-Cornejo, J. 2019. Controlled deficit irrigation as a water-saving strategy for processing tomato. *Scientia Horticulturae* 261:108972.



ADAPTABILIDAD Y ESTABILIDAD DE MUTANTES DE TOMATE EN LOS SANTOS, PANAMÁ

Jorge Enrique Jaén-Villarreal^{1/*}, María Caridad González-Cepero², Ismael Camargo-Buitrago³, Román Gordón-Mendoza⁴, Ana Elida Sáez-Cigarruista⁵, Francisco Alberto Centella-Pereira⁶

Palabras clave: interacción genotipo x ambiente; rendimiento; mutagénesis; Biplot GEE-SReg; *Solanum lycopersicum* L.

Keywords: genotype x environment interaction; yield; mutagenesis; Biplot GEE-SReg; *Solanum lycopersicum* L.

Recibido: 05/09/23

Aceptado: 01/11/23

RESUMEN

Introducción. En los programas de fitomejoramiento de tomate, la obtención de nuevos genotipos requiere evaluar los materiales genéticos en diferentes ambientes. **Objetivo.** Identificar los genotipos de tomate con mejor adaptabilidad y estabilidad en la provincia de Los Santos, Panamá. **Materiales y métodos.** Esta investigación se desarrolló en 5 ambientes de la provincia de Los Santos, Panamá, en el ciclo agrícola 2022-2023. Se sembraron 15 genotipos bajo un diseño de bloques completos al azar con 3 repeticiones. Los datos obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza a nivel de cada ambiente y combinado con la metodología de máxima verosimilitud residual (REML). La interacción genotipo por ambiente

se estimó a través el análisis Biplot GGE-SReg. **Resultados y discusión.** Los análisis revelaron una interacción significativa entre los genotipos y los ambientes estudiados, los 2 primeros ejes de los componentes principales de la interacción explicaron el 70,96% de la variación total. El Biplot GGE a través del polígono (cuál, ganó, dónde) permitió identificar 3 grupos ambientales potenciales. Se determinó el grupo de los mutantes T7.RB-50-EN44-13, R1.15-17-18-LV14-2 y R3.10-79-81-LV7-1 como los más sobresalientes por su estabilidad y rendimiento. El estudio sobre la capacidad de discriminación y representatividad de los ambientes identificaron al El Ejido y Villa Lourdes como los entornos más discriminantes mientras que Tres Quebradas fue el más representativo y el más cercano al ambiente ideal objetivo. **Conclusión.** El análisis Biplot GGE-SReg permitió hacer un análisis eficiente de

* Autor para correspondencia. Correo electrónico: jorgejaen02@gmail.com

1 Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, Panamá.

 0000-0002-2816-0562.

2 Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Cuba.

 0000-0002-1154-1756.

3 Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, Panamá.

 0000-0003-4199-0621.

4 Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, Panamá.

 0000-0002-8433-2357.

5 Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, Panamá.

 0000-0002-4901-7263.

6 Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, Panamá.

 0009-0003-1290-1922.

la interacción genotipo por ambiente, lo que lo convierte en una herramienta muy eficiente para identificar genotipos superiores con una buena adaptabilidad y estabilidad a la región de interés.

ABSTRACT

Adaptability and stability of tomato mutants in Los Santos, Panama. Introduction. In tomato breeding programs, obtaining new genotypes requires the evaluation of genetic materials in different environments. **Objective.** To identify tomato genotypes with better adaptability and stability in the province of Los Santos, Panama. **Materials and methods.** This research was carried out in 5 environments in the province of Los Santos, Panama, during 2022-2023 agricultural cycle. Fifteen genotypes were planted under a randomized complete block design with 3 replications. The data obtained were analyzed by analysis of variance at the level of each environment and combined using the residual maximum likelihood methodology

(REML). The genotype-by-environment interaction was estimated by GGE-SReg Biplot analysis. **Results and discussion.** The analysis revealed a significant interaction between the genotypes and the environments studied, the first 2 axes of the principal components of the interaction explained 70.96% of the total variation. The GGE Biplot through Polygon (which, won, where) allowed the identification of 3 potential environmental groups. The group of mutants T7.RB-50-EN44-13, R1.15-17-18-LV14-2 and R3.10-79-81-LV7-1 were determined as the most outstanding for their stability and performance. The study on the discrimination capacity and representativeness of the environments identified El Ejido and Villa Lourdes as the most discriminating environments while Tres Quebradas was the most representative and the closest to the ideal target environment. **Conclusion.** The GGE-SReg Biplot analysis allowed an efficient analysis of the genotype-by-environment interaction, which makes it a very efficient tool to identify superior genotypes with good adaptability and stability to the region of interest.

INTRODUCCIÓN

El tomate es una de las principales hortalizas en el mundo con una superficie sembrada de 5,167,388 ha y una producción en toneladas de 189,133,955 (FAO 2021). En Panamá es la principal hortaliza de consumo fresco; en el cierre agrícola 2021-2022, la producción de tomate de mesa fue de 19 933 toneladas y la de tomate industrial de 7 029 toneladas. Este mismo informe identificó a la provincia de Los Santos como la principal zona productora de tomate industrial en el país, con 84% de la producción total (MIDA 2022).

Las plantas de tomate son organismos que tienen que hacer frente a las variaciones ambientales para asegurar la reproducción y persistencia de la especie en la naturaleza (Diouf *et al.* 2020). El crecimiento y desarrollo de este cultivo está influenciado por la composición genética de la

planta, el ambiente y la interacción entre ambos factores. Para producir genotipos adecuados para múltiples ambientes, la interacción genotipo x ambiente (IG X A) debe tenerse en cuenta y evaluarse en los programas de fitomejoramiento (El-Soda *et al.* 2014).

En los programas de mejoramiento genético del cultivo de tomate, es de interés la selección de genotipos de elevada productividad y con buena adaptabilidad ambiental. La presencia de la interacción provoca un aumento en el desvío del parentesco fenotípico, reducción de la heredabilidad a lo largo de los ambientes y, consecuentemente disminución de las ganancias genéticas potenciales (Mudada *et al.* 2017).

Diversas herramientas estadísticas han demostrado ser efectivas para interpretar la IG X A tales como el efecto principal aditivo y la interacción multiplicativa (AMMI) (Gauch *et al.*

2008), los modelos de efectos fijos lineal-bilineal SREG (Crossa y Cornelius 1997) y el análisis Biplot de genotipo e interacción genotipo-por-ambiente (GGE) (Yan y Kang 2002). El objetivo de este estudio fue identificar los genotipos de tomate con mejor adaptabilidad y estabilidad en la provincia de Los Santos, Panamá.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se desarrolló en el ciclo agrícola 2022-2023, en 5 ambientes de la región productora de tomates de la provincia de Los Santos, Panamá (Tabla 1). En esta investigación

se utilizaron un total de 15 genotipos provenientes del proyecto de mejoramiento genético del Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), generados por mutagénesis con radiación gamma y por hibridación convencional. Los mutantes provenientes del cultivar IDIAP T-8 son tolerantes al Begomovirus, mientras que los progenitores IDIAP T-7 y DINA RPs presentan tolerancia las altas temperaturas. Los 3 progenitores se utilizaron como testigos, con la variedad IDIAP T-8 como testigo principal, debido a que es el cultivar más utilizado por los productores de tomate industrial en Panamá.

Tabla 1. Cultivares y ambientes evaluados.

Código	Cultivar	Origen	Progenitor	Ambiente	Latitud	Longitud
G1	R3.10-79-81-LV7-1	Mutagénesis	IDIAP-T8	La Villa	7° 56' 29.755" N	80° 25' 12.145" W
G2	R1.15-17-18-LV14-2	Mutagénesis	IDIAP-T8	El Ejido	7° 54' 34.982" N	80° 22' 8.511" W
G3	ICLN-1	Hibridación		Albina Grande	7° 52' 43.908" N	80° 18' 13.278" W
G4	ICLN-7	Hibridación		Tres Quebradas	7° 50' 52.468" N	80° 23' 50.239" W
G5	IDIAP T-7	Progenitor	Testigo 1	Villa Lourdes	7° 49' 26.777" N	80° 28' 16.359" W
G6	IDIAP T-8	Progenitor	Testigo 2			
G7	DINA RPs	Progenitor	Testigo 3			
G8	DINA.RB-12-EN18-1	Mutagénesis	DINA RPs			
G9	DINA.RB-17-EN21-2	Mutagénesis	DINA RPs			
G10	DINA.RB-44-EN30-3	Mutagénesis	DINA RPs			
G11	DINA.RB-12-EN19-4	Mutagénesis	DINA RPs			
G12	T7.RB-58-EN7-5	Mutagénesis	IDIAP-T7			
G13	T7.RB-58-EN7-6	Mutagénesis	IDIAP-T7			
G14	T7.RA-15-EN9-7	Mutagénesis	IDIAP-T7			
G15	T7.RB-50-EN44-13	Mutagénesis	IDIAP-T7			

Los experimentos fueron sembrados en campo con riego por goteo, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con 3 repeticiones. La unidad experimental consistió en una hilera de 3,20 m de largo, la separación entre

plantas fue de 0,20 m y 1,50 m entre hileras. El manejo agronómico de las parcelas experimentales se realizó según el manual técnico del IDIAP (Guerra Murillo *et al.* 2016).

Medición de variables y análisis de datos

Se evaluaron los días a la floración, porcentaje de fructificación y de cobertura de follaje. Al momento de la cosecha se evaluó el número de frutos por planta, frutos por metro cuadrado, diámetro ecuatorial, diámetro polar, peso de frutos, el contenido de sólidos solubles, nivel de acidez y firmeza. Se estimó el rendimiento en toneladas por hectárea y se comparó entre los mutantes y sus respectivos progenitores.

Se realizó un análisis a nivel de cada ambiente con el empleo de la metodología de máxima verosimilitud residual (REML) para determinar las varianzas asociadas a cada fuente de variación mediante el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + Rep_i + Gen_k + \varepsilon_{ijk} \quad (e1)$$

Donde

Y_{ijk}	=	tratamiento de interés
μ	=	media general
Rep_i	=	efecto de la i-ésima repetición
Gen_k	=	efecto k-ésimo genotipo
ε_{ijk}	=	error residual

En este modelo los genotipos se consideran como efectos fijos y las repeticiones como efectos aleatorios. Luego se realizó un análisis de varianza combinado para probar la presencia y significación de la IG X A, de acuerdo con el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijkl} = \mu + Amb_i + Rep_j(Amb_i) + Gen_l + Amb_i \times Gen_l + \varepsilon_{ijkl} \quad (e2)$$

Donde

Y_{ijkl}	=	tratamiento de interés
μ	=	media general
Amb_i	=	efecto para el i-ésimo ambiente
Rep_j	=	efecto de la j-ésima repetición
Gen_l	=	efecto del l-ésimo genotipo
$Amb_i \times Gen_l$	=	interacción genotipo por ambiente
E_{ijkl}	=	error residual

En este modelo se consideró como efectos aleatorios a la localidad, la interacción genotipo por localidad y las repeticiones; los genotipos se consideraron como efectos fijos. Se estableció un umbral de repetitividad mínimo de 0,05 por lo tanto, los entornos cuyos rasgos tengan una repetitividad inferior a esta serán excluidos del análisis. Tanto para el análisis individual como del combinado se utilizó el Programa META-R v6.0 (Alvarado *et al.* 2020).

Se emplearon los datos medios de los genotipos en todos los entornos para realizar el análisis Biplot GGE-SReg. Se consideró el siguiente modelo:

$$\bar{Y}_{ij} - \mu = G_i + E_j + GE_{ij} \quad (e3)$$

Donde

\bar{Y}_{ij}	=	media fenotípica del genotipo i en el entorno j
μ	=	media general
G_i	=	efecto aleatorio del genotipo i
E_j	=	efecto aleatorio del entorno j
GE_{ij}	=	efecto aleatorio de la interacción entre el genotipo i y el entorno j (Yan 2014).

Para realizar el análisis Biplot GGE-SReg y gráficos se utilizó el programa GEA-R (Pacheco *et al.* 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron los análisis individuales por localidad y se observó que los valores de repetitividad (H) para la variable rendimiento fueron superiores a 0,05 (Alvarado *et al.* 2020), debido a este resultado todas las localidades se incluyeron en el análisis de varianza combinado (Tabla 2). El análisis combinado mostró diferencias significativas entre los ambientes, los

genotipos y la interacción entre ambos factores en términos de rendimiento y de la mayoría de las características evaluadas. No se observaron diferencias en el diámetro ecuatorial y diámetro polar entre los ambientes, ni el porcentaje de fructificación entre los genotipos. No hubo IG x A en el porcentaje de fructificación, la floración, el brix, y el nivel de acidez. La variable cobertura no presentó diferencia estadística ($p < 0,05$).

Tabla 2. Medias ajustadas y análisis de varianza combinado de diferentes características agronómicas de 15 genotipos de tomates evaluados en 5 localidades de la provincia de Los Santos, Panamá.

Genotipos	Re (t.ha ⁻¹)	Fm ²	Fp	Pf (%)	De (mm)	Dp (mm)	Fl (días)	Brix	Fi (N)	pH	Cb	Rc %
R3.10-79-81LV7-1	69,01	62	21	50,99	60,83	73,83	42	5,22	36,11	4,42	62,11	0,9
R1.15-17-18-LV14-2	65,05	72	25	56,73	53,79	65,01	43	5,39	33,27	4,53	53,39	-4,9
ICLN-1	69,69	91	30	49,63	60,79	53,05	38	5,06	36,57	4,39	58,99	1,9
ICLN-7	60,72	64	22	56,10	64,25	50,25	38	5,52	35,35	4,34	58,52	-11,2
IDIAP T-7 (Control 1)	61,79	62	20	51,41	55,05	67,19	43	5,65	32,16	4,51	51,76	-9,7
IDIAP T-8 (Control 2)	68,40	61	20	53,70	62,31	65,66	43	5,39	42,50	4,41	59,47	
DINA RPs (Control 3)	55,24	67	23	55,93	58,90	54,66	42	5,33	37,24	4,52	58,56	-19,2
DINA.RB-12-EN18-1	62,77	58	19	50,85	60,71	64,39	41	5,29	35,91	4,45	54,41	13,6
DINA.RB-172-EN21-2	60,16	59	20	45,72	66,86	56,00	41	5,32	34,21	4,51	60,66	8,9
DINA.RA-44-EN30-3	55,28	65	21	53,53	56,97	51,14	42	5,66	38,08	4,49	56,40	0,1
DINA.RB-12-EN19-4	52,27	76	26	53,54	56,73	49,39	41	5,27	40,87	4,51	56,29	-5,4
T7.RB-58-EN7-5	61,93	63	21	50,23	56,46	70,54	43	5,51	31,62	4,50	53,34	0,2
T7.RB-58-EN7-6	62,56	64	22	51,04	54,31	73,08	44	5,47	34,97	4,46	55,51	1,2
T7.RA-15-EN9-7	64,81	67	23	53,73	55,03	67,83	43	5,45	33,76	4,46	51,69	4,9
T7.RB-50-EN44-13	66,43	68	22	51,38	57,02	67,25	42	5,36	37,02	4,45	55,80	7,5
PROMEDIO	62,41	67	22	52,30	58,67	61,95	42	5,39	35,98	4,46	56,46	
DMS_{5%}	9,94	15	5	7,29	4,91	8,48	1	0,32	4,98	0,09	5,61	
Ambiente	383,10**	424,22**	27,78**	44,21*	0,038	1,67	1,05**	0,12**	29,35**	0,01**	30,63**	
Genotipo	13,99*	36,68*	4,69*	23,84	11,76**	64,77**	2,52**	0,04**	6,60*	0,002**	11,91	
Genotipo x ambiente	27,72**	106,31**	9,40**	3,18	7,96**	34,83**	0,3	0	6,61*	0	2,08	
Error	108,82	141	23,36	98,9	22,96	35,13	2,07	0,17	32,5	0,02	73,63	
Repetitividad (H)	0,52	0,54	0,58	0,57	0,79	0,87	0,91	0,68	0,6	0,65	0,47	
CV (%)	16,7	17,8	21,6	17,8	8,2	9,6	3,6	7,8	15,8	2,8	13,3	
N° Ambientes	5	5	5	2	5	5	4	3	4	5	2	

**, *diferencias estadísticas al 0,01 y 0,05 de probabilidad, respectivamente. Re = rendimiento, Fm² = frutos por metro cuadrado, Fp = frutos por planta, Pf = porcentaje de fructificación, De = diámetro ecuatorial, Dp = diámetro polar, Fl = días a floración, Brix = contenido de sólidos solubles, Fi = firmeza, pH = nivel de acidez, Cb = porcentaje de cobertura, Rc = porcentaje de rendimiento en proporción al respectivo control.

Estos resultados demuestran que los genotipos presentaron un comportamiento diferente en los ambientes estudiados. Se observó que los mutantes provenientes de IDIAP T-7 lo superaron en rendimiento en todos los ambientes, destacándose el T7.RB-50-EN44-13 con un rendimiento superior. En el grupo de mutantes procedentes de la variedad DINA RPs el mejor fue el DINA.RB-12-EN18-1 con un rendimiento 13,6% por encima de su testigo. El mutante R3.10-79-81-LV7-1 fue el que mejor se comportó de los genotipos descendientes de la variedad IDIAP T-8, su rendimiento fue muy similar a su progenitor.

Se presentó un efecto significativo en la IG x A para el rendimiento y otras características, lo que provocó la necesidad de realizar una evaluación adicional. Según Yan y Kang (2002), cuando se detecta una diferencia estadísticamente significativa para la IG x A, se infirió la existencia de diferentes grupos ambientales. En ese sentido, la clasificación de cada cultivar puede cambiar debido a las características ambientales de cada sitio (Albuquerque de Oliveira *et al.*

2018) y se pueden seleccionar genotipos para ambientes específicos.

Las características que no presentaron una IG x A significativa la comparación de medias fue suficiente para detectar diferencias entre los genotipos en los distintos entornos. Sin embargo, para las variables que presentaron una IG x A significativa se realizó un análisis Biplot GGE-SReg para obtener más información para la selección de los genotipos más sobresalientes, pero, dado que el rendimiento fue el principal enfoque de esta investigación, solo se utilizaron los datos de rendimiento para estos análisis.

Análisis del desempeño de los genotipos en los diferentes ambientes

El análisis de varianza Tipo IV realizado al rendimiento combinado de 5 ambientes, así como el valor de los 2 ejes principales derivados de la interacción genotipo-ambiente, obtenidos a través del modelo Biplot GGE-SReg se presenta en la Tabla 3. El resultado de este análisis indicó que los 2 primeros ejes (PCA) explicaron el 70,96% de la variación total.

Tabla 3. Análisis de varianza Tipo IV y componentes principales para la variable rendimiento de 15 genotipos de tomates evaluados en 5 localidades de la provincia de Los Santos, Panamá.

F. V.	GL	SC	CM
Ambiente	4	71683,47	17920,87*
Genotipo	14	5626,68	401,91*
Ambiente x Genotipo	56	10752,02	192,00*
PC-1	17	7785,23	457,96*
PC-2	15	3837,37	255,83*
Residuo	183	30726,53	545,2
Genotipo	Re	PC-1	PC-2
R3.10-79-81-LV7-1	69,01	0,221	0,297
R1.15-17-18-LV14-2	65,05	0,430	-0,190
ICLN-1	69,69	0,798	-0,655
ICLN-7	60,71	-0,273	-0,199
IDIAP T-7	61,79	-0,136	0,493
IDIAP T-8 (Control)	68,40	0,589	-0,193
DINA RPs	55,24	-0,630	-0,074
DINA-RB-12-EN18-1	62,77	-0,014	-0,034
DINA-RB-17-EN21-2	60,16	-0,294	-0,672
DINA-RA-44-EN30-3	55,28	-0,951	-0,061
DINA-RB-12-EN19-4	52,27	-0,847	0,023
T7.RB-58-EN7-5	61,93	0,140	0,539
T7.RB-58-EN7-6	62,56	0,045	0,293
T7.RA-15-EN9-7	64,81	0,410	1,000
T7.RB-50-EN44-13	66,43	0,511	0,029
Ambiente			
Villa Lourdes	73,69	0,714	0,881
Albina Grande	50,40	0,790	0,173
El Ejido	64,10	0,860	-1,000
Tres Quebradas	87,59	0,974	-0,039
La Villa	36,25	-0,278	-0,477
Promedio	62,41	0,612	-0,092

*diferencias estadísticas al 0,05 de probabilidad, F.V. = Fuentes de variación, GL = grados de libertad, SC = suma de cuadrados, CM = Cuadrados medios, Re = rendimiento en t.ha⁻¹, PCA-1 y PCA-2 = puntuaciones de los 2 ejes correspondientes a los componentes principales (PCA) para el rendimiento por genotipo y ambientes.

Se realizó un gráfico Biplot (Figura 1) con las puntuaciones de los 2 ejes principales correspondientes a los PCA del análisis Biplot GGE-SReg, el cual, permitió visualizar explícitamente el desempeño de los genotipos evaluados dentro del entorno (cuál-ganó-dónde). De acuerdo con este análisis se formaron 3 grupos ambientales potenciales, resultados similares obtuvieron otros autores en tomate (Djidonou *et al.* 2020) y otros cultivos (Adham *et al.* 2022, Lima *et al.* 2023). El primero fue el ambiente de Villa Lourdes en el cual el genotipo más sobresaliente fue el G14 (T7.RA-15-EN9-7); el segundo estuvo conformado por las localidades de Albina Grande, Tres Quebradas y El Ejido en el cual el cultivar con mejor comportamiento fue el G3 (ICLN-1) y el tercer grupo ambiental y menos productivo debido a la gran cantidad de patógenos de suelo, se identificó para La Villa en el cual el genotipo 9 (DINA.RB-17-EN21-2) presentó un mejor desempeño.

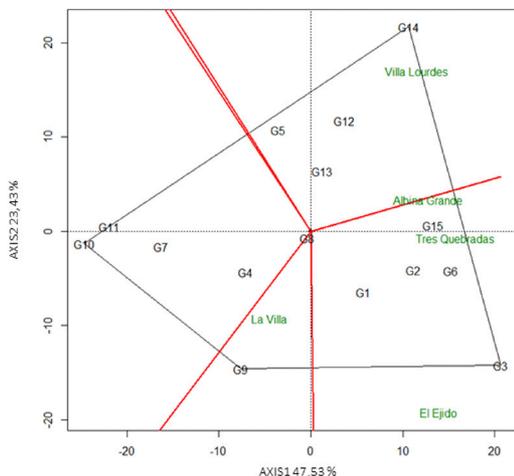


Figura 1. Polígono (cuál, ganó, dónde) de los efectos principales genotípicos y la interacción genotipo \times ambiente (Biplot GGE-SREG) de 15 genotipos de tomates para el rendimiento en 5 ambientes de la provincia de Los Santos, Panamá.

Los genotipos G14 (T7.RA-15-EN9-7), G3 (ICLN-1), G9 (DINA.RB-17-EN21-2) y G10 (DINA.RA-44-EN30-3) representan los vértices del polígono, debido a que se encuentran más alejados del centro de origen son más sensibles a los estímulos de los ambientes, por lo que se pueden clasificar como aquellos que presentan mejor comportamiento para uno o más ambientes (Yihunie y Gesesse 2018). En cambio, los genotipos ubicados dentro del polígono son los que presentan el rendimiento promedio más bajo para las características estudiadas (Lima *et al.* 2023).

Comportamiento del rendimiento y la estabilidad de los genotipos

En el gráfico de la media frente a la estabilidad (Figura 2A) se clasifican los genotipos evaluados en función al rendimiento promedio y la estabilidad. Para este análisis se calcula las coordenadas del ambiente ideal, el cual consiste en el promedio de las puntuaciones de todas las localidades de los 2 primeros Ejes Principales PCA-1 (0,612) y PCA-2 (-0,092).

En este gráfico la línea horizontal representa la abscisa, con la flecha que señala al ambiente ideal de mayor rendimiento del genotipo en todos los entornos. La línea perpendicular a la abscisa representa la ordenada e indica el nivel de estabilidad de cada genotipo evaluado. El genotipo más estable generalmente se ubica en la proyección más corta de la línea de la ordenada en relación con la abscisa (Tonk *et al.* 2011).

En este estudio el genotipo que presentó un mayor rendimiento fue el G3 (ICLN-1) seguido de los cultivares G6 (testigo 2), G15 (T7.RB-50-EN44-13), G2 (R1.15-17-18-LV14-2), G1 (R3.10-79-81-LV7-1) y G14 (T7.RA-15-EN9-7), mientras que los que presentaron un rendimiento más bajo fueron el G10 (DINA.RA-44-EN30-3), G11 (DINA.RB-12-EN19-4) y G7 (DINA RPs). En cuanto a la estabilidad los resultados presentan a los genotipos G8 (DINA.RB-12-EN18-1), G6 (testigo 2) y G2 (R1.15-17-18-LV14-2) como los más estables. Los genotipos G14 (T7.RA-15-EN9-7), G9 (DINA.RB-17-EN21-2), G3 (ICLN-1) y G12 (T7.RB-58-EN7-5) se considera

que son los que más aportaron a la interacción genotipo ambiente o más inestables a través de todas las localidades. Este resultado indica que estos se adaptan mejor a una localidad o ambiente específico.

Los genotipos G15 (T7.RB-50-EN44-13), G6 (TESTIGO 2), G2 (R1.15-17-18-LV14-2) y G1 (R3.10-79-81-LV7-1) destacan por su rendimiento y estabilidad en los ambientes estudiados, estos resultados permiten identificar el grupo de genotipos que más se acerca al genotipo ideal el cual es descrito por Kendal (2019) como el que tiene un mejor desempeño en rendimiento promedio y estabilidad en todos los ambientes

evaluados. Basado en este concepto en la Figura 2B, se presenta una clasificación de los genotipos en los ambientes estudiados. Como esta representación gráfica del genotipo ideal es solo simbólica, sirve como referencia para comparar los otros genotipos. Por lo tanto, según el gráfico de clasificación el genotipo ideal debe tener un vector largo y una IG X A baja (flecha dentro del círculo más pequeño en el área del gráfico). Así, el genotipo IDIAP T-8 (G6) fue el más cercano al ideal seguido del G15 (T7.RB-50-EN44-13), G2 (R1.15-17-18-LV14-2) y G3 (ICLN-1) los cuales reunieron las características de alto rendimiento y estabilidad.

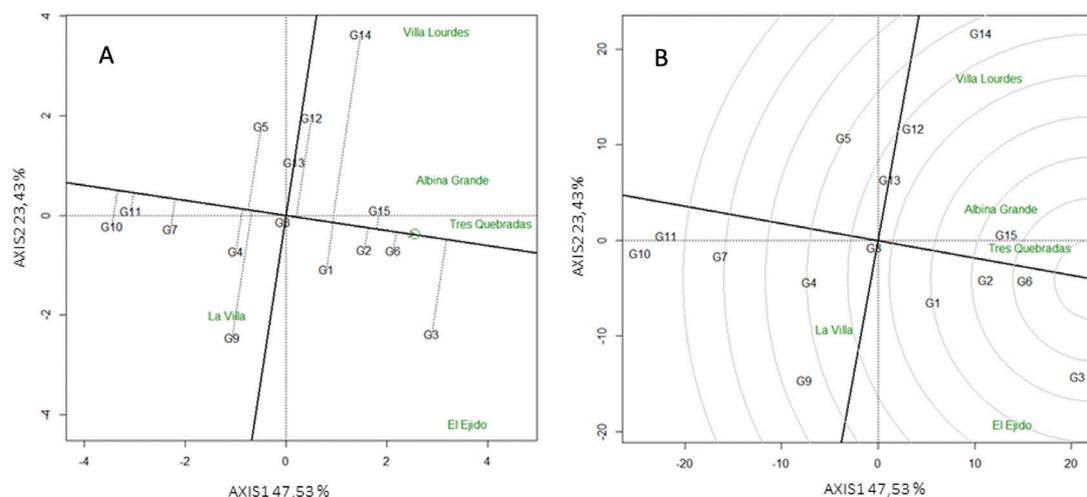


Figura 2. Análisis biplot de la media frente a estabilidad (A) y biplot de clasificación de 15 genotipos de tomate (B) en función al rendimiento en 5 ambientes de la provincia de Los Santos, Panamá.

Comportamiento de los ambientes

Al seleccionar un ambiente de prueba ideal, tiene que ser discriminativo y representativo de los genotipos y el grupo ambiental. La capacidad de un entorno para discriminar un genotipo se destaca por el tamaño del vector, por lo tanto, cuanto más largo es el vector, más discriminante es este entorno (Yan *et al.* 2007).

La representatividad entorno se puede visualizar en el ángulo formado por la línea discontinua de un entorno con el eje medio ambiente (Lima *et al.* 2023).

Los resultados obtenidos muestran que el ambiente más discriminante es El Ejido seguido de la localidad de Villa Lourdes (Figura 3A). Ambos ambientes son poco representativos lo que los hace útiles para seleccionar genotipos

adaptados a condiciones específicas, si los ambientes objetivo se pueden dividir en grupos ambientales (Yan *et al.* 2007). El entorno más representativo fue Tres Quebradas seguido de la localidad de Albina Grande, el primero, además de ser el más representativo mostró una buena capacidad de discriminación lo que lo convierte en el mejor entorno de los estudiados para separar eficientemente los genotipos, además de permitir la selección de cultivares ampliamente adaptables a otros ambientes.

Si un entorno tiene una alta capacidad de discriminación y representatividad genotípica,

entonces es un entorno ideal (Adham *et al.* 2022). Con base en el Biplot de capacidad de discriminación y representatividad, ningún ambiente del estudio ocupa la primera posición en ambos análisis. Para complementar y respaldar los análisis de capacidad de discriminación y representatividad se realizó un análisis de clasificación de los ambientes que se presenta en la Figura 3B. El entorno ideal estaba ubicado en el centro de los círculos concéntricos, lo que confirmó que el mejor ambiente fue el de Tres Quebradas en el cual los genotipos se desempeñaron mejor que en los otros ambientes estudiados.

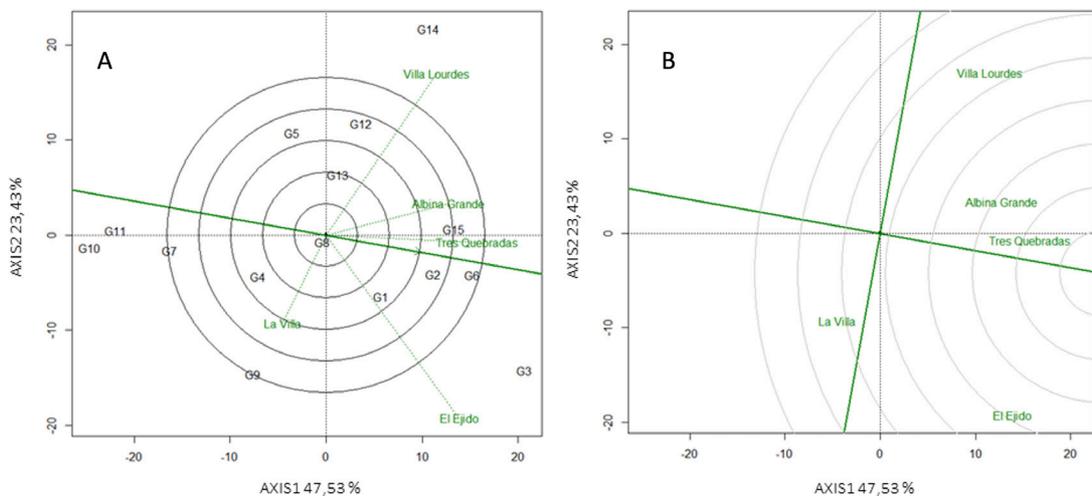


Figura 3. Capacidad de discriminación frente a la representatividad (A) y clasificación de los 5 ambientes (B) con base en el rendimiento de los 15 genotipos evaluados en la provincia de Los Santos Panamá.

CONCLUSIONES

El análisis Biplot GGE-SReg permitió hacer un análisis eficiente de la $IG \times A$, lo que lo convierte en una herramienta muy eficiente para identificar genotipos superiores con una buena adaptabilidad y estabilidad a la región de interés.

Se identificó como genotipos superiores adaptados a la mayor región productora

de tomate industrial en Panamá, a los mutantes T7.RB-50-EN44-13, R1.15-17-18-LV14-2 y R3.10-79-81-LV7-1 los cuales sobresalieron por su estabilidad y rendimiento sobre los testigos.

Se demostró la importancia de la mejora por mutaciones en el desarrollo nuevos cultivares con características agronómicas sobresalientes en el cultivo del tomate.

LITERATURA CITADA

- Adham, A; Ghaffar, MBA; Ikmal, AM; Shamsudin, NAA. 2022. Genotype \times environment interaction and stability analysis of commercial hybrid grain corn genotypes in different environments. *Life* (Basel, Switzerland) 12(11):1773. DOI: <https://doi.org/10.3390/life12111773>
- Albuquerque de Oliveira, TR; de Amaral Gravina, G; Ferreira de Oliveira, GH; Cordeiro Araújo, K; Cordeiro Araújo, L; Figueiredo Daher, R; Vivas, M; Marques Gravina, L; Pura da Cruz, D. 2018. The GT biplot analysis of green bean traits. *Ciencia rural* 48(6):1-6. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170757>
- Alvarado, G; Rodríguez, FM; Pacheco, A; Burgueño, J; Crossa, J; Vargas, M; Pérez-Rodríguez, P; Lopez-Cruz, MA. 2020. META-R: A software to analyze data from multi-environment plant breeding trials. *The Crop Journal* 8(5):745-756. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.03.010>
- Crossa, J; Cornelius, PL. 1997. Sites regression and shifted multiplicative model clustering of cultivar trial sites under heterogeneity of error variances. *Crop Science* 37(2):406-415. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183x003700020017x>
- Diouf, I; Derivot, L; Koussevitzky, S; Carretero, Y; Bitton, F; Moreau, L; Causse, M. 2020. Genetic basis of phenotypic plasticity and genotype \times environment interactions in a multi-parental tomato population. *Journal of Experimental Botany* 71(18):5365-5376. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa265>
- Djidonou, D; Leskovar, DI; Joshi, M; Jifon, J; Avila, CA; Masabni, J; Wallace, RW; Crosby, K. 2020. Stability of yield and its components in grafted tomato tested across multiple environments in Texas. *Scientific Reports* 10(1):13535. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70548-3>
- El-Soda, M; Malosetti, M; Zwaan, BJ; Koornneef, M; Aarts, MGM. 2014. Genotype \times environment interaction QTL mapping in plants: lessons from Arabidopsis. *Trends in Plant Science* 19(6):390-398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.01.001>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2021. Faostat: FAO Statistical Databases (en línea, sitio web). Consultado 20 ago. 2023. Disponible en <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Gauch, HG; Piepho, HP; Annicchiarico, P. 2008. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: Further considerations. *Crop Science* 48(3):866-889. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0513>
- Guerra Murillo, JA; Villarreal Nuñez, JE; Herrera Vásquez, JA; Aguilera Cogley, V; Osorio Burgos, O. 2016. Manual técnico: Manejo integrado del cultivo de tomate industrial (en línea). Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. Consultado 27 jul. 2023. Disponible en <http://www.idiap.gob.pa/download/manual-tecnico-manejo-integrado-del-cultivo-de-tomate-industrial/?wpdmdl=3309>
- Kendal, E. 2019. Proficiency of biplot methods (Ammi and gge) in the appraisal of triticale genotypes in multiple environments. *Applied Ecology and Environmental Research* 17(3):5995-6007. DOI: https://doi.org/10.15666/aer/1703_59956007
- Lima, JA; Rossi, AAB; de Oliveira Santos, T; Penna, GF; Tardin, FD; dos Santos Trindade, R; de Oliveira Guimarães, PE; de Paulo Campos Godinho, V; do Amaral Junior, AT; Cordeiro, AGM; dos Santos, RC; de Jesus, MSF; de Souza Pogalsky, L; Tiago, AV; de Pedri, EM; Ferreira, EL; Zanetti, GT. 2023. Adaptabilidade e estabilidade de híbridos de milho para o sul do bioma Amazônia via GGE biplot (en línea). *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 58(AA):02931. Consultado 27 jul. 2023. Disponible en <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/27252/15141>
- MIDA (Ministerio de Desarrollo Agropecuario). 2022. Dirección nacional de agricultura cierre agrícola 2021-2022 (en línea). Consultado 3 ago. 2023. Disponible en <https://mida.gob.pa/wp-content/uploads/2022/11/CIERRE-2021-2022-ultimo-23-11.pdf>
- Mudada, N; Chitamba, J; Macheke, TO; Manjeru, P. 2017. Genotype \times environmental interaction on seed cotton yield and yield components. *Oalib* 04(11):1-22. DOI: <https://doi.org/10.4236/oalib.1103192>
- Pacheco, A; Vargas, M; Alvarado, G; Rodríguez, F; Crossa, J; Burgueño, J. 2016. GEA-R (Genotype \times Environment Analysis with R for windows) version 4.1 (en línea). CIMMYT Research Data and Software Repository Network. Consultado 15 jul. 2023. Disponible en <https://data.cimmyt.org/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.1529/10203>
- Tonk, FA; Ilker, E; Tosun, M. 2011. Evaluation of genotype \times environment interactions in maize hybrids using GGE biplot analysis. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 11(1):01-09. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1984-70332011000100001>
- Yan, W. 2014. *Crop variety trials: Data management and analysis*. West Sussex, Reino Unido, John Wiley & Sons. 360 p.
- Yan, W; Kang, MS. 2002. *GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists*. New York,

- United States of America, CRC Press. 288 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420040371>
- Yan, W; Kang, MS; Ma, B; Woods, S; Cornelius, PL. 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science* 47(2):643-653. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374>
- Yihunie, TA; Gesesse, A. 2018. GGE biplot analysis of genotype by environment interaction in field pea (*Pisum sativum* L.) genotypes in northwestern Ethiopia. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 21(1):67-74. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12892-017-0099-0>



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

CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO Y CLOROFILA EN HOJAS DE CHILE DULCE HIDROPÓNICO EN INVERNADERO BAJO DIFERENTES ESTRATEGIAS DE MANEJO DEL RIEGO Y LA NUTRICIÓN

Freddy Soto-Bravo^{1/*}, María Alejandra Angulo-Guillén²

Palabras clave: sensores ópticos; reflectancia; fluorescencia; SPAD; índices de clorofila.

Keywords: optical sensors; reflectance; fluorescence; SPAD; chlorophyll index.

Recibido: 11/06/23

Aceptado: 07/08/23

RESUMEN

Introducción. El nitrógeno (N) es un elemento esencial para el proceso de fotosíntesis, y por tanto, determinante en el rendimiento. El uso de sensores ópticos para determinar índices de transmitancia (SPAD, CCI), reflectancia (NDVI) y fluorescencia ($F_v.F_m^{-1}$) relacionados con el estado del N foliar, permite un adecuado manejo a partir del monitoreo “in situ” no destructivo. **Objetivo.** Evaluar el efecto de diferentes estrategias de manejo del fertiriego sobre las concentraciones de nitrógeno y clorofila en hoja; y la relación entre i- concentración de N y de Clorofila (Cl) en hoja, ii- concentración de N y de Cl en hoja con el rendimiento y iii- concentración de N y de Cl en hoja con índices SPAD, CCI, NDVI y $F_v.F_m^{-1}$. **Materiales y métodos.** Se evaluaron 6 tratamientos en un diseño irrestricto al azar con arreglo factorial 2 x 3, que combinaron 2 estrategias de riego (E_1 : bajo volumen y de mayor frecuencia y E_2 : alto volumen y menor frecuencia) y

3 niveles de nutrición: bajo (NB), medio (NM) y alto (NA). Las medidas directas de N y Cl en hoja se determinaron con el método Kjeldahl y por extracción con etanol, respectivamente. **Resultados.** El nivel de nutrición afectó el contenido de N, donde los tratamientos NM y NA fueron similares, aunque superiores a NB. El modelo de regresión mostró poca capacidad para estimar N y rendimiento a partir del contenido de Cl en hoja. La estimación de Cl en hoja a partir de los índices CCI (R^2 : 0,71) y SPAD (R^2 : 0,75) resultaron prometedores solamente en NB. Para estimar N foliar, la regresión con $F_v.F_m^{-1}$ mostró valores de R^2 de 0,89 en NB y 0,69 en NM; mientras que para NDVI los valores R^2 fueron 0,61 en NB y 0,47 en NM. **Conclusión.** Los índices SPAD, CCI, NDVI y $F_v.F_m^{-1}$ presentaron potencial para estimar la concentración de clorofila y de N en hoja con aportes bajo y medio de nutrientes, y con limitaciones en los tratamientos con altos aportes de nutrición.

* Autor para correspondencia. Correo electrónico: freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

1 Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Costa Rica.

 0000-0003-1959-9597.

2 Instituto Nacional de Aprendizaje, Costa Rica.

 0000-0001-8700-4845.

ABSTRACT

Nitrogen and chlorophyll concentration in leaves of hydroponic sweet pepper in greenhouse under different irrigation and nutrition management strategies.

Introduction. Nitrogen (N) is an essential element for the photosynthesis process, and therefore, a determining factor in yield. The use of optical sensors to determine transmittance indices (SPAD, CCI), reflectance (NDVI) and fluorescence (F_v/F_m^{-1}) related to the state of foliar N, allows adequate management based on non-destructive “in situ” monitoring. **Objective.** To evaluate the effect of different fertigation management strategies on nitrogen and chlorophyll concentration in the leaf; and the relationship between i- N and Cl concentration in leaf, ii- N and Cl concentration in leaf with yield and iii- N and Cl concentration in leaf with SPAD, CCI, NDVI and F_v/F_m^{-1} indices. **Materials and methods.** Six treatments were evaluated in an unrestricted randomized design

with a 2 x 3 factorial arrangement, which combined 2 irrigation strategies (E_1 : low volume and more frequent and E_2 : high volume and less frequent) and 3 levels of nutrition: low (NB), medium (NM) and high (NA). The direct measurements of N and Cl in the leaf were determined with the Kjeldahl method and by ethanol extraction, respectively. **Results.** Nutrition level affected N content, where the NM and NA treatments were similar, although higher than NB. The regression model showed little ability to estimate N and yield from the Cl content in the leaf. Estimation of Cl in the leaf from the CCI (R^2 : 0.71) and SPAD (R^2 : 0.75) indices were only promising in NB. To estimate foliar N, the regression with F_v/F_m^{-1} showed R^2 values of 0.89 in NB and 0.69 in NM; while for NDVI the R^2 values were 0.61 in NB and 0.47 in NM. **Conclusion.** SPAD, CCI, NDVI and F_v/F_m^{-1} indices showed potential to estimate chlorophyll and N concentration in the leaf with low and medium nutrient inputs, and with limitations in treatments with high nutrient inputs.

INTRODUCCIÓN

El chile dulce (*Capsicum annuum*), cultivado principalmente en sistema convencional a campo abierto, representa una de las principales hortalizas a nivel mundial. Sin embargo, en los últimos años ha incrementado el cultivo hidropónico con riego por goteo bajo invernadero. En este sistema, el buen manejo del N es fundamental, ya que es un elemento esencial que está estrechamente relacionado con el metabolismo del carbono (Kraiser *et al.* 2011) mediante el proceso de fotosíntesis (Leghari *et al.* 2016). Por tanto, el déficit de N se manifiesta en disminución del crecimiento y la producción; mientras que el exceso disminuye el rendimiento y calidad de fruto (Leghari *et al.* 2016) producto del desbalance entre fuente y sumidero. Además, el exceso de N favorece el ataque de fitopatógenos y contribuye al efecto invernadero y a la contaminación de las aguas con

amonio, amoníaco, nitritos, óxido nitroso, nitratos, entre otros (Byrnes 1990, SCU 2013).

Recientemente, se han empleado metodologías para monitorear el estado del N foliar en los cultivos principalmente a campo abierto, por medio de medidas indirectas del contenido de clorofila en hoja con sensores ópticos de transmitancia, reflectancia y fluorescencia (Padilla *et al.* 2018a). La determinación indirecta “in situ” del estado del N en el cultivo con sensores ópticos, presenta la ventaja de que no es necesario eliminar tejido productivo y no hay plazos de espera por los resultados. Esto permite actuar de manera inmediata ante una deficiencia o un exceso de N, lo que resulta en una mejora de la productividad del cultivo. Sin embargo, su aplicabilidad al manejo del N ha reportado resultados variables debido a que se ven afectados por una serie de factores como el clima, el genotipo, métodos de

muestreo y prácticas de manejo agronómico tales como el riego y la fertilización.

En otro sentido, el mal manejo del riego induce a aplicaciones excesivas que provocan cierre estomático y disminución en la absorción mineral por muerte de raíces por hipoxia (Pardos 2004); mientras que el déficit hídrico induce a una disminución en la tasa fotosintética, aborto y daño de frutos, marchitez y muerte de la planta (Quesada 2015).

Por tanto, surge la necesidad de investigar el uso de estas herramientas para una correcta aplicación según las condiciones específicas de cultivo. Gran parte de los estudios acerca de la relación entre los contenidos de clorofila y de N en hoja, han sido realizados mayoritariamente en cultivos convencionales a campo abierto tales como tomate y maíz; mientras que hay pocos estudios en cultivos hidropónicos bajo invernadero.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes estrategias de manejo del fertiriego sobre los contenidos de nitrógeno y clorofila en hoja y el rendimiento; y la regresión entre i- contenidos de N y de Cl en hoja, ii- contenidos de N y de Cl en hoja con el rendimiento y iii- contenidos de N y de Cl en hoja con los índices de Cl medidos con sensores ópticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental. La investigación fue realizada entre junio y noviembre del 2019, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica (10° 01' N y 84° 16' O, 840 msnm), con valores promedio anual de temperatura y humedad relativa y precipitación acumulada de 22°C, 78% y 1940 mm, respectivamente. Se utilizó un invernadero multitúnel de hierro galvanizado, con cubierta de polietileno transparente (200 μm) y malla anti-insectos (43 mesh) en las paredes, formado por módulos de 9,75 m de ancho y 50 m de largo, altura de 6 m al centro del túnel y 4 m a la canoa y orientado en dirección este-oeste. La ventilación fue pasiva en paredes laterales combinada

con apertura automatizada de ventanas cenitales según la velocidad del viento e intensidad de lluvia.

Condiciones climáticas. Durante el experimento se monitoreó la radiación solar global (Piranómetro LI-COR Mod. LI-200SA), la temperatura y la humedad relativa (VAISALA Mod. HMP-35C). Al final del estudio la integral de radiación solar varió entre 8 y 16,5 MJ.m⁻². día⁻¹ con un promedio de 10,8 MJ.m⁻². día⁻¹. Los promedios globales máximos, mínimos y promedios, fueron en el mismo orden, 32,8; 19,7 y 24,7°C para temperatura y de 98,2; 46,5 y 81,2% para humedad relativa.

Sistema de cultivo. Se utilizó un sistema de cultivo hidropónico en sustrato de fibra de coco en tablas comprimidas con cobertura plástica color blanco, las cuales fueron hidratadas con riegos cortos y frecuentes hasta alcanzar un volumen de 28,8 L. Finalmente, se realizaron 3 cortes al plástico cobertor en el borde inferior de la tabla, para drenar el exceso de agua.

Las características físicas del sustrato (Tabla 1) fueron determinadas mediante la metodología UNE-EN-13041-2007 (2007). Los contenidos de humedad volumétrica (θ) en la fibra de coco fueron determinados en muestras sometidas a potenciales mátricos (ψ_m) de 1, 5 y 10 kPa en la caja de arena (Eikelkamp, mod. 08.01). Se asumió que la θ a 1 y a 10 kPa correspondieron a la capacidad de contenedor ($\theta_{CC} = 77,8\%$) y al punto de marchitez permanente ($\theta_{PMP} = 52,4\%$), respectivamente. A partir de los porcentajes de θ en el sustrato para cada ψ_m se estimaron los porcentajes de agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible. Además, se determinó los porcentajes de aireación, porosidad total y partículas sólidas en el sustrato.

El material genético utilizado fue el híbrido “Dulcítico” de crecimiento indeterminado, con un inicio de cosecha entre 75 y 90 días después de siembra, frutos de forma cónica color verde-rojizo, alto grado brix y un rendimiento de hasta 12,8 kg.m⁻² (Soto-Bravo *et al.* 2020).

La siembra se realizó por trasplante de plántulas con 35 días de edad con 5 a 6 hojas

verdaderas, producidas en bandejas plásticas de 98 celdas con turba (peat moss). Se sembraron 3 plantas por tabla de fibra de coco con distancias

de 33,3 cm entre plantas y de 1,5 m entre hileras, para una densidad de 2 plantas.m⁻².

Tabla 1. Características físicas de la fibra de coco utilizada como sustrato para el cultivo de chile dulce hidropónico en invernadero.

Parámetro	Rangos óptimos ¹		Valor
	Máximo	Mínimo	
Partículas < 1 mm = índice de grosor (%)			83,00
Partículas entre 1 y 4 mm (%)			58,00
Partículas > 4 mm (%)			25,00
Densidad aparente (g.cm ⁻³)		>0,15	0,095
Densidad real (g.cm ⁻³)	<1,0	1,0	1,80
Porosidad total (%)	>85%	--	94,70
Partículas sólidas (%)	15%	--	5,30
Humedad volumétrica a 1 kPa (%v.v ⁻¹)	55	70	77,80
Humedad volumétrica a 5 kPa (%v.v ⁻¹)	30	40	55,05
Humedad volumétrica a 10 kPa (%v.v ⁻¹)	25	30	52,44
Capacidad de aireación a 1 kPa (%)	30	15	17,00
Agua fácilmente disponible	20	30	22,71
Agua de reserva	5	10	2,61
Agua total disponible	25	40	25,32

¹ Adaptado de Ansorena (1994).

En prácticas de cultivo se realizaron podas sanitarias de hojas senescentes y tallos dañados, eliminación de frutos dañados y de brotes vegetativos por debajo de la primera bifurcación de la planta. El entutorado se realizó al colocar 2 cuerdas de nylon desde la primera bifurcación, que guiaban 2 tallos principales hasta un cable acerado en la parte superior. Todas las ramas emergentes se sujetaron con hilos de nylon a anillos colocados en las 2 cuerdas principales. Para el manejo de plagas y enfermedades se realizaron monitoreos semanales, con el fin de determinar la necesidad de realizar aplicaciones fitosanitarias de productos biológicos, preventivos o erradicantes.

Descripción de los tratamientos. Se evaluaron 6 tratamientos que combinaron 3 niveles de nutrición con 2 estrategias de manejo del riego (Tabla 2).

Para el manejo de riego, se utilizó un sistema por goteo autocompensado y antidrenante (2 L.h⁻¹). En las estrategias de riego (E) se establecieron 2 porcentajes de agotamiento del ATD: de 10% para E₁ y 30% para E₂, equivalentes a valores de consigna de θ en el sustrato para la activación del riego de 70 y 57%, respectivamente.

El control del riego se realizó por medio de una bandeja de riego a la demanda (BRD), que consistió en una canoa de madera impermeabilizada con plástico color negro, sobre la cual se colocó una tabla de fibra de coco sembrada

con 3 plantas del cultivo. Estaba compuesta por un caudalímetro, un pluviómetro (ECRN-100) y un sensor de θ (Decagon, Mod. GS3) para monitorear en tiempo real los volúmenes de riego y de drenaje y la θ en el sustrato. Según

las condiciones climáticas del día y la etapa fenológica del cultivo, conforme incrementaba la demanda de ET_c y consecuentemente disminuía la θ en el sustrato, se activaba el riego cuando se alcanzaban los valores de θ de consigna.

Tabla 2. Tratamientos combinados de 2 estrategias de manejo del riego con 3 niveles de concentración de nutrientes en solución nutritiva de chile dulce en fibra de coco bajo invernadero.

Identificación	Manejo de riego		Manejo nutricional		
	Estrategia	Volumen (L)	Frecuencia (hh:mm)	Contratación	CE (dS.m ⁻¹)
NBE ₁	Menor volumen y mayor frecuencia (E ₁)	0,53	2:58	Baja concentración (NB)	0,85
NBE ₂	Mayor volumen y menor frecuencia (E ₂)	1,74	3:38		
NME ₁	Menor volumen y mayor frecuencia (E ₁)	0,53	2:58	Media concentración (NM)	1,70
NME ₂	Mayor volumen y menor frecuencia (E ₂)	1,74	3:38		
NAE ₁	Menor volumen y mayor frecuencia (E ₁)	0,53	2:58	Alta concentración (NA)	2,55
NAE ₂	Mayor volumen y menor frecuencia (E ₂)	1,74	3:38		

El tiempo de riego para reponer el volumen de agua necesario para los agotamientos en las estrategias E₁ y E₂, fue calculado a partir del número de goteros por tabla (3 goteros), del caudal por gotero (2 L.h⁻¹) y el volumen de sustrato/tabla (28,8 L).

La concentración de nutrientes en los tratamientos fue ajustada por conductividad eléctrica (CE) a partir de una solución nutritiva para el cultivo de chile dulce (Soto-Bravo *et al.* 2020) para el nivel de nutrición media (NM), cuya CE se redujo un 50% para NB y se incrementó un 50% para NA (Tabla 3).

Tabla 3. Concentración de nutrientes y conductividad eléctrica (CE) de las soluciones nutritivas utilizadas en cada tratamiento de nutrición del cultivo de chile dulce hidropónico en invernadero.

Concentración de nutrientes	Macronutrientes (mg.L ⁻¹)						Micronutrientes (mg.L ⁻¹)						CE (dS.m ⁻¹)
	N	P	K	Mg	Ca	S	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Mo	
Baja (NB)	58	19	119	18	74	43	1,00	0,05	0,20	0,20	0,20	0,10	1,0
Media (NM)	117	38	237	36	149	86	2,10	0,09	0,40	0,40	0,40	0,20	2,0
Alta (NA)	175	57	356	54	223	129	3,10	0,14	0,70	0,60	0,60	0,40	3,0

Para preparar las soluciones nutritivas se utilizó ácido nítrico, fosfato monopotásico, nitrato de potasio, sulfato de potasio, sulfato de

magnesio, nitrato de calcio, ácido bórico, molibdeno y quelatos (EDDHA) de hierro, cobre, manganeso y zinc.

Para cada nivel de nutrición, durante el periodo del estudio se monitoreó la conductividad

eléctrica (CE) en el sustrato (Figura 1) por el método de pasta saturada (Ansorena 1994).

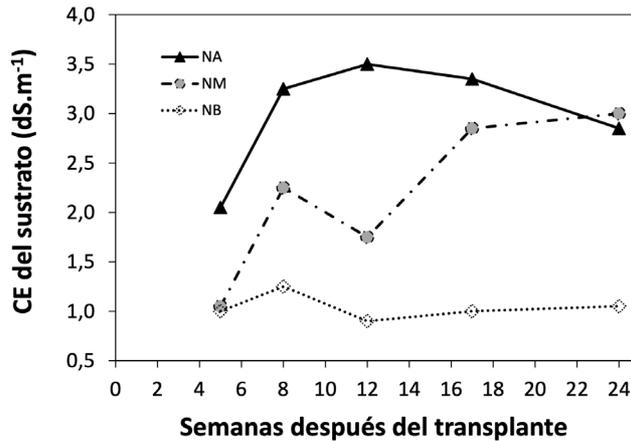


Figura 1. Evolución semanal de la conductividad eléctrica (CE) del sustrato de fibra de coco por el método de pasta saturada, según nivel de nutrición baja (NB), media (NM) y alta (NA). Alajuela, Costa Rica, 2019.

Diseño experimental. Se utilizó un diseño experimental irrestricto al azar con arreglo bifactorial (3 X 2). Cada tratamiento tuvo 3 repeticiones conformadas por 3 hileras con 5 tablas/hilera y 3 plantas por tabla (45 plantas/repetición), para un total de 135 plantas por tratamiento. Las 2 hileras externas de cada repetición funcionaron como cultivo de borde y la hilera central para muestreos.

Variables de respuesta. A partir de 15 días después de iniciar los tratamientos se determinó la concentración de clorofila y de nitrógeno (N) en hoja, en 5 evaluaciones durante el ciclo del cultivo. La determinación de clorofila se realizó según metodologías de Ni *et al.* (2009), Lichtenthaler y Wellburn (1995), Caesar *et al.* (2018). Se muestrearon 3 discos con un área de 6,16 cm², para un total 9 discos por unidad experimental. Se pesaron los discos de la hoja y se colocaron en tubos Falcon forrados con papel aluminio, y secuencialmente se agregó N líquido, luego se trituroó con ayuda de un mortero, se agregó 2 ml de etanol (95%) y se agitó

en el vortex. Posteriormente, la muestra se llevó a baño ultrasónico por 35 minutos e inmediatamente se centrifugó (3000 rpm) por 10 minutos a 4°C. El extracto se aforó a 6 ml con etanol (95%), del cual se tomó 1 ml que se diluyó en 7 ml de etanol al 95%.

Para determinar el contenido de clorofila, se midió la densidad óptica en 665 nm para la clorofila a y en 649 nm para la clorofila b, el blanco se llenó con etanol y cada muestra se midió por triplicado. Posteriormente, se anotaron las absorbancias y se determinó la cantidad (μg) de clorofila a ($13,95 (A_{665}) - 6,88 (A_{649}) \times \text{FD} \times \text{S}$); clorofila b ($24,96 (A_{649}) - 7,32 (A_{665}) \times \text{FD} \times \text{S}$) y clorofila total (clorofila a + clorofila b); donde A correspondió a la absorbancia del extracto de clorofila leída a la longitud de onda indicada en el subíndice, FD es el factor de dilución y S es la cantidad de solvente (ml). Los valores de clorofila fueron expresados $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ según la ecuación: Clorofila a + b ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$) = clorofila a + b/ $A_1 \times 1000$; donde A_1 es el área del disco (m^2). El contenido de N foliar se determinó por

el método Kjeldahl (1883) con la utilización de las mismas hojas muestreadas para determinar clorofila en hoja con etanol y con los sensores ópticos.

Con los sensores ópticos se determinaron índices de transmitancia, reflectancia y fluorescencia, los cuales están relacionados con el contenido de clorofila en hoja. En transmitancia se determinaron los índices SPAD (SPAD-502) e índice de clorofila (CCI; Apogee MC-100). En reflectancia se determinó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) con GreenSeeker (NTech, modelo RT100). Finalmente, con Fluorómetro se determinó el índice de fluorescencia $F_v \cdot F_m^{-1}$ (Opti-Sciences 2012).

Para las determinaciones de dichos índices se seleccionaron al azar 3 plantas por repetición, en las cuales se seleccionó la hoja más nueva totalmente expandida y se midió con los sensores ópticos entre las 8 a.m. y 11 a.m. en el centro de la lámina foliar, parte adaxial y a un costado de la vena central según Padilla *et al.* (2018b). Todas las mediciones para los 4 sensores ópticos se realizaron en la misma hoja y en la misma planta.

El contenido relativo de clorofila en unidades SPAD, se determinó en un área foliar de 6 mm² con longitudes de onda de 650 y 940 nm. El CCI ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$) se determinó en un área foliar de 71,22 mm², como el cociente entre los porcentajes de transmitancia obtenidos a 931 nm (radiación infrarroja cercana) y a 653 nm (radiación roja), según recomendación de AI (2018).

Con el GreenSeeker se determinó el NDVI en 2 rangos de longitud de onda: el infrarrojo (IR) comprendido entre 570 y 680 nm y el infrarrojo cercano (NIR) ubicado entre 725 y 1020 nm. Para esto, se recorría con el equipo 5 m a lo largo de una hilera de cada unidad experimental a una distancia del cultivo entre 80-120 cm según Gutiérrez *et al.* (2011).

El índice de fluorescencia $F_v \cdot F_m^{-1}$ se obtuvo como el cociente entre la fluorescencia variable (F_v) y la fluorescencia máxima (F_m). La hoja evaluada se adaptó a la oscuridad para alcanzar un estado donde el fotosistema II detiene su actividad. Posteriormente, el fluorómetro emitió una

radiación fotosintéticamente activa (PAR) por debajo de 1 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ para determinar el mínimo nivel de fluorescencia (F_0). Para determinar la F_m se expuso la hoja adaptada a oscuridad a una radiación fotosintéticamente activa (PAR) de varios miles de $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ por un tiempo menor a 1 segundo. A partir de la diferencia entre F_0 y F_m se obtuvo F_v , lo que permitió determinar el cociente $F_v \cdot F_m^{-1}$ y de esta forma la eficiencia del fotosistema II.

Para medir con el fluorómetro, se colocó un clip en la parte adaxial de la hoja en el centro de la lámina foliar y a un costado de la vena principal, para adaptar la hoja a oscuridad durante 30 minutos (Opti-Sciences 2012).

Finalmente, durante el periodo de cosechas, en cada tratamiento y en 10 plantas por repetición, se cuantificó el rendimiento comercial que incluyó los frutos clasificados según peso del fruto en primera (> 119 g), segunda (86-118 g) y tercera (< 85 g) calidad.

Análisis estadístico. Cuando se cumplieran los supuestos de normalidad y homocedasticidad, los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANDEVA). Cuando hubo interacción entre los niveles de nutrición y las estrategias de riego ($p < 0,05$), se analizaron los efectos simples de los tratamientos mediante la comparación múltiple de medias según Tukey ($p < 0,05$). Cuando no hubo interacción ($p > 0,05$) se analizaron los efectos principales, al agrupar los datos por nivel del factor que fue estadísticamente significativo ($p < 0,05$). Adicionalmente, se realizaron análisis de regresión entre i- contenidos de N y de Cl en hoja, ii- contenidos de N y de Cl en hoja con respecto al rendimiento y iii- contenidos de N y de Cl en hoja y los índices de transmitancia, reflectancia y fluorescencia medidos con sensores ópticos. Para todos los análisis se utilizó el programa estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.* 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto sobre la concentración de nitrógeno y clorofila en hoja. En el presente estudio,

no hubo interacción entre la estrategia de riego y el nivel de nutrición ($p > 0,05$). Independientemente de la estrategia de riego, el nivel de nutrición afectó ($p < 0,05$) el contenido de nitrógeno, mientras que no hubo efecto ($p > 0,05$) sobre el contenido de Cl (Tabla 4). En la presente investigación no hubo diferencias en el contenido de

Cl cuando la dosis de N fue superior a 58 mg.L^{-1} . Coincidentemente, estudios realizados por De Ávila Silva *et al.* (2019) demostraron en plantas del género *Capsicum* que cuando las concentraciones de N fueron superiores a 50 mg.L^{-1} no hubo efecto sobre la concentración de clorofila (mg.g^{-1}) en hoja.

Tabla 4. Comparación de medias de los contenidos de nitrógeno (%N) y de clorofila en el cultivo de chile dulce (var. Dulcítico) hidropónico en invernadero, con Baja, Media y Alta concentración de nutrientes en solución nutritiva. Alajuela, Costa Rica, 2019.

Variable	Tratamiento	Media	n	E.E	
Clorofila mg.g^{-1}	Baja	0,95	30	0,11	A
	Media	1,00	30	0,11	A
	Alta	1,23	30	0,11	A
N (%)	Baja	4,80	10	0,16	A
	Media	5,36	10	0,16	B
	Alta	5,47	10	0,16	B

A, B: Letras distintas indican presencia de diferencias significativas entre tratamientos según prueba de Tukey ($p < 0,05$). E.E = error estándar.

Al comparar los tratamientos NA y NM, un mayor aporte de N en NA no se tradujo en incrementos en el contenido de N foliar. Dicho comportamiento ha sido observado en diversos estudios con dosis crecientes de N. Por ejemplo, De Ávila Silva *et al.* (2019) en 2 cultivares de chile obtuvieron una disminución en el peso del fruto y consecuentemente en el rendimiento, al incrementar la dosificación de N.

Aunque algunos estudios han demostrado que el aumento en los aportes de N está relacionado con mayores rendimientos, existe un nivel mínimo de N que permite alcanzar la máxima tasa de crecimiento. A partir de este nivel crítico (Greenwood 2001) se afecta el rendimiento, debido a un crecimiento foliar excesivo que favorece la incidencia de plagas y enfermedades y el desbalance entre fuente y sumidero de la planta. Al respecto, Yasuor *et al.* (2013), demostraron que no hubo efecto en la concentración de N foliar a

partir de concentraciones superiores a $56,2 \text{ mg.L}^{-1}$ en el cultivo de chile dulce.

Contenidos de nitrógeno y clorofila en hoja. La regresión entre contenidos de clorofila y de nitrógeno en hoja (Figura 2), obtuvo valores de R^2 relativamente bajos en todos los niveles de nutrición, con una tendencia ligeramente descendente conforme incrementó el nivel de nutrición en el tratamiento NB.

Los resultados obtenidos contrastan con estudios realizados por Padilla *et al.* (2018b), quienes reportaron valores de R^2 de 0,72, entre el N y clorofila foliar en chile dulce en suelo. Sin embargo, coincidente con el presente estudio, los autores observaron una tendencia a disminuir los valores de R^2 cuando el contenido de N foliar fue alto ($> 6\%$), debido a que los contenidos de clorofila a y b tienden a saturarse. Diversos factores tales como la especie, el genotipo, las condiciones climáticas (temperatura y radiación solar), y las prácticas de manejo (Medellín *et al.* 2011),

podieron afectar la capacidad de estimar los contenidos de N en función de la concentración de clorofila en hoja. Respecto al sistema de cultivo

en sustrato, el manejo del riego y la nutrición es distinto al suelo, debido a las diferencias intrínsecas entre ambos medios de cultivo.

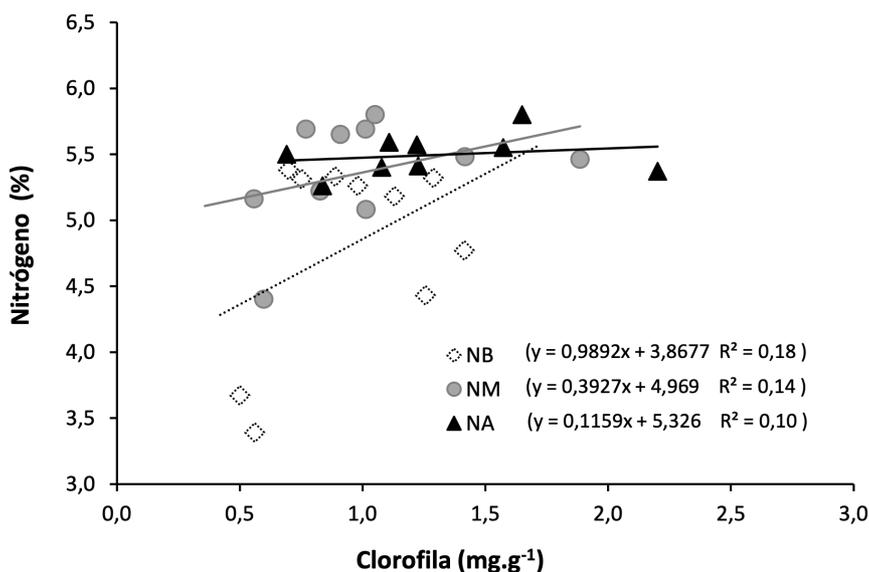


Figura 2. Análisis de regresión entre los contenidos de clorofila y de nitrógeno en hoja de plantas de chile dulce hidropónico bajo invernadero, con tratamientos de baja (\diamond NB), media (\bullet NM) y alta (\blacktriangle NA) concentración de nutrientes en solución nutritiva. Alajuela, Costa Rica, 2019.

Por otra parte, del total de N foliar, el 80% es almacenado en los cloroplastos, del cual el 50% se destina a la producción de proteínas fotosintéticas y tan solo entre 0,5 y 1,5% se destina a la síntesis de clorofila (Xiong *et al.* 2015). Por tanto, la relación entre el contenido de clorofila y de N en hoja puede cambiar por la distribución de N en la planta, según las condiciones lumínicas y el tipo de cultivo (Xiong *et al.* 2015).

Nitrógeno y clorofila en hoja respecto al rendimiento. La regresión entre el contenido de clorofila y el rendimiento presentó una tendencia

lineal negativa en todos los niveles de nutrición, donde los valores de R^2 disminuyeron conforme incrementó el nivel de nutrición desde 0,08 en NA hasta 0,45 en NB (Figura 3a). Por otra parte, la relación entre nitrógeno y rendimiento mostró una tendencia lineal negativa en el tratamiento con NA y una tendencia lineal positiva en los tratamientos NB y NM. La mayor capacidad para estimar el rendimiento a partir del contenido de N en hoja se presentó en el tratamiento NM (R^2 : 0,72; Figura 3b).

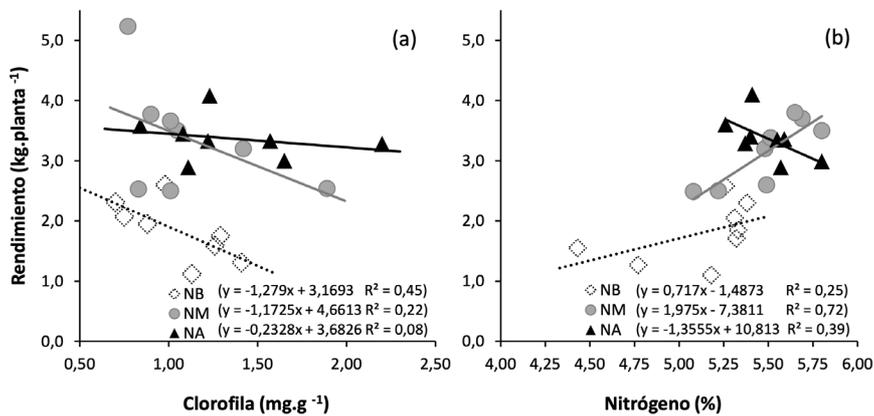


Figura 3. Regresión entre los contenidos de nitrógeno (a) y de clorofila (b) con el rendimiento en el cultivo de chile dulce hidropónico bajo invernadero con tratamientos de baja (◇ NB), media (● NM) y alta (▲ NA) concentración de nutrientes en solución nutritiva. Alajuela, Costa Rica, 2019.

El umbral óptimo de N foliar se determina por medio de la curva de N crítico, que se define como la mínima concentración de N en la cual se alcanza la máxima tasa de crecimiento del cultivo (Greenwood 2001). El N crítico es un parámetro muy utilizado para describir el proceso de dilución de N en la planta, ya que relaciona la producción de materia seca y la concentración de N durante el ciclo de cultivo C_3 y C_4 (Lemaire y Gastal 1997). Cuando la concentración de N en la planta es inferior al nivel de N crítico el crecimiento del cultivo disminuye, mientras que si es superior el crecimiento es excesivo.

En el presente estudio, el tratamiento NA obtuvo la mayor producción de biomasa con superior cantidad de hojas más grandes que los demás tratamientos (datos no presentados). Esto debido a que, ante altos aportes de N, ocurre un consumo de lujo de N, que se obtiene como el cociente entre la concentración máxima de N y el nivel de N crítico en hoja (Rahn *et al.* 2010). Dicho consumo se manifiesta en un crecimiento excesivo con mayor cantidad de hojas más grandes, lo cual disminuye la concentración de N por efecto de dilución (de Caram *et al.* 2007). Dicha dilución se debe a que la tasa de acumulación de

materia seca ocurre más rápido que la acumulación de nutrientes en la planta, por lo que a altas dosis de N se pueden presentar concentraciones foliares inferiores o similares a plantas con un aporte normal de N.

El comportamiento en el tratamiento NA fue coincidente con diferentes estudios (De Ávila Silva *et al.* 2019, Yasuor *et al.* 2013, Rambo *et al.* 2010) donde al aplicar dosis crecientes de N en chile dulce se obtuvo una disminución en el rendimiento con altas dosis de N. Esto debido a que existe un umbral de N foliar a partir del cual no hay incrementos en los rendimientos, debido a que altos aportes de N promueven un consumo de lujo que favorece el crecimiento excesivo que causa un desbalance entre el crecimiento vegetativo y generativo (fuente/sumidero). En estos casos las hojas actúan como un fuerte sumidero, lo que genera una competencia entre el crecimiento vegetativo y el reproductivo, repercute en la producción de flores y frutos, y por tanto, en el rendimiento (Sainju *et al.* 2019, De Ávila Silva *et al.* 2019).

Respecto a la relación entre el rendimiento y el contenido de clorofila, la literatura menciona que la deficiencia de algunos nutrientes como el

K, Mg, Ca y Fe, y su relación con el N, puede influir en el contenido de clorofila y consecuentemente en el rendimiento. En el presente estudio se presentó una relación lineal negativa entre la clorofila y el rendimiento, debido a que, durante el periodo de producción de frutos, se presentó una deficiencia de Fe en el cultivo debido a su precipitación en solución nutritiva. El hierro (Fe) participa en la síntesis de clorofila, en la estructura de cloroplastos (Briat *et al.* 2015) y afecta de manera indirecta la síntesis de porfirina que es precursor de la clorofila (Briat *et al.* 2015). Además, el contenido de clorofila afecta la tasa fotosintética y consecuentemente el rendimiento (Güler y Büyük 2007).

Por otra parte, la mayoría de los estudios reportados en la literatura, no especifican las proporciones entre nutrientes utilizadas en los distintos tratamientos, lo cual evidentemente puede afectar la relación entre los contenidos de N y clorofila en hoja. Al respecto, Güler y Büyük (2007), mencionan que la proporción entre el N y algunos nutrientes como el magnesio (Mg) y potasio (K) puede influir considerablemente en los contenidos de clorofila y de N foliar y consecuentemente en el rendimiento.

Análisis de regresión entre medidas directas e indirectas. El análisis de regresión entre medidas directas de N y de clorofila en hoja y las medidas indirectas obtenidas con equipos de transmitancia (SPAD, CCI), fluorescencia (F_v/F_m^{-1}) y reflectancia, se realizó únicamente para los niveles de nutrición, ya que fue el único factor que afectó ($p < 0,05$) el contenido de N en hoja y el rendimiento.

Los bajos valores de R^2 entre los índices de transmitancia, reflectancia y fluorescencia y los contenidos de N y de clorofila en hoja, pudo ser consecuencia de una serie de factores tales como el estado fenológico del cultivo, edad de la hoja, nutrición, riego, tipo de suelo, prácticas culturales, incidencia de insectos, patógenos, radiación solar y estado hídrico de la planta, entre otros. En la investigación realizada, hubo presencia de mosca blanca (*Bemisia tabaci*) que

favoreció la incidencia de fumagina (*Capnodium magniferar*). Asimismo, hubo incidencia del hongo *Leveillula taurica* y una deficiencia nutricional de hierro que afectó el índice de reflectancia (NDVI) ya que este es sensible a la pérdida de coloración verde del follaje.

Los factores señalados anteriormente, influyen en la morfofisiología, y por tanto, en las características ópticas de la hoja. Al respecto, Rambo *et al.* (2010) señalan que los índices de reflectancia en el espectro NIR (700 - 1300 nm) de la radiación solar, se ven influenciados por las propiedades ópticas del tejido foliar, tales como la estructura celular, las interfaces aire - pared celular - protoplastos - cloroplastos.

Nitrógeno y clorofila en hoja y medidas indirectas. Las ecuaciones generadas en la regresión entre los valores de N en hoja y los de transmitancia (CCI, SPAD), reflectancia (NDVI) y fluorescencia (F_v/F_m^{-1}), presentaron una mayor capacidad de predicción ($>R^2$) cuando los niveles de nutrición fueron bajos (NB > NM > NA). Esta tendencia ha sido observada en estudios realizados por Zhang *et al.* (2019).

Nitrógeno en hoja y transmitancia (CCI, SPAD). La regresión entre el contenido de N en hoja (%) y los índices CCI (Figura 4a) y SPAD (Figura 4b), presentaron un comportamiento lineal muy similar. En ambos índices, los tratamientos NM y NA mostraron una tendencia lineal estática con bajos valores de R^2 desde 0,10 a 0,18; mientras que en NB hubo una tendencia lineal creciente con valores de R^2 entre 0,26 y 0,40 (Figura 4). Al respecto, estudios realizados por Zhang *et al.* (2019) plantean que aportes crecientes de N no necesariamente reflejan aumentos en los valores de SPAD, CCI y fluorescencia, lo cual sugiere que altos aportes de N podría dificultar la estimación del contenido de N y clorofila en hoja.

Cuando el nivel de nutrición fue bajo (NB), el modelo de regresión para predecir los contenidos de N en hoja a partir de los índices SPAD y CCI, tuvo una tendencia lineal muy similar en ambos casos, con valores de R^2 de 0,26 para CCI

(Figura 4a) y de 0,40 para SPAD (Figura 4b). Estudios similares de regresión entre índices SPAD y N en hoja de maíz, reportaron valores intermedios

de R^2 desde 0,42 a 0,62 (Gabriel *et al.* 2019) y superiores a 0,64 (Medellín *et al.* 2011).

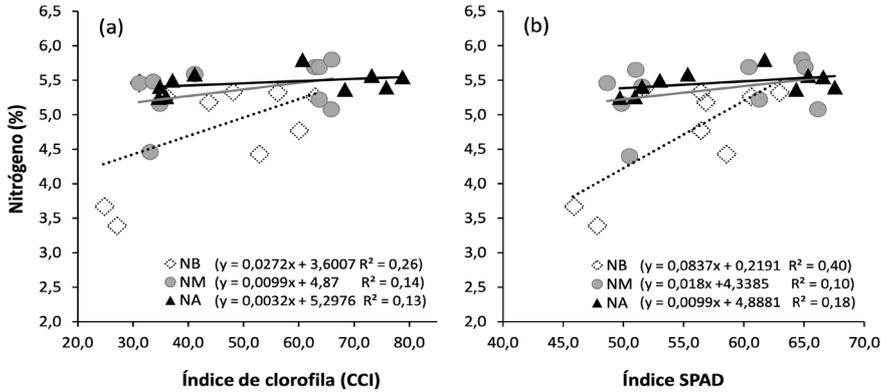


Figura 4. Regresión entre el contenido de nitrógeno (%) en hoja y los índices (a) de clorofila (CCI) y (b) de desarrollo de análisis de plantas y suelo (SPAD) en el cultivo de chile dulce hidropónico bajo invernadero, con tratamientos de baja (\diamond NB), media (\bullet NM) y alta (\blacktriangle NA) concentración de nutrientes en solución nutritiva. Alajuela, Costa Rica, 2019.

Los contenidos y distribución de N y Cl en los diferentes tejidos de la planta son afectados por condiciones de baja intensidad lumínica (Xiong *et al.* 2015) debido a una baja tasa de asimilación. Esto puede ser un factor condicionante, principalmente en épocas de baja radiación solar, debido al efecto difusor de luz de la cubierta plástica utilizada en el invernadero donde se realizó el presente estudio, el cual fue realizado en invierno donde se obtuvo una integral de radiación solar diaria (DLI) promedio de $10,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$. Esta es una condición limitante, ya que el chile dulce es una planta exigente en radiación solar, la cual, para obtener altos rendimientos, requiere valores superiores a $14 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$.

Asociado a dicha reducción lumínica, Medellín *et al.* (2011) señalan que la concentración de N y de Cl puede variar a lo largo de la lámina foliar, ya que no se distribuye equitativamente en toda la hoja. Además, el contenido de N y de Cl puede variar producto de la morfofisiología de la hoja (Zhang *et al.* 2019, Gabriel *et al.* 2019) la cual pudo ser afectada en condiciones de NB.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente y con estudios realizados por Zhang *et al.* (2019) y Parry *et al.* (2014), para monitorear con mayor precisión el estado de N foliar en cultivos hidropónicos bajo invernadero, a partir de índices de transmitancia, reflectancia y florescencia con el uso de sensores ópticos, podría ser necesario estandarizar las metodologías de muestreo según etapa fenológica, hora del día, cantidad de muestras, sitio de muestreo en la hoja, así como aspectos de manejo agronómico, riego y nutrición, entre otros.

Clorofila en hoja y transmitancia (CCI, SPAD). Los modelos de regresión generados entre el contenido de clorofila en hoja y los índices de transmitancia (CCI y SPAD), presentaron mayor capacidad de estimación (R^2) cuando el nivel de nutrición fue NB, con valores de R^2 de 0,75 para CCI (Figura 5a) y de 0,71 para SPAD (Figura 5b), seguido por el tratamiento con NA con un R^2 de 0,40 para CCI (Figura 5a) y de 0,38 para SPAD (Figura 5b). En las plantas con niveles de nutrición medio (NM) se presentaron valores R^2 marginales entre 0,003 y 0,06 (Figura 5).

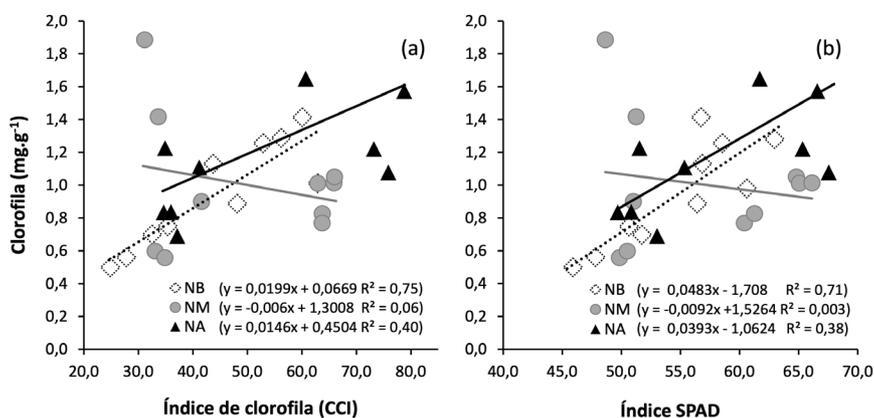


Figura 5. Regresión entre el contenido de clorofila en hoja y los índices (a) de clorofila (CCI) y (b) de desarrollo de análisis de plantas y suelo (SPAD) en el cultivo de chile dulce hidropónico bajo invernadero con tratamientos de baja (\diamond NB), media (\bullet NM) y alta (\blacktriangle NA) concentración de nutrientes en solución nutritiva. Alajuela, Costa Rica, 2019.

La capacidad para predecir el contenido el contenido de Cl en hoja a partir de los índices SPAD y CCI, tuvo un comportamiento lineal muy similar para ambas variables (Figura 5), probablemente debido a que estas determinan la transmitancia en longitudes de onda muy similares de radiaciones roja e infrarroja cercana (NIR). En NIR se utilizan longitudes de NIR 931 nm para CCI y de 940 nm para el SPAD; mientras que en radiación roja se utiliza 653 nm para CCI y 650 nm para SPAD (AI 2018, ST 2009, Taskos *et al.* 2015). Además, los valores de transmitancia dentro de longitudes de onda NIR se ven influenciados por factores que afectan la síntesis de clorofila, tal como sucedió con una ligera deficiencia de hierro presentada en este estudio.

El comportamiento de la relación entre el contenido de Cl y los índices de transmitancia (CCI, SPAD) en los tratamientos NM y NA, fueron contrastantes con estudios realizados por Padilla *et al.* (2018b) en el cultivo de chile dulce en suelo. En dicho estudio, al analizar la relación entre el contenido de clorofila en hoja y los índices de transmitancia, se obtuvieron valores de R^2 de 0,85 para SPAD y de 0,78 para CCI. Asimismo, se han reportado altos valores

de R^2 al utilizar las medidas de SPAD y CCI para predecir el contenido de Cl en hoja de cultivos en suelo a campo abierto, tales como canola, tomate, pepino y melón (Wu *et al.* 2012, Padilla *et al.* 2017, Azia y Stewart 2001, Zhu *et al.* 2012). Sin embargo, estos estudios han sido realizados en un sistema de cultivo en suelo, que podría conllevar a resultados diferentes a un sistema de cultivo sin suelo. De forma similar al N sería necesario estandarizar metodologías de muestreo según etapa fenológica, hora del día, cantidad de muestras, sitio de muestreo en la hoja, así como aspectos de manejo agronómico, riego y nutrición, entre otros.

Nitrógeno, clorofila y reflectancia (NDVI). Los modelos de regresión entre NDVI y los contenidos de N (Figura 6a) y de Cl (Figura 6b) en hoja, mostraron un comportamiento lineal positivo. Se observó que la capacidad de estimación del contenido de N (R^2) incrementó conforme disminuyó el nivel de nutrición, con el mayor valor de R^2 (0,61) en el tratamiento NB (Figura 6a). En contraste, la regresión entre Cl y NDVI, presentó un comportamiento irregular, donde el mayor valor de R^2 (0,63) se obtuvo en NA (Figura 6b).

Estudios similares en otros cultivos como pastizales, de igual forma han mostrado resultados variables con valores de R^2 de entre 0,50 y

0,92, según la época de medición y del tipo de pasto (Bell *et al.* 2004).

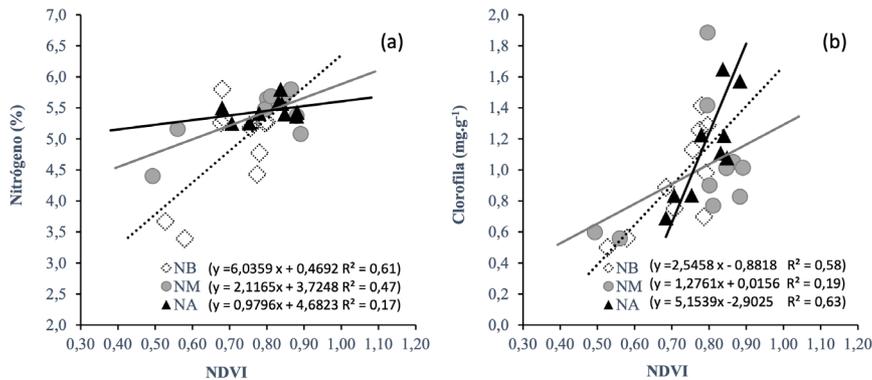


Figura 6. Regresión entre los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y los contenidos de nitrógeno (a) y de clorofila (b) en hoja de plantas de chile dulce hidropónico bajo invernadero, con tratamientos de baja (\diamond NB), media (\bullet NM) y alta (\blacktriangle NA) concentración de nutrientes en solución nutritiva. Alajuela, Costa Rica, 2019.

Los resultados anteriormente descritos, contrastan con los hallazgos de Padilla *et al.* (2018b) en chile dulce, donde el modelo de regresión para estimar N a partir de NDVI obtuvo valores de R^2 superiores a 0,91. Asimismo, Rambo *et al.* (2010), al relacionar el NDVI con el contenido de N en el cultivo de maíz, consideraron que un R^2 de 0,59 representó un modelo de regresión aceptable para estimar N en hoja.

Los valores de NDVI es uno de los índices más utilizados para el manejo de N en los cultivos como cereales, pepino, tomate y brócoli, ya que se ha demostrado una fuerte relación con el contenido de Cl en hoja (Padilla *et al.* 2018c). Sin embargo, los valores de NDVI son muy sensibles a los síntomas de clorosis en hoja (Padilla *et al.* 2018c), debido a que son más sensibles a la reflectancia en el espectro de radiación verde y rojo.

Por otra parte, en el presente estudio, la cobertura del suelo fue “ground cover” color blanco, por lo cual la luz reflejada pudo afectar los valores de NDVI y consecuentemente su relación con los contenidos de N y de Cl en hoja. Esto

se evidenció principalmente en etapas tempranas del cultivo, donde la cobertura del suelo por el cultivo es baja. En este caso, la reflectancia desde el suelo es predominante, ya que las superficies blancas presentan valores de NDVI iguales a -1 (Gutiérrez *et al.* 2011). Consecuentemente, en etapas iniciales es posible que se enmascare los contenidos de N y de Cl; mientras que en etapas avanzadas la cobertura del cultivo incrementa, lo que reduce la influencia de la superficie del suelo sobre los valores de NDVI, que tendieron a aumentar.

Otro factor que pudo afectar el potencial del NDVI para estimar el contenido de N en hoja en condiciones de NA, es el hecho de que las mediciones con el Greenseeker pueden presentar saturación cuando la biomasa de la planta alcanza valores máximos en etapas fenológicas avanzadas, lo que resulta en datos poco representativos del estado nutricional de la planta (Muñoz *et al.* 2013). Esto plantea la necesidad de generar modelos para las distintas etapas fenológicas y considerar el efecto de la cobertura del suelo (Li *et al.* 2014). Por ejemplo, en el cultivo de algodón,

Ramirez *et al.* (2015) señalan que la validez del contenido de N en hoja mediante sensores ópticos, mostró resultados promisorios únicamente cuando el dosel del cultivo alcanzaba el 30% de cobertura.

Por otra parte, Gutiérrez *et al.* (2011) señalan que el Greenseeker se debe mantener a una distancia entre 80-120 cm con un ángulo definido respecto al cultivo. Sin embargo, en este estudio, la distancia entre hilera (1,5 m) junto a la densidad del follaje, dificultó la aplicación de dicha recomendación. Además, las longitudes de onda en el margen del espectro rojo penetran más dentro del dosel del cultivo, lo que hace que la reflectancia sea más medible, por lo que el uso de dichas bandas han demostrado ser indicadores confiables para al monitorear el estado del N y de Cl en hoja a partir de medidas del NDVI (Li *et al.* 2014, Padilla *et al.* 2018c).

Nitrógeno, clorofila y fluorescencia ($F_v \cdot F_m^{-1}$). Los resultados obtenidos en el presente estudio demostraron que la $F_v \cdot F_m^{-1}$ tiene gran

potencial para monitorear el contenido del N en hoja de plantas de chile dulce hidropónico bajo invernadero, cuando el nivel de N fue NB (R^2 : 0,89) o NM (R^2 : 0,69). Coincidente con lo anterior, Yang *et al.* (2016), reportaron valores de R^2 entre 0,70 y 0,90 para dichas variables. Sin embargo, la capacidad predictiva fue marginal (R^2 : 0,046; Figura 7a) cuando el nivel de N en hoja incrementó a valores de 5,5 a 5,8% en el tratamiento NA, debido a una mayor variabilidad en los datos de $F_v \cdot F_m^{-1}$. Esto sugiere que, con altos contenidos de N la $F_v \cdot F_m^{-1}$ no es un buen parámetro para estimar el contenido de N en hoja del cultivo de chile dulce.

Por otra parte, la regresión entre $F_v \cdot F_m^{-1}$ y el contenido de Cl en los distintos niveles de nutrición (Figura 7b), presentó un patrón similar al descrito anteriormente en la relación entre N y $F_v \cdot F_m^{-1}$. Sin embargo, en el caso de la Cl, los valores de R^2 fueron menores, donde el tratamiento NM obtuvo el mayor coeficiente de determinación (R^2 : 0,45; Figura 7b).

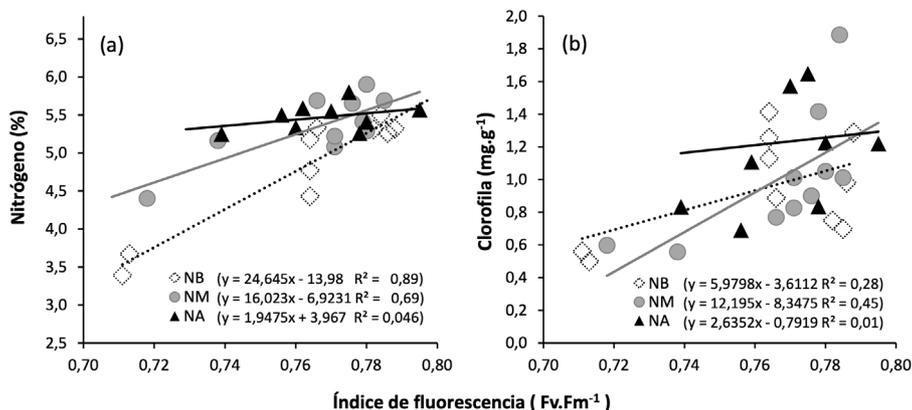


Figura 7. Regresión entre el índice de fluorescencias y los contenidos de nitrógeno (a) y de clorofila (b) en hoja de plantas de chile dulce chile hidropónico bajo invernadero con tratamientos de baja (\diamond NB), media (\bullet NM) y alta (\blacktriangle NA) concentración de nutrientes en solución nutritiva. Alajuela, Costa Rica, 2019.

La medición correcta de la fluorescencia conlleva una mayor complejidad, ya que involucra otros pigmentos fotosintéticos, que no contempla el fluorómetro utilizado en este estudio. La fluorescencia es un proceso que se da durante la fase I de la fotosíntesis, en el cual la clorofila y otros pigmentos se encargan de la absorción de radiación solar. Dicha absorción es afectada por la distribución y concentración de dichos pigmentos en la hoja, que a la vez dependen de diversos factores bióticos, abióticos, genéticos, manejo agronómico y específicamente de los aportes nutricionales. Ante una deficiencia o excesos de N, la planta modifica la concentración de clorofila, flavonoides y carotenoides, entre otros. Por ejemplo, la concentración de zeaxantina incrementa ante una limitación de N (Pérez-Molina *et al.* 2020, Rambo *et al.* 2010).

CONCLUSIONES

Los contenidos de nitrógeno y de clorofila en hoja de chile dulce hidropónico en invernadero, no fueron afectados por la interacción entre la estrategia de riego y la nutrición, únicamente hubo efecto del nivel de nutrición de los tratamientos. Los mayores rendimientos se obtuvieron en los tratamientos con nivel de nutrición medio ($3,54 \text{ kg.planta}^{-1}$) y alto ($3,56 \text{ kg.planta}^{-1}$), asociados con mayores contenidos de N en hoja, de 5,36% y 5,47, respectivamente.

El modelo de regresión demostró poca capacidad para estimar N a partir del contenido de Cl en hoja; mientras que para estimar rendimiento a partir de los contenidos de N y de Cl en hoja, mostró el mayor potencial en los tratamientos NM ($R^2: 0,50$) y NB ($R^2: 0,47$).

Respecto a los índices de transmitancia, reflectancia y fluorescencia obtenidos con sensores ópticos, en general no mostraron una buena relación con los contenidos de N y de Cl en hoja en los tratamientos con altos aportes de nutrición. Los índices de transmitancia SPAD y CCI presentaron buen potencial para estimar el contenido de clorofila únicamente cuando el nivel de N fue bajo (NB), con valores de R^2 de 0,71 y 0,75,

respectivamente. Los índices de fluorescencia $F_v.F_m^{-1}$ y de reflectancia NDVI mostraron buena capacidad para estimar el contenido de N foliar en hoja cuando el nivel de nutrición fue medio y bajo, con valores de R^2 de 0,89 en NB y 0,69 en NM para $F_v.F_m^{-1}$; y de 0,61 en NB y 0,47 en NM para NDVI.

LITERATURA CITADA

- AI (Apogee Instruments). 2018. Chlorophyll concentration meter (en línea). Utah, USA. Consultado feb. 2019. Disponible en <https://www.apogeeinstruments.com/content/MC-100-manual.pdf>
- Ansorena, M.J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Madrid, España, Mundi Prensa. 167 p.
- Azia, F; Stewart, K.A. 2001. Relationships between extractable chlorophyll and SPAD values in muskmelon leaves. *Journal of Plant Nutrition* 24(6):961-966.
- Bell, GE; Howell, BM; Johnson, GV; Raun, WR; Solie, JB; Stone, ML. 2004. Optical sensing of turfgrass chlorophyll content and tissue nitrogen. *HortScience* 39(5):1130-1132.
- Briat, JF; Dubos, C; Gaymard, F. 2015. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends in Plant Science* 20(1):33-40.
- Byrnes, BH. 1990. Environmental effects of N fertilizer use. *Fertilizer research* 26(1-3):209-215.
- Caesar, J; Tamm, A; Ruckteschler, N; Leifke, AL; Weber, B. 2018. Revisiting chlorophyll extraction methods in biological soil crusts-methodology for determination of chlorophyll a and chlorophyll a + b as compared to previous methods. *Biogeosciences* 15:1415-1424.
- De Ávila Silva, L; Condori-Apfata, JA; Marcelino, MM; Tavares, ACA; Raimundi, SCJ; Martino, PB; Nunes-Nesi, A. 2019. Nitrogen differentially modulates photosynthesis, carbon allocation and yield related traits in two contrasting *Capsicum chinense* cultivars. *Plant Science* 283:224-237.
- De Caram, GA; Angeloni, P; Prause, J. 2007. Determinación de la curva de dilución de nitrógeno en diferentes fases fenológicas del girasol. *Agricultura Técnica* 67(2):189-195.
- Di Rienzo, JA; Macciavelli, RE; Casanoves, F. 2012. Modelos lineales mixtos: aplicaciones en InfoStat. Córdoba, Argentina, Universidad de Córdoba. 193 p.
- Gabriel, JL; Quemada, M; Alonso-Ayuso, M; Lizaso, JI; Martín-Lammerding, D. 2019. Predicting N status in maize with clips sensors: choosing sensor, leaf sampling point, and timing. *Sensors* 19(18):3881.
- Greenwood, DJ. 2001. Modeling N-response of field vegetable crops grown under diverse conditions

- with N_{ABLE}: a review. *Journal of Plant Nutrition* 24:1799-1815.
- Güler, S; Büyük, G. 2007. Relationships among chlorophyll-meter reading value, leaf N and yield of cucumber and tomatoes. *Acta Horti* 729:307-311.
- Gutiérrez, MV; Cadet, E; Rodríguez, W; Araya, JM. 2011. El Greenseeker y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía Mesoamericana* 22(2):397-403.
- Kjeldahl, JG. 1883. Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen körpern. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 22(1):366-382.
- Kraiser, T; Gras, DE; Gutiérrez, AG; González, B; Gutiérrez, RA. 2011. A holistic view of nitrogen acquisition in plants. *Journal of Experimental Botany* 62(4):1455-1466.
- Leghari, SJ; Wahocho, NA; Laghari, MG; Laghari, AH; Bhabhan, MG; Talpur, KH; Bhutto, TA; Wahocho, SA; Lashari, AA. 2016. Role of nitrogen for plant growth and development: A review. *Advances in Environmental Biology* 10(9):209-218.
- Lemaire, G; Gastal, F. 1997. N uptake and distribution in plant canopies. In Lemaire, G (ed.). *Diagnosis of Nitrogen Status in Crops*. Berlin, Springer-Verlag. p. 3-41.
- Li, F; Miao, Y; Feng, G; Yuan, F; Yue, S; Gao, X; Chen, X. 2014. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research* 157:111-123.
- Lichtenthaler, HK; Wellburn, AR. 1995. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions* 11:591-592.
- Medellín, LAC; Rozo, AM; Trujillo, MM. 2011. Ensayo preliminar sobre la utilización de un medidor portátil de clorofila para estimar el nitrógeno foliar en orégano (*Origanum vulgare* L.). *Revista Facultad de Ciencias Básicas* 7(2):150-165.
- Muñoz-Huerta, RF; Guevara-Gonzalez, RG; Contreras-Medina, LM; Torres-Pacheco, I; Prado-Olivarez, J; Ocampo-Velazquez, RV. 2013. A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. *Sensors* 13(8):10823-10843.
- Ni, Z; Kim, ED; Chen, ZF. 2009. Chlorophyll and starch assays: Protocol exchange. Texas, USA. p. 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1038/nprot.2009.12>
- Opti-Sciences. 2012. OS-30p+ Chlorophyll fluorometer: Field portable handheld instrument designed for Fv/FM, Fv/F0, and advanced OJIP measurements (en línea). Consultado oct. 2019. Disponible en <https://www.optisci.com/os30p.html>
- Padilla, FM; De Souza, R; Peña, MT; Gallardo, M; Giménez, C; Thompson, RB. 2018b. Different responses of various chlorophyll meters to increasing nitrogen supply in sweet pepper. *Frontiers in Plant Science* 9:1752.
- Padilla, FM; Gallardo, M; Peña, MT; De Souza, R; Thompson, RB. 2018a. Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: a review. *Sensors* 18(7):1-23. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18072083>
- Padilla, FM; Peña, MT; Gallardo, M; Giménez, C; Thompson, RB. 2017. Derivation of sufficiency values of a chlorophyll meter to estimate cucumber nitrogen status and yield. *Computers and Electronics in Agriculture* 141:54-64.
- Padilla, FM; Thompson, RB; Peña, MT; Gallardo, M. 2018c. Reference values for phenological phases of chlorophyll meter readings and reflectance indices for optimal N nutrition of fertigated tomato. *Acta Horticulturae* 1192:65-72.
- Pardos, JA. 2004. Respuestas de las plantas al anegamiento del suelo. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 13(1):101-107.
- Parry, C; Blonquist JR; Bugbee, B. 2014. In situ measurement of leaf chlorophyll concentration: analysis of the optical/absolute relationship. *Plant, cell & environment* 37(11):2508-2520.
- Pérez-Molina, JP; Castro Lara, R; Portuguez Brenes, I; Araya Trejos, V; Quesada Traña, A. 2020. Chlorophyll fluorescence and biomass partitioning within light and nitrogen deficiency: An example of the use of the R programming language for teaching. *Cuadernos de Investigación UNED* 12(1):92-105.
- Quesada, G. 2015. Producción de chile dulce en invernadero bajo diferentes niveles de agotamiento en la humedad del sustrato. *Agronomía Costarricense* 39(1):25-36.
- Rahn, CR; Zhang, K; Lill Ywhite, R; Ramos, C; Doltra, J; De Paz, JM; Doltra, J; Riley, H; Fink, M; Nendel, C; Thorup-Kristensen, K; Pedersen, A; Piro, F; Venezia, A; Firth, C; Schmutz, U; Rayns, F; Strohmeier, K. 2010. EU-Rotate_N - A decision support system - to predict environmental and economic consequences of the management of nitrogen fertiliser in crop rotations. *European Journal of Horticultural Science* 75(1):20-32.
- Rambo, L; Ma, BL; Xiong, I; Silva, PRF. 2010. DA. Leaf and canopy optical characteristics as crop-N-status indicators for field nitrogen management in corn. *Journal Plant Nutrient Soil Science* 173(3):434-443.
- Ramirez, MB; Allen, PB; Freeland, RS; Wilkerson, JB. 2015. Ground-based NDVI sensing: separating the ground surface from the cotton canopy. *Transactions of the ASABE* 58(3):597-605.
- Sainju, UM; Ghimire, R; Pradhan, GP. 2019. Nitrogen Fertilization I: Impact on Crop, Soil, and Environment. In Rigobelo, EC; Serra, AP (eds.). *Nitrogen fixation*. Intech Open, London. p. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.86028>

- SCU (Science Communication Unit). 2013. Nitrogen pollution and the European environment. University of the West of England (en línea). Consultado oct. 2019. Disponible en https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/IR6_en.pdf
- Soto-Bravo, F; Araya-Cubero, E; Echandi-Gurdian, C. 2020. Efecto de la densidad de siembra y volumen de sustrato sobre parámetros de riego y rendimiento de chile dulce ‘dulcítico’, en hidroponía bajo invernadero. *Agronomía Costarricense* 44(1):43-64.
- ST (Spectrum Technologies). 2009. SPAD 502 Plus Chlorophyll meter: Product manual (en línea). Consultado feb. 2019. Disponible en <https://www.specmeters.com>
- Taskos, DG; Koundouras, S; Stamatiadis, S; Zioziou, E; Nikolaou, N; Karakioulakis, K; Theodorou, N. 2015. Using active canopy sensors and chlorophyll meters to estimate grapevine nitrogen status and productivity. *Precision Agriculture* 16(1):77-98.
- UNE-EN (Una Norma Española-European Norm) 13041. 2007. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo: Determinación de propiedades físicas. Densidad aparente seca, volumen de aire, de agua, valor de contracción y porosidad total. Madrid, España, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 25 p.
- Wu, X; Guo, J; Zhao, C; Chen, L; Zhang, Y; Fang, Z; Yang, YY. 2012. Research and application of non-destructive testing diagnosis technology of tomato. *Sensor Letters* 10(1-2):666-669.
- Xiong, D; Chen, J; Yu, T; Gao, W; Ling, X; Li, Y; Huang, J. 2015. SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Scientific reports* 5(13389).
- Yang, J; Gong, W; Shi, S; Du, L; Sun, J; Song, S; Chen, B; Zhang, Z. 2016. Analyzing the performance of fluorescence parameters in the monitoring of leaf nitrogen content of paddy rice. *Scientific Report* 6:28787. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep28787>
- Yasuor, H; Ben-Gal, A; Yermiyahu, U; Beit-Yannai, E; Cohen, S. 2013. Nitrogen management of greenhouse pepper production: Agronomic, nutritional, and environmental implications. *HortScience* 48(10):1241-1249.
- Zhang, K; Liu, X; Ma, Y; Zhang, R; Cao, Q; Zhu, Y; Tian, Y. 2019. A comparative assessment of measures of leaf nitrogen in rice using two leaf-clip meters. *Sensors* 20(1):175.
- Zhu, J; Tremblay, N; Liang, Y. 2012. Comparing SPAD and at LEAF values for chlorophyll assessment in crop species. *Canadian Journal of Soil Science* 92(4):645-648.



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

RESPUESTA PRELIMINAR DE LA CANAVALIA A LA INOCULACIÓN MICORRÍZICA EN UN AMBIENTE EDÁFICO DE JIBACOA

Yusdel Ferrás-Negrín^{1/*}, Ramón Rivera-Espinosa², Vidalina Pérez-Salina³, Ciro Sánchez-Esmori⁴

Palabras clave: biofertilizante; *Canavalia ensiformis*; incremento productivo; inoculantes micorrízicos.

Keywords: biofertilizer; *Canavalia ensiformis*; productive increase; mycorrhizal inoculants.

Recibido: 11/04/23

Aceptado: 03/07/23

RESUMEN

Introducción. *Canavalia ensiformis* ampliamente utilizada como abono verde, presenta beneficios comprobados por la inoculación micorrízica. La efectividad de los inoculantes micorrízicos arbusculares utilizados en Cuba dependen de la condición edáfica en que se desarrolla el cultivo; sin embargo, hay pocos resultados experimentales en suelos Cambisol *éutrico* crómico de Jibacoa. **Objetivo.** Evaluar en este suelo la respuesta de la canavalia a la aplicación de 3 inoculantes micorrízicos. **Materiales y métodos.** La investigación se realizó en la Estación Experimental Agro-Forestal de Jibacoa, provincia Villa Clara, Cuba. En un diseño completamente aleatorizado se estudiaron 3 inoculantes formulados con las cepas INCAM-2/*Funneliformis mosseae*, INCAM-4/*Glomus cubense* e INCAM-11/*Rizhophagus irregularis* y un control sin inocular. En el momento que

floreció la canavalia se evaluó: la cantidad de nódulos efectivos; la altura; la masa seca de la raíz, del tallo, de las hojas, la total y se determinó el índice de eficiencia. **Resultados.** La canavalia presentó una respuesta positiva y diferenciada a la inoculación micorrízica. La inoculación con INCAM-2 incrementó significativamente la cantidad de nódulos efectivos (21,9%) con valores superiores al tratamiento control y a la inoculación con INCAM-4, además originó la mayor altura con aumentos del 66,1%, superiores ($p < 0,05$) a las encontradas con los otros inoculantes. INCAM-2 siempre provocó valores superiores de masa seca ($p < 0,01$) en cualquiera de los órganos y la total en relación con el tratamiento control, no obstante, no se diferenciaron ($p < 0,01$) a los obtenidos con los otros inoculantes, los cuales no siempre se diferenciaron del tratamiento control. La respuesta se ordenó de acuerdo con la masa seca total como sigue: INCAM-2 con

* Autor para correspondencia. Correo electrónico: nutricion2@inafjibacoa.vcl.minag.cu

1 Instituto de Investigaciones Agro-Forestales, Estación Experimental Agro-Forestal Jibacoa, Manicaragua, Villa Clara, Cuba.

 0000-0001-7897-0128.

2 Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. San José, Mayabeque, Cuba.

 0000-0001-6621-7446.

3 Instituto de Investigaciones Agro-Forestales, Estación Experimental Agro-Forestal Jibacoa, Manicaragua, Villa Clara, Cuba.

 0009-0003-1348-9685.

4 Instituto de Investigaciones Agro-Forestales, Estación Experimental Agro-Forestal Jibacoa, Manicaragua, Villa Clara, Cuba

 0000-0001-8532-8678.

71,90% > INCAM-11 con 50,17% > INCAM-4 con 38,29%. **Conclusiones.** La canavalia presentó una respuesta positiva a la inoculación micorrízica en el suelo Cambisol éutrico crómico con incrementos en su nodulación, crecimiento y producción de masa seca. El inoculante INCAM-2 siempre resultó el más efectivo.

ABSTRACT

Preliminary response of canavalia to mycorrhizal inoculation in an edaphic environment of Jibacoa. Introduction. *Canavalia ensiformis*, widely used as green manure, has proven benefits from mycorrhizal inoculation. The effectiveness of the arbuscular mycorrhizal inoculants used in Cuba depend on the edaphic condition in which the crop develops, however there are no experimental results on eutric chromic cambisol soils from Jibacoa. **Objective.** Evaluate in this soil the response of canavalia to the application of 3 mycorrhizal inoculants. **Materials and methods.** The research was carried out at the Jibacoa Agro-Forestry Experimental Station, Villa Clara province, Cuba. In a completely randomized design, 3 inoculants formulated with the strains INCAM-2/*Funneliformis mosseae*, INCAM-4/*Glomus cubense* and INCAM-11/

Rizhophagus irregularis and a control without inoculation were studied. At the time that the canavalia flowered, the following were evaluated: the number of effective nodules; the height; the dry mass of the root, stem, leaves, total and the efficiency index was determined. **Results.** Canavalia presented a positive and differentiated response to mycorrhizal inoculation. The inoculation with INCAM-2 significantly increased the number of effective nodules (21.9%) with values higher than the control treatment and the inoculation with INCAM-4, it also caused the greatest height with increases of 66.1%, higher ($p < 0.05$) to those found with the other inoculants. INCAM-2 always caused higher values of dry mass ($p < 0.01$) in any of the organs and total in relation to the control treatment, however, they did not differ ($p < 0.01$) from those obtained with the other inoculants, which did not always differ from the control treatment. The response based on total dry mass was ordered as follows: INCAM-2 with 71.90% > INCAM-11 with 50.17% > INCAM-4 with 38.29%. **Conclusions.** Canavalia presented a positive response to mycorrhizal inoculation in the eutric chromic cambisol soil with increases in its nodulation, growth and dry mass production. The INCAM-2 inoculant was always the most effective.

INTRODUCCIÓN

El suministro racional de nutrientes en los agroecosistemas es una necesidad para garantizar rendimientos altos y mantener o mejorar la fertilidad del suelo. En Cuba se fertiliza aproximadamente el 20% de las áreas agrícolas, lo que contribuye a los bajos rendimientos e influye negativamente en la fertilidad del suelo (Rodríguez 2023).

El uso de leguminosas en la agricultura posee numerosas ventajas, entre ellas: es una práctica para el control de la erosión y las plantas invasoras, incrementa la retención de la humedad, evita los aumentos de la temperatura del suelo, aporta nitrógeno por la vía de fijación

biológica y el reciclaje de los nutrientes presentes en su biomasa al incorporarse, lo cual mejora la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Bustamante *et al.* 2022).

La canavalia [*Canavalia ensiformis* (L) D.C)] es una de estas leguminosas. En Cuba ha quedado clara su respuesta positiva a la aplicación de inoculantes micorrízicos con incrementos en biomasa, en las cantidades de macronutrientes extraídos, en la fijación biológica de nitrógeno, así como en los indicadores de funcionamiento micorrízico (García *et al.* 2017, Ferrás *et al.* 2018, Simó *et al.* 2020).

Las micorrizas arbusculares reciben fuentes carbonadas provenientes de la planta, mientras que a través de las estructuras fúngicas se

amplía la capacidad de exploración del suelo, con incrementos en la absorción de nutrientes, agua, mayor crecimiento y desarrollo de las plantas y establecimiento de cooperación con otros microorganismos edáficos (Jansa *et al.* 2019, Ojeda *et al.* 2019). También pueden ocasionar efectos no relacionados directamente con la nutrición, como: disminución del daño ocasionado por patógenos tanto foliares como radicales, mejoras en los agregados del suelo y participación en el ciclo del carbono con incremento de la productividad vegetal, mayor resiliencia del agroecosistema e influye en la dinámica de las comunidades de microorganismos (Rillig *et al.* 2019, Medina 2022).

La integración de la canavalia inoculada con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en los sistemas de suministro de nutrientes de los cultivos, garantiza rendimientos altos con menores dosis de fertilizantes y con mayores beneficios que los ya obtenidos con la simple aplicación de los inoculantes micorrízicos (Rivera *et al.* 2023). La utilización de esta especie inoculada tanto precedente como intercalada resulta una vía para micorrizar de manera eficiente en los cultivos, lo cual disminuye las cantidades de inoculantes y controla la vegetación indeseable (Rivera *et al.* 2020a, Bustamante *et al.* 2022).

Los 3 inoculantes micorrízicos que comúnmente se utilizan en Cuba se formulan con base en cepas de HMA generalistas con las especies vegetales, cuya efectividad responde a la condición edáfica en que se desarrolla el cultivo (Rivera *et al.* 2023). Los suelos Cambisol éutrico crómico (WRB 2014), en el macizo Guamuhaya

donde la actividad cafetalera es fundamental, ocupan 58 750 ha, y son los más representativos con el 36,22% del área (Soto *et al.* 2002); sin embargo, no se dispone de abundante información de la efectividad de estos inoculantes en dicho suelo.

Esta investigación fue parte de las acciones preliminares del programa de trabajo encaminado al desarrollo de sistemas de suministro de nutrientes para el café, basados en bioproductos, abonos verdes y otras fuentes locales de nutrientes, en la región central de Cuba. Por tales razones, el objetivo fue evaluar la respuesta de la canavalia a la aplicación de 3 inoculantes micorrízicos y encontrar cuál de estos resultará más efectivo en condiciones edáficas de Jibacoa.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó de agosto a noviembre del 2019 en la Estación Experimental Agro-Forestal de Jibacoa a una altura de 340 msnm y ubicada a los 22° 00' 00.0" N y 79° 50'00.0"O en el municipio Manicaragua, provincia Villa Clara, Cuba. Esta localidad se caracteriza por tener precipitaciones promedio de 2141 mm anuales, una temperatura media 23,2°C, con humedad relativa del 82% (González 2009). El suelo donde se desarrolló el experimento (Tabla 1) corresponde con un suelo cambisol éutrico crómico (WRB 2014), que presentó pH-KCl ligeramente ácidos y bajos contenidos de materia orgánica posiblemente asociados al relieve ondulado en que se encuentra.

Tabla 1. Características físico – químicas del suelo en los primeros 20 cm de profundidad. Octubre 2019.

Tipo de suelo	pH, KCl	MO, %	P ₂ O ₅ mg 100 g ⁻¹ suelo	K ₂ O
Cambisol éutrico crómico, WRB (2014)	5,29	2,17	8,87	11,97

Cada valor de la Tabla 1 representa el promedio de 3 muestras de suelo tomadas a una profundidad de 0 a 20 cm. Se hizo uso de los métodos analíticos utilizados por González *et al.* (2017), estos fueron:

- pH por el método potenciométrico en KCl (1 N); relación suelo-solución 1:2,5.
- Materia orgánica (%), Walkley - Black. Colorimetría. Oxidación con dicromato de potasio 1N y ácido sulfúrico concentrado.
- P₂O₅ y K₂O por el método de Oniani. Fósforo por Colorimetría y Potasio por fotometría de llama. Extracción con ácido sulfúrico 0,1 N, relación suelo - solución 1:2,5; 3 minutos.

El experimento se desarrolló en macetas. En 4 tratamientos distribuidos en un diseño aleatorizado, se utilizaron por cada uno 30 bolsas de polietileno negro de 7,4 kg con orificios en el fondo.

Descripción de los tratamientos

- 1- Tratamiento control: siembra de semillas de canavalia sin inoculación de micorriza.
- 2- Siembra de semillas de canavalia con inoculación de *Funneliformis mosseae* [(Schüßler y Walker 2010)/INCAM-2].
- 3- Siembra de semillas de canavalia con inoculación de *Glomus cubense* [(Rodríguez *et al.* 2011)/INCAM-4, DAOM241198].
- 4- Siembra de semillas de canavalia con inoculación de *Rhizoglyphus irregularis* [(Sieverding *et al.* 2014) syn. *Rizhophagus irregularis* /INCAM-11, DAOM711363].

Los inoculantes utilizados pertenecen a la colección del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Han sido evaluados en diferentes cultivos y tipos de suelo (Rivera *et al.* 2020b) y se identificaron con el código del aislado en cuestión (INCAM-2, INCAM-4 e INCAM-11).

$$\text{Efectividad inoculante}_i = \frac{(\text{Biomasa tto inoculado}_i - \text{Biomasa tto control}) \times 100}{\text{Biomasa tto control}}$$

Donde

i = cada uno de los inoculantes evaluados

tto = tratamiento

Preparación y aplicación de inoculantes

Los inoculantes se prepararon a partir de la aplicación de cada aislado de HMA con un alto grado de pureza, a semillas de *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D. Webster y se cultivaron en un sustrato específico (Fernández *et al.* 2000). Transcurridos 4 meses, se cortaron las plantas y se extrajo el sustrato enriquecido con propágulos micorrízicos. Este material se secó a temperatura ambiente a la sombra y se molió en forma de polvo (89% <0,84 mm). Los inoculantes consistían en una mezcla de material del sustrato con los referidos propágulos. El contenido de esporas se encontró entre 30 y 35 esporas.g⁻¹, así como cantidades indeterminadas de micelio y raíces infectivas.

La inoculación se realizó vía recubrimiento de las semillas. Para esto se preparó una mezcla de una cantidad de inóculo sólido equivalente al 10% del peso de las semillas y agua en una proporción de 60 mL de agua por cada 100 g de inóculo (Ojeda *et al.* 2018). Las semillas se recubrieron con esta pasta y se dejaron secar a la sombra por 2 horas antes de sembrar, luego se colocaron 2 por cada bolsa y después de la germinación se seleccionó una planta por bolsa.

Evaluaciones

Se seleccionaron 8 plantas representativas en cada tratamiento y en el momento de la floración (90 días después de la siembra) se realizaron las siguientes evaluaciones:

- 1- Cantidad de nódulos efectivos por planta (U).
- 2- Altura (m).
- 3- Masa seca de la raíz, del tallo y las hojas (g). Se calculó la masa total y se expresó en g.planta⁻¹.
- 4- Se determinó la efectividad de los inoculantes (IE) o la respuesta de la canavalia a la inoculación (Rivera *et al.* 2020a) a partir de:

Análisis estadístico

A los datos se les realizaron las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianza. La comparación de las medias se realizó mediante la prueba de rangos múltiples de Duncan para $p \leq 0,05$. El procesamiento estadístico de los datos se realizó con el programa InfoStat versión 1.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las plantas de canavalia mostraron una alta nodulación en todos los tratamientos (Figura 1),

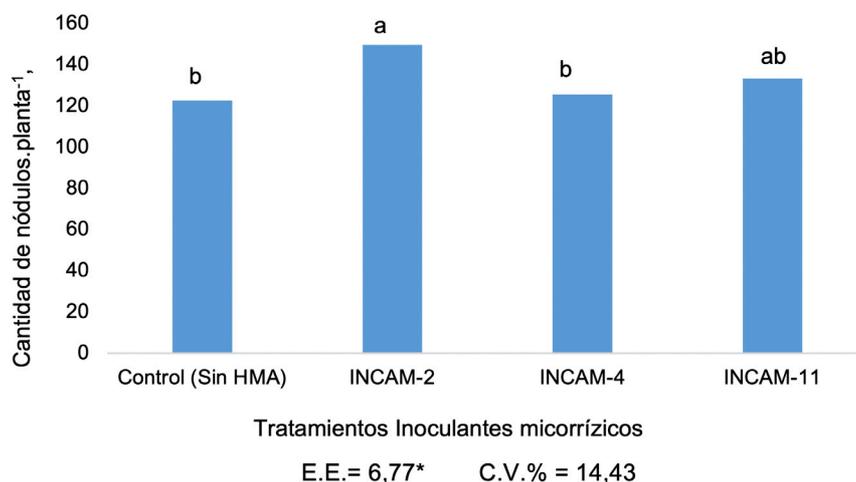


Figura 1. Efecto de los inoculantes micorrízicos en la producción de nódulos de la canavalia en floración (90 días después de la siembra). Suelo Cambisol éutrico crómico (WRB 2014).

* Letras desiguales conllevan a diferencias significativas entre los efectos de los tratamientos por prueba de Duncan para $p \leq 0,05$.

Las plantas de canavalia presentaron una respuesta positiva y significativa en la nodulación cuando las semillas fueron recubiertas con INCAM-2. Este inoculante fue el único que propició diferencias significativas ($p \leq 0,05$), con un incremento del 21,91% en comparación al tratamiento control. En otras investigaciones también se ha reportado que esta leguminosa ha respondido de forma positiva a la inoculación de estos biofertilizantes.

posiblemente relacionado con la baja inespecificidad de esta especie vegetal con los rizobios y su carácter promiscuo (Hernández *et al.* 2012). En este tipo de suelo de igual localidad, pero con una mayor acidez, pH 4,07; se obtuvieron en esta especie de abono verde valores muy bajos de nodulación, entre 7 y 11 nódulos por planta, sin respuesta a la aplicación de inoculantes a base INCAM-4 y de cepas de rizobios, posiblemente asociado a la extremada acidez del suelo (Ferrás *et al.* 2018).

La canavalia cultivada en un suelo Pardo Sialítico Mullido Carbonatado con pH 6,9; reveló los mejores resultados al aplicar INCAM-11 (Tamayo *et al.* 2021). Explicable a los cambios de efectividad de los inoculantes con la reacción del suelo (Rivera *et al.* 2023).

En los cultivos de la soya (*Glycine max* (L) Merr. cv NS-4611) (Faggioli *et al.* 2020) y del frijol (*P. vulgaris* cv. Negro Michigan) (Lara *et al.* 2019) la inoculación micorrízica incrementó

la cantidad de nódulos en un 21,01% y 67,8% respectivamente. Estos resultados indican el efecto beneficioso que causa este biofertilizante sobre la nodulación en las plantas leguminosas.

Incrementos en la colonización micorrízica, optimizan la absorción de fósforo y otros elementos esenciales (Ortas y Rafique 2017), lo cual potencia el crecimiento del cultivo, incrementa las necesidades de nitrógeno de este, a la vez se impulsa la nodulación bacteriana y la correspondiente fijación de nitrógeno (Bulgarelli *et al.* 2017) para que la planta pueda garantizar

estas necesidades. La simbiosis tripartita como expresión de mecanismos complementarios, origina incrementos tanto en el funcionamiento micorrízico como en la fijación biológica del nitrógeno (Yasmeen *et al.* 2012).

Las plantas de canavalia presentaron una respuesta positiva en la altura ($p \leq 0,05$) a la aplicación de cualquiera de los inoculantes. Los mayores incrementos fueron del 66,1% con la aplicación de INCAM-2, los cuales fueron superiores ($p \leq 0,05$) a los obtenidos con los otros 2 inoculantes (Figura 2).

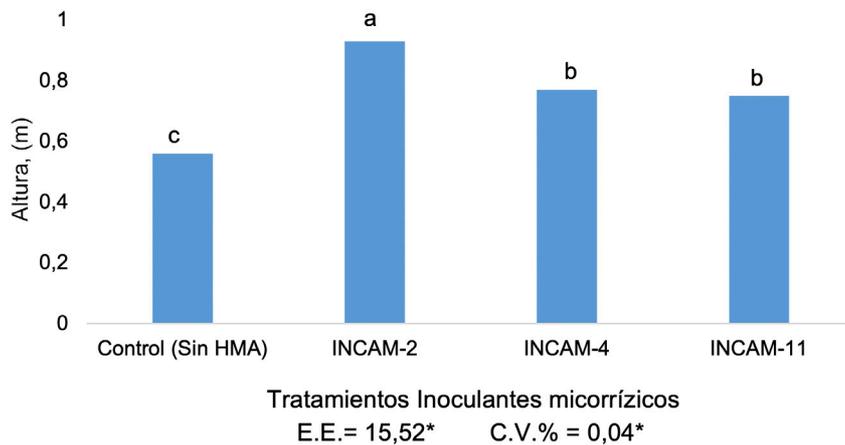


Figura 2. Efectividad de los inoculantes en la altura (cm) de la canavalia en floración (90 días después de la siembra). Suelo Cambisol útrico crómico (WRB 2014).

* Letras desiguales conllevan a diferencias significativas entre los efectos de los tratamientos por prueba de Duncan para $p \leq 0,05$.

Estos resultados una vez más avalan el papel favorecedor de la micorrización en el crecimiento de los cultivos y la necesidad de realizar esta investigación. En relación con este trabajo, Ojeda *et al.* (2018) expresaron que las leguminosas son plantas que responden vigorosamente a la inoculación con HMA. Además, corroboraron que estudios de comparación de inoculantes en Cuba han demostrado la existencia de una alta

especificidad por ambiente edáfico, lo que podría explicar las respuestas diferenciadas encontradas al aplicar uno u otro inoculante.

La producción de masa seca de cualquiera de los órganos y de la masa seca total también mostró respuesta positiva ($p \leq 0,05$) a la inoculación. De forma general los mejores efectos se encontraron con la aplicación de INCAM-2, pues, aunque no se diferenciaron significativamente de

las obtenidas con los otros 2 inoculantes (Tabla 2), siempre fueron superiores a las obtenidas con el tratamiento sin inoculación. Además, el mayor

incremento relativo (71,9%) de la masa seca total se encontró al aplicar INCAM-2 (Tabla 2).

Tabla 2. Respuesta de masa seca e IE de la canavalia a la aplicación de diferentes inoculantes micorrizicos. Suelos Cambisol éutrio crómico (WRB 2014).

Tratamientos	Masa seca, g.planta ⁻¹				IE*
	Raíz	Tallo	Hoja	Masa seca total	
Control (Sin HMA)	1,50 b	3,08 b	7,20 b	11,78 b	-
INCAM-2	3,34 a	6,53 a	10,38 a	20,25 a	71,90
INCAM-4	3,23 a	4,83 ab	8,23 ab	16,29 a	38,29
INCAM-11	3,20 a	5,06 a	9,43 ab	17,69 a	50,17
C.V., %	16,59	26,77	21,59	19,03	
E.E.	0,17**	0,46**	0,67**	1,11**	

* Efectividad del inoculante.

** Letras desiguales en una misma columna conllevan a diferencias significativas entre los efectos de los tratamientos por prueba de Duncan para $p \leq 0,01$.

Estos resultados coincidieron con los referidos por Ojeda *et al.* (2018), quienes al recubrir la semilla de canavalia con estos 3 inoculantes en un suelo Pardo Grisáceo con pH (H₂O) 5,68, obtuvieron IE entre 59% y 90,8%. Plantearon, además, que este índice debe ser tomado en cuenta en cualquier análisis de la efectividad hongo/planta hospedera, ya que muestra cómo puede influir la simbiosis sobre el rendimiento, en relación con el tratamiento control.

Resultados reportados por Rivera *et al.* (2020b), establecieron que la canavalia crecida en 8 condiciones edáficas diferentes, siempre presentó una respuesta positiva y significativa a la inoculación micorrízica, expresada en diferentes variables morfológicas, biomasa y contenidos de macronutrientes. El inoculante que provocó los mejores resultados no fue el mismo en todas las condiciones edáficas, lo cual se consideró a este factor determinante para condicionar su eficiencia. Cuando los suelos presentaron valores del pH (H₂O) entre 4,7 a 5,8, los mayores efectos se alcanzaron al aplicar INCAM-2.

En un suelo Húmico Carbonatado con pH (H₂O) entre 7,80 a 7,90 la canavalia no presentó respuesta significativa a la inoculación

con INCAM-2; sin embargo, la aplicación de INCAM-11 incrementó significativamente la masa seca aérea en un 83,5% en comparación al tratamiento control (Simó *et al.* 2019); lo cual evidencia la importancia de realizar esta investigación para las condiciones edáficas donde se desarrolló.

En estudios donde se evaluaron las respuestas de 6 leguminosas (*Clitoria ternatea* L., *Calopogonium mucunoides* Desv., *Stylosanthes guianensis* Abul., *Crotalaria juncea* L., *Canavalia ensiformis* L. y *Mucuna pruriens* L.) a la micorrización en un suelo con pH 4,6 sin esterilizar, revelaron índice de respuesta de la masa seca del 71,90; 73,67; 67,17; 38,73; -8 y -13,75% respectivamente (Trejo *et al.* 2021). Estos autores concluyeron que la respuesta de planta a la inoculación micorrízica es independiente del porcentaje de colonización y del inóculo aplicado; esto sugiere, que la respuesta pudiera deberse al tipo de planta o suelo donde se aplique el inóculo.

En el cultivo del *Coffea arabica* L al comparar 12 inoculantes nativos de HMA con un tratamiento control (sin HMA) se obtuvo que con todos se incrementó la altura (desde el 11,1 hasta el 31,5%), la masa seca de la raíz (desde el 38,9

hasta el 163,9%) y el área foliar (desde el 18 hasta el 86,8%), con diferencia significativa entre los tratamientos investigados (Vallejos *et al.* 2019). Estos autores expresaron que esta diferencia se pudo deber a la procedencia de los consorcios micorrízicos y las condiciones particulares del suelo. Por tales motivos resalta la importancia de realizar investigaciones en los lugares donde se desea implementar estas tecnologías beneficiosas con el fin de optimizar los resultados con la selección de la mejor opción.

La información mostrada en esta investigación corrobora lo expuesto por Sisalima *et al.* (2023), cuando se refirieron a que los HMA han sido ampliamente utilizados en la producción agrícola y constituyen un medio importante para la sostenibilidad al aumentar la producción de los cultivos.

CONCLUSIONES

La canavalia presentó una respuesta positiva a la inoculación micorrízica en el suelo Cambisol éutrico crómico, con incrementos en su nodulación, crecimiento y producción de masa seca. El inoculante INCAM-2 siempre resultó el más efectivo.

LITERATURA CITADA

- Bulgarelli, RG; Castro MF; Ribeiro, RV; López de Andrade, S. 2017. Mycorrhizae enhance nitrogen fixation and photosynthesis in phosphorus starved soybean (*Glycine max* L. Merrill). *Environmental and Experimental Botany* 140:26-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.05.015>
- Bustamante, CA; Ferrás, Y; Hernández, I; Rivera, R. 2022. Beneficios del intercalamiento de canavalia inoculada con hongos micorrízicos y *Rhizobium* en caféto (*Coffea canephora* var. Robusta). *Agronomía Mesoamericana* 33(2):46288. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.46288>
- Faggioli, VS; Cabello, M; Melchiorre, NM; Covacevich, F. 2020. Contribución de hongos micorrízicos nativos a la nutrición fosforada y su impacto en la partición de fotoasimilados de soja. *Cienc. Suelo (Argentina)* 38(1):81-94. Consultado 16 ene. 2022. Disponible en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v38n1/v38n1a08.pdf>
- Fernández, F; Gómez, R; Vanegas, LF; Martínez, MA; de la Noval, B; Rivera, R. 2000. Producto Inoculante micorrizógeno. Certificado N°. 22641. Oficina Cubana de la Propiedad Industrial, La Habana, Cuba. s. p.
- Ferrás, Y; Bustamante, CA; Hernández, I; Delgado, I; Viñals, R. 2018. Influencia de la coinoculación de micorriza y cepas de *Rhizobium* en el desarrollo de *Canavalia ensiformis*. *Revista cubana Café y Cacao* 17(2):23-29.
- García, M; Rivera, R; Cruz, Y; Acosta, Y; Cabrera, JR. 2017. Respuesta de *Canavalia ensiformis* (L.) a la inoculación con diferentes cepas de hongo micorrízico arbuscular en un suelo FAREL. *Cultivos Tropicales* 38(1):7-12. Consultado 16 ene. 2022. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v38n1/ctr01117.pdf>
- González, C. 2009. Efectos de la combinación de dolomita y materia orgánica en la producción de posturas de café. Tesis M.Sc. Cuba, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez". 54 p.
- González, C; Ferrás, Y; Meneses, I; Ortiz, N. 2017. Efecto del humus de lombriz en sustratos para la producción de posturas de caféto en suelo Ferralítico Lixiviado ácido. *Café y Cacao* 16(2):27-32.
- Hernández, I; Pérez, G; Nápoles, MC; Rosales, P; Baños, R; Ramirez, JF. 2012. Selección de aislados de rizobios provenientes de nódulos de la leguminosa forrajera *Canavalia ensiformis*. *Cultivos Tropicales* 33(3):27-33. Consultado 16 ene. 2022. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193223814004.pdf>
- Jansa, J; Forczek, ST; Rozmoš, M; Püschel, D; Bukovská, P; Hřelová, H. 2019. Arbuscular mycorrhiza and soil organic nitrogen: network of players and interactions. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 6:10. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-019-0147-2>
- Lara, L; Hernández, LG; Reyes, JJ; Preciado, P; Zulueta, R. 2019. Respuesta agronómica de *Phaseolus vulgaris* a la biofertilización en campo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(5):1035-1046. Consultado 16 ene. 2022. Disponible en <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/1842/1/PUB-ARTICULO-4457.PDF>
- Medina, LR. 2022. Los hongos micorrízicos arbusculares y su rol en los agroecosistemas. *Cultivos Tropicales* 43(1):e14. Consultado 26 ago. 2023. Disponible en <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/download/1650/3244>
- Ojeda, LJ; González, PJ; Rivera, R; Furrázola, E; de la Rosa, JJ; Hernández, ME; Rodríguez, YI; Hernández, C. 2018. Inoculación de *Canavalia ensiformis* con hongos micorrízicos arbusculares en la fase de establecimiento. *Pastos y Forrajes* 41(3):189-195. Consultado 16 ene. 2022. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v41n3/pyf05318.pdf>

- Ojeda, LJ; Rivera, R; González, PJ; de la Rosa, JJ; Arteaga, O; Hernández, C. 2019. Efecto del abono verde de *Canavalia ensiformis* (L.) micorrizada en el cultivo sucesor *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone Cuba CT-169. *Pastos y Forrajes* 42(4):277-284. Consultado 16 ene. 2022. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v42n4/2078-8452-pyf-42-04-277.pdf>
- Ortas, I; Rafique, M. 2017. The Mechanisms of Nutrient Uptake by Arbuscular Mycorrhizae. In Varma, A; Prasad, R; Tuteja, N (eds.). *Mycorrhiza - Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration*. Springer International Publishing AG. p 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68867-1>
- Rillig, MC; Aguilar, CA; Camenzind, T; Cavagnaro, RT; Degrune, F; Hohmann, P; Lammel, DR; Mansour, I; Roy, J; van der Heijden, MGA; Yang, G. 2019. Why farmers should manage the arbuscular mycorrhizal symbiosis? *New Phytologist* 222(3):1171-1175. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.15602>
- Rivera, R; Fernández, F; Ruiz, L; González, PJ; Rodríguez, Y; Pérez, E; Fernández, K; Martín, G; Simó, S; Sánchez, C; Riera, M; de la Noval, B; Ruiz, M; Hernández, A; Hernández, A; Plana, R; Ramírez, J; Bustamante, C; Espinosa, A;... Lara, D. 2020b. Manejo, integración y beneficios del biofertilizante micorrízico EcoMic[®] en la producción agrícola. Mayabeque, Cuba, Ediciones INCA. 151 p. Consultado 04 abr. 2023. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/340223155>
- Rivera, R; González, PJ; Ruiz, L; Martín, G; Cabrera, A. 2023. Strategic Combination of Mycorrhizal Inoculants, Fertilizers and Green Manures Improve Crop Productivity. Review of Cuban Research. In Qiang-Sheng, W; Ying-Ning, Z; Yue-Jun, H; Nong Zhou (eds.). "New Research on Mycorrhizal Fungus". Nova Publishers, USA. p. 55-112. DOI: 10.52305/GLXN2905
- Rivera, R; Martín, GM; Simó, JE; Pentón, G; García, M; Ramírez, J; González, PJ; Joao, JP; Ojeda, L; Tamayo, Y; Bustamante, C. 2020a. Benefits of joint management of green manure and mycorrhizal inoculants in crop production. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 23(97):1-18. DOI: <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3294>
- Rodríguez, JL. 2023. La coyuntura internacional y la economía cubana en 2022. Perspectivas de 2023. Parte I. Consultado 24 ago. 2023. Disponible en <https://www.cubaperiodistas.cu/index.php/2023/03/la-coyuntura-internacional-y-la-economia-cubana-en-2022-perspectivas-de-2023/>
- Rodríguez, Y; Dalpé, Y; Séguin, S; Fernández, K; Rivera, R. 2011. *Glomus cubense* sp. nov., an arbuscular mycorrhizal fungus from Cuba. *Mycotaxon* 118:337-347. Doi: <https://doi.org/10.5248/118.337>
- Schüßler, A; Walker, C. 2010. The Glomeromycota: a species list with new families and new genera. Gloucester: The Royal Botanic Garden Edinburgh, The Royal Botanic Garden Kew, Botanische Staatssammlung Munich, and Oregon State University. 58 p. Consultado 24 ago. 2023. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/285775809>
- Sieverding, E; Alves da Silva, G; Berndt, R; Oehl, F. 2014. *Rhizoglossum*, a new genus of the *Glomeraceae*. *Mycotaxon* 129 (2):373- 86. DOI: <https://doi.org/10.5248/129.373>
- Simó, JE; Rivera, R; Ruiz, LA; Díaz, G; Ruiz, M. 2019. Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi inoculated on *Canavalia ensiformis* L. in Calcaric Histosol soils. *Agronomía Mesoamericana* 30(2):395-405. Consultado 16 ene. 2022. Disponible en <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/33221/37652>
- Simó, J; Rivera, R; Ruiz, L; Martín, G. 2020. The Integration of AMF Inoculants, Green Manure and Organo-Mineral Fertilization, in Banana Plantations on Calcic Haplic Phaeozems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 23(08):1-15. Consultado 24 ago. 2023. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/340280093_the_integration_of_amf_inoculants_green_manure_and_organomineral_fertilization_in_banana_plantations_on_calcic_haplic_phaeozems_la_integracion_de_inoculantes_micorrizicos_abonos_verdes_y_abonamiento
- Sisalima, L; Ruilova, V; Capa, M. 2023. Efecto de inoculación micorrízica en la etapa productiva del cacao nacional (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonía ecuatoriana. *CEDAMAZ* 13(1):17-24. Consultado 27 ago. 2023. Disponible en <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/1742/1261>
- Soto, F; Vantour, A; Hernández, A; Planas, A; Figueroa, A; Fuentes, PO; Tejada, T; Morales, M; Vázquez, R; Zamora, E; Cutié, F; Vázquez, L; Caro, P. 2002. La zonificación agroecológica del *Coffea arabica* L. en Cuba. Macizos montañosos sierra maestray Guamuha. *Cultivos Tropicales* 23(1):35-44. Consultado 24 ago. 2023. Disponible en <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwizucrIkvuAAxWCQzABHRi2CDAQFnoECBAQAQ&url=https%3A%2F%2Fediciones.inca.edu.cu%2Findex.php%2Fediciones%2Farticle%2Fdownload%2F646%2Fpdf&usq=AOvVaw2vSVYDLjWVm8J2KK2mN79w&opi=89978449>
- Tamayo, Y; Martín, GM; Castañeda, E; Anselmo, C; Ramos, L; Santiago, GM; Rodríguez, Y. 2021. Selección de cepas eficientes de *Rhizobium* y micorrizas en *Canavalia ensiformis* (L.) D.C. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 8(1):13-24. Consultado 16 ene. 2022. Disponible en <https://rmae.voaxaca.tecnm.mx/wp-content/uploads/2020/11/articulo2.pdf>

- Trejo, D; Hernández, E; Baeza, Y; Pérez, G; Morgado, E; Banuelos, J. 2021. Efectividad de los hongos micorrízicos arbusculares introducidos y nativos en seis leguminosas coberteras. SCIENTIAFUNGORUM 51:e1320. Consultado 26 ago. 2023. Disponible en <https://www.scielo.org.mx/pdf/sf/v51/2594-1321-sf-51-e1320.pdf>
- Vallejos, G; Sánchez, T; García, MA; Trigoso, M; Arévalo, LA. 2019. Efecto de hongos formadores de micorrizas arbusculares en clones de café (*Coffea arabica*) variedad Caturra. Acta Agronómica 68(4):278-284. DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v68n4.72117>
- Yasmeen, T; Hameed, S; Tariq, M; Ali, S. 2012. Significance of arbuscular mycorrhizal and bacterial symbionts in a tripartite association with *Vigna radiate*. Acta Physiol Plant. 34(4). DOI: 10.1007/s11738-012-0950-x
- WRB (World Reference Base for Soil Resources). 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, update 2015: World soil resources [Reports 106]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Consultado 24 ago. 2023. Disponible en <https://www.amazon.com/-/es/Food-Agriculture-Organization-United-Nations-ebook/dp/B07BQ9XMCQ>



EFFECTO DE RETARDANTES DE CRECIMIENTO EN LA DISMINUCIÓN DEL VOLCAMIENTO DE SORGO DULCE FORRAJERO

Deisy Lorena Flórez-Gómez¹, Karen Viviana Osorio-Guerrero^{2/*}, Gustavo Adolfo Rodríguez-Yzquierdo³, Sair Jaramillo-Bonilla⁴, Luis Ernesto Ortégón-Herrera⁵, Evelin Gómez-Delgado⁶, Guillermo Alberto Brochero-Aldana⁷

Palabras clave: *Sorghum bicolor*; volcamiento; semilla; regulador de crecimiento; producción.

Keywords: *Sorghum bicolor*; lodging seed; growth regulator; production.

Recibido: 11/04/23

Aceptado: 22/08/23

RESUMEN

Introducción. Las plantas de sorgo dulce forrajero (*Sorghum bicolor* L. Moench) se caracterizan por presentar un porte alto, sin embargo, este atributo, junto con las condiciones variables del clima, favorecen el volcamiento de las plantas y dificulta la cosecha mecanizada de los lotes de producción de semilla certificada, lo que conlleva a la baja disponibilidad de semilla de calidad de esta especie. **Objetivo.** Como alternativa a

esta problemática, se probó el efecto de 3 retardantes de crecimiento sobre la producción de semilla de calidad en condiciones experimentales en campo. **Materiales y métodos.** Se evaluaron parámetros de crecimiento, volcamiento de las plantas y el rendimiento a semilla. La investigación se llevó a cabo en 2 localidades ubicadas en el valle cálido alto del Magdalena y el Caribe seco colombiano. Se empleó un diseño de bloques completos al azar con 3 repeticiones y 6 tratamientos, conformados por la aplicación

* Autora para correspondencia. Correo electrónico: kosorio@agrosavia.co

1 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA, Sede Central, Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

 0000-0003-3676-7564.

2. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA, Sede Central, Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

 0000-0002-9252-9993.

3 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA, Sede Central, Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

 0000-0003-3709-8534.

4 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA, Centro de Investigación Nataima, El Espinal, Tolima, Colombia.

 0000-0003-1297-7444.

5 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA, Centro de Investigación Nataima, El Espinal, Tolima, Colombia.

 0000-0002-7693-8295.

6 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA, Centro de Investigación Motilonia, Agustín Codazzi, Cesar, Colombia.

 0000-0003-4183-7539.

7 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA, Centro de Investigación Motilonia, Agustín Codazzi, Cesar, Colombia.

 0000-0002-6713-4180.

de dosis variables de etefón, cloruro de mepiquat y trinexapac-etil, en 2 estados de desarrollo de la planta (1 y 3). **Resultados.** En los 2 ambientes, la aplicación de trinexapac-etil a razón de 200 g i.a.ha⁻¹ tuvo un mayor efecto en la reducción de la altura de la planta y una reducción del 89,2 en el porcentaje de volcamiento respecto al testigo en la localidad del Caribe seco colombiano, lo que incrementó el rendimiento de semilla aproximadamente 3 veces respecto al testigo en esta localidad y sin diferencias significativas en comparación con el control en la localidad del Valle Cálido del alto del Magdalena. **Conclusión.** Los resultados de esta evaluación permiten concluir que el uso de trinexapac-etil es una alternativa para mejorar la producción de semilla de calidad de sorgo dulce forrajero al reducir el porte de las plantas y con ello el volcamiento. La respuesta es dependiente del tipo de retardante y las condiciones edafoclimáticas.

ABSTRACT

Effect of growth retardants on reducing lodging in sweet forage sorghum. Introduction. Forage sweet sorghum plants (*Sorghum bicolor* L. Moench) are characterized by tall height; however, this attribute and variable weather conditions favor the overturning of the plants and make the mechanized harvest of lots difficult

INTRODUCCIÓN

El cultivo de sorgo dulce forrajero (*Sorghum bicolor* L. Moench) es una opción para ser incorporada en los sistemas ganaderos, dada su capacidad de adaptación a las variaciones climáticas y en especial a periodos largos de sequía. Presenta una mayor tolerancia a este factor climático en comparación con cultivos como el maíz, que además posee una alta demanda hídrica (Amombo *et al.* 2022).

for certified seed production, leading to the low availability of quality seed of this species. **Objective.** As an alternative to this problem, the effect of 3 growth retardants were tested. The production quality seed, growth parameters, plant settling, and seed yield were evaluated. **Materials and methods.** The research was carried out in 2 locations located in the warm upper Magdalena Valley and the dry Caribbean of Colombian. A complete block design was used, randomized with 3 repetitions and 6 treatments was used, consisting of the application of variable doses of ethephon, mepiquat chloride, and trinexapac-ethyl in 2 plant development stages (1 and 3). **Results.** In both environments, the application of trinexapac-ethyl at a rate of 200 g i.a.ha⁻¹ had a greater effect on reduction of plant height and a reduction of 89.2 in the percentage of toppling compared to the control in the dry Caribbean Colombian location, which increased seed yield by approximately 3 times compared to the control in this locality and without significant differences compared to the control in the warm upper Magdalena valley location. **Conclusion.** The results of this evaluation allow us to conclude that the use of trinexapac-ethyl is an alternative for the production of quality sweet forage sorghum seed and to reduce plant height and in therefore plant overturning. The observed response was dependent of the type of growth retardant and edaphoclimatic conditions.

En Colombia, el principal uso de este cultivo es como complemento en la alimentación animal, como forraje verde o transformado en harina procesada (Godoy 2016). De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR 2018) el cultivo de sorgo dulce forrajero se siembra en aproximadamente 12 930 hectáreas y tienen un rendimiento potencial de forraje de 50 t.ha⁻¹. Su distribución en el país es amplia y los principales departamentos adoptantes del cultivo son Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, Huila, Magdalena, Meta y Sucre.

Los sorgos dulces forrajeros se caracterizan por presentar tallos gruesos, bajo contenido de fibras estructurales que facilitan la digestibilidad en animales, alto contenido de azúcares fermentables, volumen alto de biomasa, bajo rendimiento de semilla y altura de planta que pueden superar los 4 metros de altura (Rodríguez-Gómez *et al.* 2021, Hu *et al.* 2022). Esta última condición hace que los procesos de producción y multiplicación de semilla de calidad de esta especie se tornen en un gran desafío, al presentarse una alta susceptibilidad al volcamiento.

El volcamiento de plantas es una de las mayores limitantes en los cultivos de grano, al incidir directamente en el rendimiento. El impacto es mayor cuando el cultivo está expuesto a altas precipitaciones y fuertes vientos, especialmente en épocas próximas a la cosecha (Julio *et al.* 2021, Mejía-Kerguelén *et al.* 2019). El volcamiento de plantas destinadas a la producción de semilla dificulta los procesos de cosecha mecanizada y aumenta, consecuentemente, la necesidad de mano de obra; también, se aumentan las pérdidas de semilla de forma considerable, puesto que la humedad del suelo puede elevar el contenido de humedad del grano y afectar la calidad fisiológica y sanitaria, lo cual conlleva a su descarte posterior, situación que puede conducir a una baja disponibilidad de semilla en el mercado (Arévalos *et al.* 2019).

Diferentes estrategias para mitigar este fenómeno en los cultivos de grano han sido generadas: incluyen aspectos de manejo agronómico, el mejoramiento genético y, recientemente, el uso de retardantes de crecimiento (Rademacher 2000). Esta última alternativa, ha sido probada en diversos cultivos, pero hay poca evidencia de su uso en procesos de producción de semilla en sorgos forrajeros. Las evidencias del uso de reguladores en otros cultivos sugieren que estos pueden llegar a ser una gran opción para la reducción de la altura de la planta y el volcamiento (Torres de Souza *et al.* 2010).

Una característica común en varios de los retardantes de crecimiento disponibles en el mercado es que actúan como inhibidores de

la ruta de biosíntesis de giberelinas, en alguna parte de la ruta metabólica de este compuesto (Rademacher 2000); otros retardantes afectan el metabolismo de las auxinas (Zabala *et al.* 2009). El cloruro de mepiquat, ampliamente usado para el control del crecimiento en cultivos de algodón, actúa bloqueando directamente la síntesis del ent-kaureno, una etapa temprana en la ruta de biosíntesis de giberelinas (Rademacher 2000). La misma interrupción en la ruta de las giberelinas ocurre con la aplicación de Trinexapac – etil y su efecto se observa principalmente en la reducción de la elongación celular de los entrenudos cuando es aplicado en cultivos como caña de azúcar (Nakayama *et al.* 1990). Finalmente, compuestos como el etileno modifican el metabolismo de las auxinas, lo cual interfiere en los procesos de crecimiento y maduración (Zabala *et al.* 2009).

Al considerar los efectos positivos que pudiesen tener el uso de retardantes de crecimiento en la producción de semilla de sorgo dulce forrajero, se planteó como objetivo evaluar los efectos de algunos de ellos en variables asociadas al vigor de la planta, el porcentaje de volcamiento y la producción de semilla de calidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó durante el primer semestre del 2022 en 2 localidades en donde se llevan a cabo procesos de producción de semilla certificada de sorgo dulce forrajero. El Centro de Investigación Nataima (NAT) de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA] ubicado en el valle cálido del Alto Magdalena, municipio de El Espinal, Tolima, con coordenadas geográficas 04° 11'18,35" de latitud norte y 74° 57'32,73" de longitud oeste, a una altitud de 371 msnm y con topografía plana (pendiente menor al 3%). Según Holdridge *et al.* (1971), en la zona se presenta un clima que corresponde a la clasificación de bosque seco tropical (bs-T), con precipitación media anual de 1275 mm de distribución bimodal, humedad relativa media de 69,4% y temperatura media de 28,2°C. La segunda localidad fue el Centro

de Investigación Motilonia (MOT) de AGROSAVIA, ubicado en el Caribe seco colombiano, municipio de Agustín Codazzi, Cesar, cuyas coordenadas geográficas son 9°59'18" de latitud norte y 73°16'21" de longitud oeste, con una altitud de 91 msnm y topografía del terreno plana. La clasificación climática corresponde al bosque seco tropical (bs-T) (Holdridge *et al.* 1971), la humedad relativa es de 59%, la temperatura media anual es de 24°C, se presenta una precipitación media anual que oscila entre 300 a 400 mm con distribución bimodal y el suelo se caracteriza por presentar una textura franco-arenosa.

Se utilizó la variedad Corpoica JJT18, de sorgo dulce forrajero. Es ampliamente empleada en el país para la suplementación nutricional, especialmente en los sistemas de producción de ganadería bovina. Posee un rendimiento promedio de 45 t.ha⁻¹ de forraje verde y una concentración de sólidos solubles entre 13,0 y 16,7° brix. (AGROSAVIA 2020, Bernal 2013, ICA 2013).

El diseño experimental usado fue de bloques completos al azar (DBCA) con 3 repeticiones y 6 tratamientos, para un total de 18 unidades experimentales. Los tratamientos consistieron en la aplicación de: T1- Cloruro de mepiquat (100 g i.a.ha⁻¹), T2- Etefón (720 g i.a.ha⁻¹), T3- Etefón (1200 g i.a.ha⁻¹), T4- Cloruro de mepiquat (25 g i.a.ha⁻¹) + Etefón (360 g i.a.ha⁻¹), T5- Trinexapacetyl (200 g i.a.ha⁻¹) y el T6 correspondió al testigo sin aplicación de retardantes de crecimiento. Los reguladores fueron aplicados en los estados de desarrollo 1 y 3, considerando la primera aplicación antes de la diferenciación del primordio foliar y la segunda precisamente en el cambio de la actividad meristemática de crecimiento vegetativo a reproductivo. Para evitar el efecto de deriva de los retardantes, las aplicaciones se realizaron con ayuda de una bomba de CO₂, calibrada a una presión de 35 PSI y con un volumen de agua de 150 L.ha⁻¹. La unidad experimental consistió en parcelas de 6 surcos de 10 metros de largo y una distancia entre surcos de 0,8 m, para un área de 48 m², separadas entre ellas por 4 surcos de siembra con el mismo material.

La densidad de plantas ocupada fue de 75 000 plantas.ha⁻¹.

De acuerdo con los análisis de suelos de cada localidad y el requerimiento nutricional de las plantas se definió el plan de fertilización, sin embargo, se decidió disminuir en un 25% la fertilización nitrogenada puesto que la recomendación referente fue la sugerida para producción de forraje donde se requiere favorecer el crecimiento y alargamiento de las plantas. En ningún caso el cultivo presentó indicadores de déficit del elemento. La fertilización se realizó con la aplicación de los compuestos simples: N: 94, P₂O₅: 51, K₂O: 121, Ca: 23, Mg: 20 y S: 18 en kg.ha⁻¹; el control de arvenses, plagas y patógenos se efectuó contemplando las técnicas de manejo integrado recomendadas para cada caso y algunas sugeridas por Bernal *et al.* 2014.

Las variables evaluadas durante el estudio correspondieron a variables de crecimiento y morfoagronómicas: altura de la planta a cosecha, medida desde la base del tallo hasta la panícula; diámetro en la parte media del tallo; área foliar de las 3 hojas indicadoras (en dónde la segunda hoja correspondió a la última hoja superior ligulada, la hoja inmediatamente superior fue la primera hoja y la hoja inmediatamente inferior fue la tercera); porcentaje de volcamiento; rendimiento de semilla (considerando una humedad del 14% a cosecha y medida en campo y expresado en kg.ha⁻¹); y el peso de mil semillas.

Los datos obtenidos fueron procesados con el programa estadístico R Studio® (R Core Team 2020) en dónde se realizó el procedimiento de análisis de varianza – ANOVA, y se comprobaron los supuestos de normalidad, homocedasticidad y no aditividad, con las pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett. Asimismo, se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia de 0,05. Para explicar la variación en la respuesta de la variedad en el bloque se empleó el siguiente modelo estadístico lineal: $Y_{ijk} = \mu + R_i + L_j + (RL)_{ij} + \beta k(j) + \varepsilon_{ijk}$, dónde Y_{ijk} es igual al resultado promedio de las variables del i-ésimo retardante obtenido en la j-ésima localidad y k-ésima repetición; μ equivale

a la media general de las variables; R_i semeja el efecto del i -ésimo retardante; L_j es el efecto de la j -ésima localidad; $(RL)_{ij}$ indica la interacción entre el i -ésimo retardante de crecimiento y la j -ésima localidad, $\beta k(j)$ corresponde al efecto del bloque en la k -ésima repetición y en la j -ésima localidad y ε_{ijk} indica el efecto aleatorio del error experimental relacionado al i -ésimo retardante en la j -ésima localidad y k -ésima repetición, de acuerdo con el modelo lineal aditivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la evaluación fueron evidentes las diferencias estadísticas significativas para las localidades y los tratamientos en los parámetros de crecimiento de las plantas (Tabla 1). En los 2 ambientes el tratamiento T5 de trinexapac-etil fue el que presentó la menor altura a cosecha con un valor aproximado de 2,1 metros comparada con la longitud del testigo que superó los 3,5 metros (Figura 1). Los resultados demuestran que la aplicación de 200 g i.a.ha⁻¹ de trinexapac-etil en los estados de desarrollo 1 y 3 reduce entre el 40,8 y 43,5% el porte de la planta en

MOT y NAT respectivamente. Este resultado coincide con lo reportado por Julio *et al.* (2021) quienes encontraron que con el uso trinexapac-etil se logró una reducción del 40% de la altura de las plantas de sorgo.

Referente al diámetro del tallo, en el análisis de varianza combinado se presentaron diferencias estadísticas significativas en la localidad (Tabla 1), en este sentido, en la comparación de medias por localidad en NAT se registraron 2 grupos de significancia estadística entre tratamientos, y se destaca que existe una tendencia de engrosamiento del tallo cuando se disminuye la altura de la planta, es decir que parece existir una compensación respecto al porte de las plantas de sorgo (Figura 1), sin embargo no se detectaron diferencias significativas cuando se aplicaron los retardantes respecto al tratamiento control. Kebrom *et al.* (2017) en un estudio sobre el análisis de la dinámica de la expresión génica durante el desarrollo de entrenudos vegetativos del tallo de sorgo encontraron que existe una relación entre la retención de células pequeñas en la epidermis y la zona subepidérmica del tallo que contribuyen a aumentar su diámetro.

Tabla 1. Valores de los cuadrados medios y significancia del análisis de varianza para las variables de parámetros de crecimiento de altura de la planta a cosecha, diámetro de tallo y área foliar, evaluados en el primer semestre del 2022 en la localidad del Valle cálido del Alto Magdalena (NAT) y el Caribe seco colombiano (MOT).

Fuente de variación	GL	Altura de la planta (cm)	Diámetro del tallo (mm)	Área foliar (cm ²)
Localidad (L)	1	4400,1*	148,03***	93942,3***
Tratamiento (R)	5	18859,6***	3,89 ^{NS}	53396,9***
L x R	5	361,1 ^{NS}	3,63 ^{NS}	26579,1***
Error	24	726,2	5,19	2715,3
CV (%)		8,32	13,3	11,46
Mean		323,94	17,14	454,53

GL: Grados de libertad; CV: Coeficiente de variación; ***, *: diferencias significativas ($p < 0,001$) y ($p < 0,05$), respectivamente; NS: No significativo.

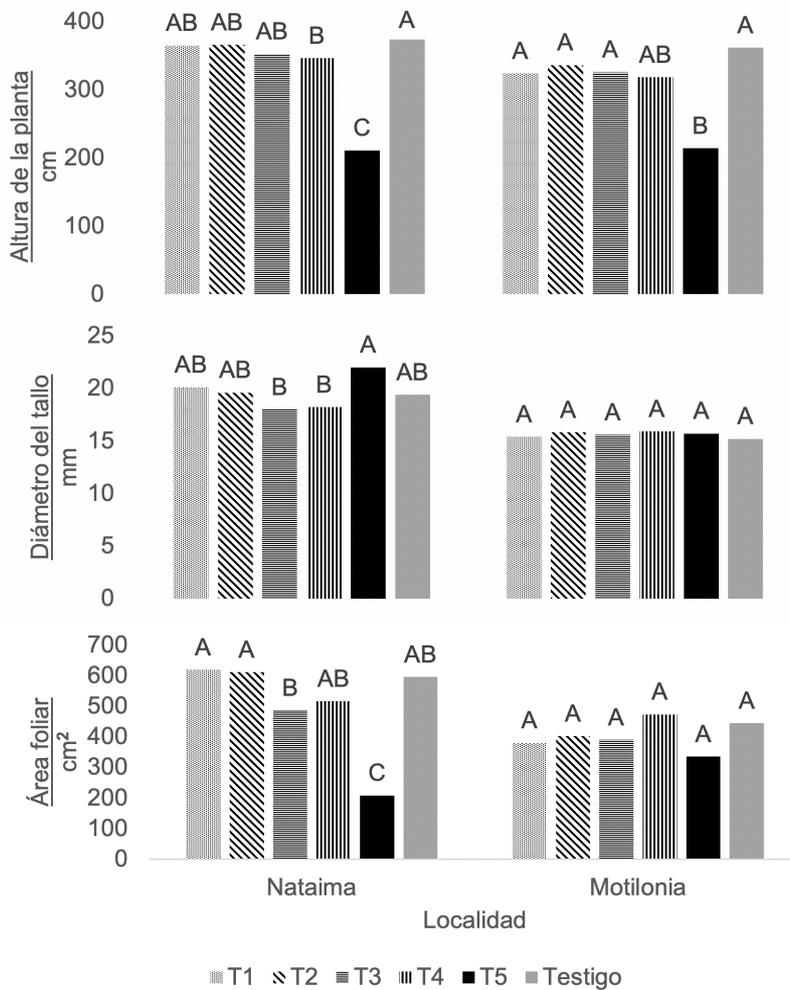


Figura 1. Crecimiento promedio de las plantas de sorgo forrajero en el periodo productivo 2022 en la localidad del Valle cálido del Alto Magdalena (NAT) y el Caribe seco colombiano (MOT).

* Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes con $p < 0,05$ (Tukey).

En la variable de área foliar se registraron diferencias altamente significativas para la localidad, los retardantes y su interacción. De igual forma se observa que el tratamiento de trinexa-pac-etil, en la localidad de Nataima, registró la menor área foliar de las hojas indicadoras que se evaluaron (Figura 1); conviene subrayar que en este estudio se encontró que el área foliar no tiene una relación directa con la acumulación de

materia seca en las semillas, pues a menor área foliar no se tradujo necesariamente en menor rendimiento. Este resultado indica que la aplicación de este retardante de crecimiento puede modificar la arquitectura de la planta sin que implique sombreado y por ende hay un mayor aprovechamiento de la intercepción lumínica. Estudios previos han reportado que, en el estrato superior de las plantas de sorgo, el ángulo de las hojas

puede representar un mejor aprovechamiento de la intercepción de la luz, lo que da como resultado un mayor potencial de rendimiento del cultivo (Zhi *et al.* 2022). En la localidad NAT se observó un síntoma de fitotoxicidad en las plantas con la aplicación del trinexapac-etil específicamente durante el estado de desarrollo 4 (Figura 2),

esto provoca un acortamiento de los nudos; con respecto a esto Rademacher (2000) indica que los retardantes de crecimiento vegetal cuando son empleados de forma apropiada no provocan síntomas visibles de daños a la planta que puedan comprometer su productividad.



Figura 2. Evidencia de plantas de sorgo dulce con síntomas de fitotoxicidad por efecto de la aplicación de Trinexapac-etil a dosis de 200 g i.a. ha⁻¹ en la localidad del Valle cálido del Alto Magdalena (NAT) durante la evaluación del ciclo productivo 2022.

En las 2 localidades se evidenció el volcamiento basal de las plantas con diferencias estadísticas para las 3 fuentes de variación (Tabla 2), de forma particular en el análisis del ambiente de NAT los datos no presentaron una distribución normal por lo que, aunque son evidentes las diferencias entre los retardantes de crecimiento según la comparación de medias los tratamientos son estadísticamente semejantes. Cabe señalar que el tratamiento T5 de trinexapac-etil obtuvo los menores porcentajes de volcamiento en NAT y MOT con 1 y 8,3% respectivamente, el cual fue contrastante con el tratamiento T2 de etefón a mínima dosis que tuvo porcentajes de volcamiento de 91% para

MOT y 41,7% para NAT. Los demás tratamientos T1, T3, T4 y el testigo fueron contrastantes en las 2 localidades, es decir que existe un efecto ambiental que influye en el comportamiento de los retardantes respecto a esta variable (Figura 3). De acuerdo con Stubbs *et al.* (2020) se puede inferir que la resistencia de flexión del tallo fue menor en MOT que en NAT. La fuerza de referencia o de carga externa aplicada sobre las plantas fue inducida principalmente por condiciones ambientales adversas, como la velocidad del viento y las altas precipitaciones en momentos de flexión. Esta condición de exceso de lluvia fue predominante en MOT, donde tuvo picos de precipitación de hasta 90 mm día en

estadios tempranos de formación de grano y que se lograron determinar en el balance hídrico

que se elaboró para las localidades de prueba (Flórez- Gómez 2023).

Tabla 2. Valores de los cuadrados medios y significancia del análisis de varianza para las variables porcentaje de volcamiento, peso de mil semillas y rendimiento de semilla tomadas en la evaluación del primer semestre del 2022 en la localidad del Valle cálido del Alto Magdalena (NAT) y el Caribe seco colombiano (MOT).

Fuente de variación	GL	Volcamiento (%)	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)	Peso de mil semillas (g)
Localidad (L)	1	15708,4***	72 ^{NS}	72,25***
Tratamiento (R)	5	2722,7*	2867533***	1,89 ^{NS}
L x R	5	4359,0***	5092631***	2,25*
Error	24	703	189883	0,83
CV (%)		59,73	41,5	3,21
Mean		44,39	1050,9	28,47

GL: Grados de libertad; CV: Coeficiente de variación; ***, *: diferencias significativas ($p < 0,001$) y ($p < 0,05$) respectivamente; NS: No significativo.

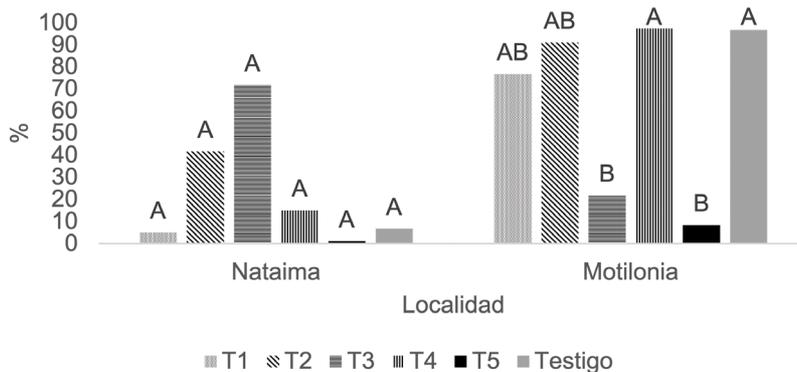


Figura 3. Comparación de medias para la variable de porcentaje de volcamiento de plantas en el periodo productivo 2022 en localidad del Valle cálido del Alto Magdalena (NAT) y el Caribe seco colombiano (MOT).

* Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes con $p < 0,05$ (Tukey).

La Figura 4 indica que existe una correlación negativa entre el porcentaje de volcamiento de las plantas y el nivel de productividad de semilla, pues a mayor porcentaje de volcamiento se presenta un menor rendimiento. Nuevamente sobresale la aplicación de trinexapac-etil cuyo rendimiento de semilla fue de 2,9 t.ha⁻¹ y 1,4

t.ha⁻¹ en MOT y en NAT respectivamente. Lo anterior discrepa de lo encontrado en un experimento de Julio *et al.* (2021), en el cual la aplicación de este retardante se realizó cuando las plantas habían desarrollado 8 y 12 hojas y obtuvieron una reducción en el rendimiento de semilla del 41%. Esta situación puede ser debida sobre

todo por el momento de aplicación del regulador, que en el caso de los investigadores fue cercana a la fase reproductiva y en este estudio se efectuó en los primeros estados de desarrollo vegetativo, puntualmente antes y durante la diferenciación meristemática. Los resultados obtenidos dan evidencia que la aplicación de los retardantes en las plantas de sorgo dulce forrajero en los estados vegetativos 1 y 3 según la escala de Vanderlip y Reeves (1972) tienen un mayor efecto sobre los parámetros de crecimiento, dado que en la fase

vegetativa la longitud del tallo está regulada por la tasa y la duración de la división y elongación de las células del entrenudo, esta zona de división celular es conocida como el meristemo; y cuando cambia la actividad meristemática del primordio foliar a floral la aplicación de estos productos genera que se presenten alteraciones en la señalización de hormonas, especialmente en las giberelinas y por ende se disminuye la proliferación celular (Yu *et al.* 2022).

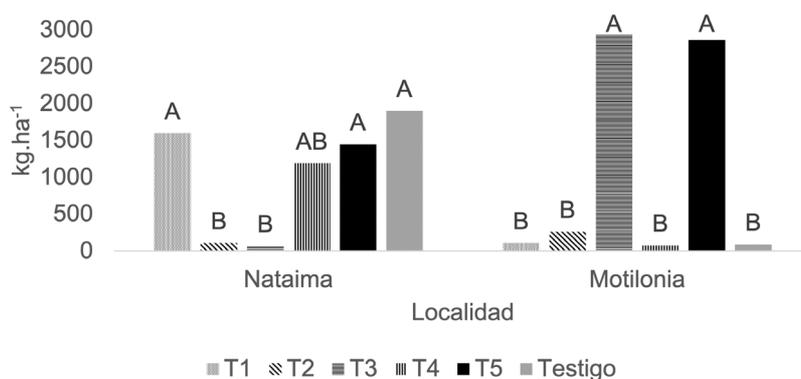


Figura 4. Comparación de medias para la variable del rendimiento de semilla en el periodo productivo 2022 en localidad del Valle cálido del Alto Magdalena (NAT) y el Caribe seco colombiano (MOT).

* Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes con $p < 0,05$ (Tukey).

En el dendrograma de la Figura 5 se detalla el análisis multivariado de los tratamientos y se aprecia su agrupación en 2 conglomerados. Se destaca que el tratamiento T5 de trinexapac-etil,

no se agrupa con los demás tratamientos debido a su composición y respuesta en la evaluación de las variables medidas.

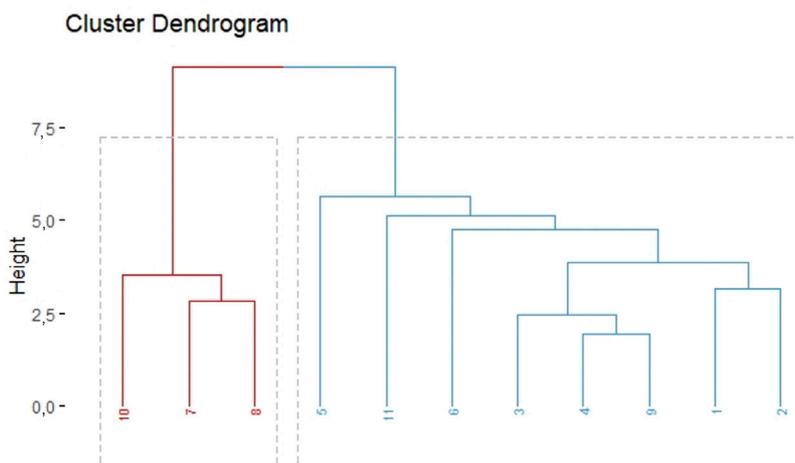


Figura 5. Dendrograma de retardantes de crecimiento aplicados para la producción de semilla de sorgo en el semestre productivo 2022 en la localidad del Valle cálido del Alto Magdalena (NAT) y el Caribe seco colombiano (MOT).

CONCLUSIONES

Con la aplicación de $200 \text{ g i.a.ha}^{-1}$ de Trinexapac-etil durante los estados de desarrollo 1 y 3 en lotes de sorgo dulce forrajero destinados a la producción de semilla certificada, se genera un menor desarrollo vegetativo de las plantas, un menor porcentaje de volcamiento y esto se refleja en una mejora en el rendimiento de semilla.

Se evidenció que existe un efecto ambiental que influye en la respuesta de las plantas de sorgo dulce forrajero a los retardantes. La mejora en rendimiento fue mayor en la localidad de Motilonia ubicada en el Caribe seco colombiano.

El Trinexapac-etil a la dosis aplicada tuvo un efecto positivo en la reducción de la altura de la planta y el área foliar, lo cual puede facilitar las labores de cosecha mecanizada, las labores de postcosecha y la calidad de la semilla.

RECOMENDACIONES

Se sugiere evaluar el retardante Trinexapac-etil en dosis menores a la evaluada para evitar síntomas de fitotoxicidad y retrasos en el

desarrollo de las plantas establecidas en campo. Se recomienda evaluar la interacción del uso del retardante con prácticas de manejo agronómico como la nutrición y la densidad poblacional. Es importante comprobar la efectividad del retardante Trinexapac-etil en áreas mayores a las experimentales y su validación en campos de producción de semilla certificada que validen los resultados experimentales de este estudio.

AGRADECIMIENTOS

Las personas autoras agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVA), a los Centros de Investigación Nataima y Motilonia, al Departamento de Semillas y la Coordinación de la Producción de Semillas, por su participación y financiación en el marco del proyecto “Conservación y producción de semilla y material vegetal de calidad para las Ofertas Tecnológicas corporativas de AGROSAVIA con el fin de activar procesos de escalamiento y vinculación comercial (Fase III)”.

LITERATURA CITADA

- AGROSAVIA (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria). 2020. Sorgo dulce para forraje Corpoica JTT-18 (en línea, sitio web). Consultado 18 de jul. 2023. Disponible en <https://www.agrosavia.co/productos-y-servicios/oferta-tecnol%C3%B3gica/1%C3%ADnea-pecuaria/ganader%C3%ADa-y-especies-menores/material-reproductivo-vegetal-semillas/302-sorgo-dulce-corpoica-jtt-18>
- Amombo, E; Ashilenje, D; Hirich, A; Kouisni, L; Oukarroum, A; Ghoulam, C; Gharous, M; Nilahyane, A. 2022. Exploring the correlation between salt tolerance and yield: research advances and perspectives for salt-tolerant forage sorghum selection and genetic improvement. *Planta* 255(3):71.
- Arévalos, A; Redondo, E; Insrán, A. 2019. Daños mecánicos asociados al procesamiento de granos y semillas: una revisión de la literatura. *Latin American Journal of Applied Engineering* 4 (2):1-14.
- Bernal, JH; Rincón, A; Guevara, E; Hernández, R; Flórez, H. 2014. Boletín técnico Sorgo forrajero Corpoica JTT-18. Villavicencio, Colombia. 60 p.
- Bernal, JH. 2013. Efecto de las variaciones ambientales en el crecimiento, desarrollo y acumulación de azúcares en variedades de sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Tesis Ph.D. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 164 p.
- Flórez Gómez, DL. 2023. Evaluación de retardantes de crecimiento en la producción de semilla de sorgo dulce forrajero (*Sorghum bicolor* L. Moench). Tesis M.Sc. Guadalajara, México, Universidad de Guadalajara. 85 p.
- Godoy, JC. 2016. Identificación de las causas de pérdida de competitividad del cultivo de sorgo (*Sorghum*) en Colombia. Revisión. Tesis pregrado. Bogotá, Colombia, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Consultado 18 jul. 2023. Disponible en <https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/765/Trabajo%20final%20tesis%20de%20sorgo.%20Juan%20Camilo%20Godoy%202017%20junio%207.pdf;jsessionid=B284A56E38F34CBBADDEE949BE743F6A3?sequence=1>
- Holdridge, LR; Grenke, WC; Hatheway, WH; Liang, T; Tosi, JA. 1971. Forest environments in tropical life zones, a pilot study. Defense Technical Information Center. s.l. 747 p.
- Hu, W; Zhou, L; Chen, JH. 2022. Conversion sweet sorghum biomass to produce value-added products. *Biotechnol Biofuels Bioproducts* 15(1):72.
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 2013. Resolución N° 4245. 2013. Registro de la variedad de sorgo forrajero CORPOICA JTT-18 de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA. Diario Oficial del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Colombia. 11 oct.
- Julio, MP; Magalhães, PC; Soares Viana, AR; Mingote Julio, BH; Santos, CV; Parrella, NN; Menezes, CB. 2021. Trinexapac-Ethyl Reduces Plant Height and Seed Yield in Forage Sorghum. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo* 20:212.
- Kebrom, TH; McKinley, B; Mullet, JE. 2017. Dynamics of gene expression during development and expansion of vegetative stem internodes of bioenergy sorghum. *Biotechnology for Biofuels* 10:159.
- MADR (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural). 2018. Ganaderos tienen en la siembra de sorgo forrajero una buena alternativa de alimentación para sus animales (en línea). Consultado 18 jul. 2023. Disponible en <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Ganaderos-tienen-en-la-siembra-de-sorgo-forrajero-una-buena-alternativa-de-alimentación-para-sus-animales-.aspx>
- Mejía-Kerguelén, S; Tapia-Coronado, JJ; Atencio Solano, LM; Cadena Torres, J. 2019. Producción y calidad nutricional del forraje del sorgo dulce en monocultivo e intercalado con maíz y frijol. *Pastos y Forrajes* 42(2):1-15.
- Nakayama, K; Kamiya, Y; Kobayashi, M; Abe, H; Sakurai, A. 1990. Effects of a plant-growth regulator, prohexadione, on the biosynthesis of gibberellins in cell-free systems derived from immature seeds. *Plant Cell Physiology* 31:1183-1190.
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Consultado 10 oct. 2022. Disponible en <https://www.r-project.org/>
- Rademacher, W. 2000. Growth retardants: Effects on Gibberellin Biosynthesis and Other Metabolic Pathways. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 51:501-531.
- Rodríguez-Gómez, JC; García- De los Santos, G; Hernandez- Livera, A; Hernandez-Martinez, M. 2021. Evaluación agronómica de sorgos forrajeros en el Bajío, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44(4):687:691.
- Stubbs, CJ; Oduntan, YA; Keep, TR; Noble, SD; Robertson, DJ. 2020. The effect of plant weight on estimations of stalk lodging resistance. *Plant Methods* 16:128.
- Torres de Souza, L; Curitiba, M; Soares, V; Fernandes dos Santos, D; Alves de Souza, M. 2010. Growth retardants in wheat and its effect in physiological quality of seeds. *Ciencia Rural* 40(6):1431-1434.
- Vanderlip, RL; Reeves, HE. 1972. Growth stages of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Agronomy Journal* 64:13-16.
- Yu, KMJ; Oliver, J; McKinley, B; Weers, B; Fabich, HT; Evetts, N; Conradi, MS; Altobelli, SA; Marshall Colon, A; Mullet, J. 2022. Bioenergy sorghum stem growth regulation: intercalary meristem

- localization, development, and gene regulatory network analysis. *Plant Journal* 112(2):476-492.
- Zabala, M; Angarita, M; Aguirre, A; Restrepo, J; Montoya, C. 2009. Estrategias para incrementar la producción de metabolitos secundarios en cultivos de células vegetales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía de Medellín* 62(1):4881-4895.
- Zhi, X; Tao, Y; Jordan, D; Borrell, A; Hunt, C; Cruickshank, A; Potgieter, A; Wu, A; Hammer, G; George Jaeggli, B; Mace, E. 2022. Genetic control of leaf angle in sorghum and its effect on light interception. *Journal of Experimental Botany* 73(3):801-816.



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

POTENCIAL FORRAJERO DE VARIEDADES DE MAÍCES COSTARRICENSES SELECCIONADAS PARA GRANO

William Sánchez-Ledezma^{1/*}, Nevio Bonilla-Morales²,
Moisés Hernández-Chavez³, Cinthia Granados-Marín⁴

Palabras clave: forraje de maíz; variedades de maíz; ensilaje de maíz; alimentación del ganado; suplementación del ganado.

Keywords: corn forage; corn varieties; corn silage; cattle feed; cattle supplementation.

Recibido: 17/04/23

Aceptado: 18/07/23

RESUMEN

Introducción. El cultivo de maíz (*Zea mays*) es ampliamente utilizado en la alimentación animal, tanto en forma de grano, como forraje verde o ensilaje. **Objetivo.** Evaluar la producción y calidad nutritiva de 6 variedades de maíces costarricenses seleccionados para la producción de grano. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó en 4 sitios experimentales (Aguas Zarcas, Turrialba, San Luis de Monte-verde y Guápiles) entre setiembre y diciembre del 2018. En cada sitio, se trabajó con un diseño de bloques completos al azar con 4 repeticiones y 8 tratamientos (6 variedades y 2 híbridos de maíces). Se evaluó la altura de la planta, la producción de materia seca (MS), la composición

química y la digestibilidad in vitro de la MS a la cosecha de los forrajes. **Resultados.** La altura de la planta y la producción de MS fueron afectadas por los tratamientos. Los rendimientos de MS de las variedades costarricenses EJM2, Upiav-G6, Los Diamantes 8843 y JSáenz (12,7-14 t.ha⁻¹) fueron semejantes al híbrido forrajero CLTHY002 (13,5 t.ha⁻¹). Solamente el contenido de MS y PC varió entre los tratamientos. **Conclusión.** Las variedades de maíces costarricenses EJM2, Los Diamantes 8843, JSáenz y Upiav-G6, tienen potencial para ser utilizadas como fuente forrajera para la alimentación de rumiantes, ya que alcanzaron rendimientos y valores nutritivos semejantes a los obtenidos con los híbridos seleccionados por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) para la producción de forrajes.

* Autor para correspondencia. Correo electrónico wsanchez@inta.go.cr

1 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria-INTA, San José, Costa Rica.  0000-0002-3470-7237.

2 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria-INTA, San José, Costa Rica.  0000-0001-6664-8377.

3 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria-INTA, Estación Experimental Los Diamantes, Limón, Costa Rica.  0009-0007-7549-5406.

4 Ministerio de Agricultura y Ganadería, Región Huetar Norte, Alajuela, Costa Rica.  0009-0007-9846-766x.

ABSTRACT

Forage potential of selected Costa Rican corn varieties for grain. Introduction. Corn (*Zea mays*) is widely used in animal feed, either as grain, green fodder or silage. **Objective.** To evaluate the yield and nutritional quality of 6 Costa Rican corn varieties selected for grain production. **Materials and methods.** The study was conducted at 4 experimental sites (Aguas Zarcas, Turrialba, San Luis de Monteverde and Guápiles) between September and December 2018. At each site, a randomized complete block design with 4 replications and 8 treatments (6 varieties and 2 corn hybrids). Plant height was evaluated, Dry Mass (DM) production, chemical

composition and in vitro DM digestibility at forage harvest were evaluated. **Results.** Plant height and DM production were affected by treatments. Yields of the Costa Rican DM varieties EJN2, Upiav-G6, Los Diamantes 8843 and JSáenz (12.7-14 t.ha⁻¹) were similar to the forage hybrid CLTHY002 (13.5 t.ha⁻¹). Only DM and CP content varied in the treatments. **Conclusions.** The Costa Rican corn varieties EJN2, Los Diamantes 8843, JSáenz and Upiav-G6, have potential to be used as a forage source for animal feeding because they achieved yields and nutritive values like those obtained with the hybrids selected by Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) for forage production.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de maíz (*Zea mays* L), como recurso forrajero, es uno de los más utilizados en la alimentación del ganado bovino, por su buen rendimiento y adecuado contenido de materia seca, carbohidratos solubles, almidón y capacidad buffer, características que lo clasifican como el forraje ideal para elaborar ensilaje de excelente calidad (Martínez 2003, Cañete y Sancha 1998).

Su uso como recurso forrajero ensilado, es una práctica común en los países de vocación ganadera, ya que contribuye a resolver el problema de la estacionalidad productiva que presentan las pasturas (Paliwal 2001). El maíz es una interesante mezcla de grano y fibra digestible que, al incorporar a la ración alimenticia de los rumiantes, constituye como fuente energética.

En Costa Rica, a pesar de la amplia adaptación del cultivo de maíz (Bonilla 2009), su uso como recurso forrajero es escaso, con cierto aumento en las lecherías especializadas de la zona alta y norte del cantón de San Carlos. Otro aspecto importante de mencionar, es que, en el país, no hay oferta constante de variedades e híbridos con aptitud forrajera y adaptados a las condiciones de suelo y clima, por lo que los

ganaderos utilizan variedades acriolladas de porte alto, las cuales tienen problemas de acame y bajos contenidos de materia seca. También suelen usar híbridos importados, con el inconveniente de que no se conoce su adaptación a estas condiciones agroecológicas, y al ser híbridos, se da la dependencia de comprar semilla para cada siembra.

Una alternativa, para eliminar la dependencia de semillas importadas y reducir costos, es utilizar las variedades costarricenses liberadas por el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) para la producción de grano, pero se desconoce el rendimiento y la calidad nutritiva de estos materiales como recursos forrajeros.

Por lo anterior, se realizó la presente investigación con el objetivo de evaluar la producción y calidad nutritivas de 6 variedades de maíces costarricenses seleccionadas para la producción de grano, en 4 diferentes condiciones agroecológicas de Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características de los sitios experimentales. El estudio se realizó en 4 sitios con diferentes

características agroecológicas: Estación Experimental de Los Diamantes (EELD) del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) de Costa Rica, ubicada en Pococí, provincia Limón y en la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA) de la Universidad de Costa Rica (UCR), Sede del Atlántico, Turrialba, provincia Cartago. Los otros sitios se ubicaron en

fincas comerciales, uno en San Luis de Monteverde, provincia Puntarenas y otro en Aguas Zarcas de San Carlos, provincia Alajuela.

Se ubican entre 280 y 760 m de altitud, entre las coordenadas 9°51'55" y 10°27'49" latitud norte y 83°85'15" y 84°82'55" longitud oeste. En la Tabla 1 se detallan las características agroecológicas de cada sitio.

Tabla 1. Características agroecológicas de cada sitio experimental.

Característica	Sitio experimental			
	Aguas Zarcas	Turrialba	San Luis, Monteverde	Guápiles
Zona de Vida*	bmh-P	bmh-P	bh-T	bmh-T
Altitud (m)	517	650	760	280
Precipitación promedio/año (mm)**	4000	2000	2000	3000
Temperatura promedio/año (°C)**	23,9	22,8	22,5	25
Orden de suelo***	Ultisoles/Inceptisoles	Inceptisoles	Ultisoles	Inceptisoles

* MINAE (s.f.); ** IMN 2016, *** CIA 2016.

bmh-P=Bosque Muy Húmedo Premontano; bh-T= Bosque Húmedo Tropical; bmh-T= Bosque Muy Húmedo Tropical.

El experimento se desarrolló durante la época lluviosa, entre setiembre y diciembre del 2018. Los análisis del suelo indican que el pH es medio (Bertsch 1987), con valores que oscilaron entre 4,7 y 5,9, donde los sitios de Turrialba y

Guápiles fueron los más críticos (Tabla 2). En Guápiles, el porcentaje de saturación de acidez es ligeramente alto (12,5%) en comparación con los otros sitios, lo que podría afectar el crecimiento de la planta de maíz.

Tabla 2. Composición química del suelo de cada sitio experimental.

Sitio experimental	pH	cmol (+).l ⁻¹				mg.l ⁻¹				
		Al	Ca	Mg	K	P	Zn	Mn	Cu	Fe
Aguas Zarcas	5,6	0,10	4,1	1,5	0,88	12	3,3	80	14	45
Turrialba	4,7	0,4	5,0	3,1	0,33	13	2,0	79	9	85
Monteverde	5,9	0,10	8,60	1,4	0,63	58	3,7	8	3	83
Guápiles	5,0	0,30	1,90	0,4	0,11	8	1,0	14	2	74

cmol (+).l⁻¹= centimol por litro; mg.l⁻¹= miligramo por litro; msnm= metros sobre el nivel del mar; Al= aluminio; Ca= calcio; Mg= magnesio; P= fósforo; Zn= Zinc; Mn= Manganeseo, Cu= Cobre; Fe= hierro.

Los contenidos de Ca son bajos en todos los sitios, excepto en san Luis de Monteverde, donde el valor fue óptimo (8,6). Además, el contenido de Mg y K fue de medio a óptimo, excepto en Guápiles, donde los contenidos de estos nutrientes no superaron valores de 0,41 y 0,11, respectivamente.

También se encontró que, las relaciones básicas del suelo están equilibradas en todas las localidades, pero con valores cercanos al límite inferior, principalmente por los bajos valores de Ca y medianos contenidos de Mg, en relación al K.

Establecimiento y manejo agronómico del experimento. El terreno se preparó con 2 pasadas de rastra 2 o 3 días antes del establecimiento de las parcelas experimentales. Posteriormente, se realizó la siembra manualmente a espeque en hileras distanciadas a 0,75 y 0,16 m entre plantas, para una densidad de 83 mil plantas. ha⁻¹ (Tadeo-Robledo *et al.* 2012, Fuentes *et al.* 2001, y Soto *et al.* 2002). Para finalizar la siembra, la semilla se cubrió con suelo y se aplicó atrazina (2 kg. ha⁻¹) como control pre-emergente de malezas (Bonilla 2009).

Las parcelas experimentales se fertilizaron con 100, 60 y 40 kg. ha⁻¹ de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente. El fósforo y el potasio, y un tercio del nitrógeno se aplicaron a la siembra, mientras que resto del nitrógeno, se distribuyó entre la tercera y cuarta semana después, antes de la floración (Bonilla 2009).

La cosecha de los forrajes fue manual a 10 cm sobre el nivel del suelo, entre los 80 y 90 días después de la siembra, cuando el grano se encontraba en estado lechoso-pastoso, es decir, en “grano ½ línea leche”, lo que significa que la línea que separa la porción líquida y sólida se encuentra en la parte central del grano (Pigurina y Pérez 1994, Martínez 2003, Romero 2004).

Tratamientos y Diseño experimental. Se evaluaron 6 variedades de maíces costarricenses (EJN2, Nutri grano, Los Diamantes 8843, Upiav-G6, Proteinta y Nutri grano) liberadas por el INTA de Costa Rica para la producción de grano; las 2 primeras de grano amarillo y las restantes de grano blanco. También la evaluación

contempló 2 híbridos forrajeros (CLTHW002 y CLTHY002) de grano blanco y amarillo, proporcionados por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), los cuales se utilizaron como materiales de comparación con respecto las variedades costarricenses.

Se trabajó con un diseño de bloques completos al azar con 4 repeticiones por tratamiento (6 variedades y 2 híbridos de maíz) y 4 sitios experimentales (localidades). Cada repetición (4 x 40 m) se dividió en 8 parcelas experimentales (4 x 5 m), sobre las cuales se distribuyeron los 8 tratamientos al azar. De esta forma, en cada sitio experimental se dispuso aproximadamente de 700 m² y un total de 32 parcelas de evaluación.

Variables experimentales. Se evaluó la altura de la planta, la producción de materia seca (MS) y la calidad nutritiva de los forrajes. Para determinar la altura de la planta y la producción MS, se utilizó la metodología de la Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales (RIEPT) propuesta por Toledo y Schultze-Kraft (1982). El muestreo se realizó en las 3 hileras centrales de cada parcela experimental, con el fin de evitar el efecto de borde (Roig 1989). La altura de la planta se midió en centímetros (cm) desde el nivel del suelo hasta el inicio de la flor masculina, mientras que la producción se determinó en kilogramos (kg) de forraje verde cosechado en los 3 metros lineales y en el centro de cada parcela experimental. Posteriormente, el rendimiento se expresó en kg. ha⁻¹ de MS, a partir del contenido de MS del forraje.

La biomasa se cortó en trozos de 2 cm de largo para obtener una muestra homogénea de 1 kg de forraje verde, la cual se envió al Laboratorio de Nutrición Animal del INTA, para determinar la composición química: materia seca (MS), proteína cruda (PC), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), cenizas (CE) y la digestibilidad in vitro de la de MS (DIVMS).

Análisis de datos. Con los datos de cada sitio experimental, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para un diseño de bloques completos al azar con las repeticiones y los 8 tratamientos, con nivel de significancia de 0,05

(InfoStat 2008). En los casos que la F del efecto fue significativo ($p \leq 0,05$), se utilizó la prueba de LSD-Fisher (5%) para comparación de medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altura de la planta. En términos generales, las plantas de maíz crecieron más en la

localidad de Aguas Zarcas (245 cm), en comparación a Turrialba (204 cm), Guápiles (177 cm) y San Luis de Monteverde (166 cm). También se observó que, el desarrollo de las variedades costarricenses osciló entre 280 y 146 cm, mientras que los híbridos entre 243 y 146 cm. Se encontraron variaciones entre los forrajes ($p < 0,05$) dentro de cada localidad (Tabla 3).

Tabla 3. Altura de la planta (cm) de variedades e híbridos de maíz cosechados en estado de grano lechoso ($\frac{1}{2}$ línea leche) en 4 localidades de Costa Rica, 2018.

Variedad / Híbrido	Localidades				Promedio	DS*
	Aguas Zarcas	Turrialba	Guápiles	Monteverde		
Los Diamantes 8843	255 b	210 bc	186 ab	170 bc	205	32,1
EJN2	254 b	220 bc	193 ab	183 ab	213	27,5
JSáenz	280 a	244 a	214 a	199 a	234	31,0
Upiav-G6	236 bc	198 bc	164 d	158 cd	189	31,1
Proteinta	234 cd	189 bc	166 cd	147 d	184	32,5
Nutrigrano	232 cd	186 bc	168 bcd	160 bc	187	27,9
Híbrido CLTHW002	243 bc	207 c	185 ab	163 bc	200	29,5
Híbrido CLTHY002	223 d	182 d	159 e	146 d	178	29,3
Promedio	245	205	179	166	-	-
Desviación estándar	16,8	19,3	17,4	16,8	-	-

* DS: Desviación estándar. Letras igual en la misma columna no difieren entre sí ($p < 0,05$).

En todos los sitios, la variedad costarricense JSáenz fue la que alcanzó el mayor crecimiento, con valores que oscilaron entre 199 y 280. Sin embargo, en la localidad Guápiles, no difirió significativamente ($p > 0,05$) de las variedades Los Diamantes 8843 (186 cm), EJN2 (193 cm) y del híbrido CLTHW002, ni de la variedad EJN2 (183 cm) en San Luis de Monteverde. En Aguas Zarcas, sí varió significativamente ($p < 0,05$) del resto de los tratamientos.

El poco desarrollo del maíz obtenido en la localidad de Guápiles y San Luis de Monteverde, probablemente obedece a deficiencias nutricionales del suelo destacadas en estos sitios (Tabla 2), donde los híbridos crecieron menos que las variedades costarricenses.

Los materiales de maíz crecieron poco si se comparan con los 380 cm reportado por Amador y Boschini (2000) en el Alto de Ochoмого, con variedades acriolladas, lo cual es relevante si se considera que la altura de la planta está relacionada con el rendimiento de biomasa. Sin embargo, es importante resaltar que, en el caso del maíz con fines forrajeros, alturas de planta excesivas como la mencionadas por los investigadores anteriores, favorece el acame, dificulta el manejo e incrementa las pérdidas de forraje.

Según Tadeo-Robledo *et al.* (2012), lo recomendable es seleccionar materiales uniformes y de altura intermedia (250 cm), sugerencia que únicamente se logró en Aguas Zarcas con la variedad EJN2, Los Diamantes 8843 y JSáenz,

aunque la última variedad creció más de lo requerido, pero no manifestó problemas de volcamiento, lo que significó que tiene buen anclaje.

Otro aspecto importante que considerar relacionado con la altura de la planta, es la calidad nutritiva de la biomasa total, ya que según Cabrales *et al.* (2007), en plantas con mayor altura, el aporte de la mazorca es menos en comparación al tallo, lo que afecta negativamente la calidad de la biomasa total, ya que el grano representa el 85% de digestibilidad en comparación con el resto de la planta.

Producción de MS. En la localidad de Aguas Zarcas, los rendimientos de MS oscilaron entre 13,1 y 16 t.ha⁻¹, sin diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los materiales. En el caso de Turrialba, los rendimientos fueron más dispersos (11,6 y 16,9 t.ha⁻¹), donde la variedad EJN2 alcanzó el mayor rendimiento (16,9 t.ha⁻¹) y la Nutrigrano el valor más bajo (11,6 t.ha⁻¹). El resto de los materiales no difirieron significativamente ($p > 0,05$) entre sí (Tabla 4).

Tabla 4. Producción de MS (t.ha⁻¹) de variedades e híbridos de maíz cosechados en estado de grano lechoso (½ línea leche) en 4 localidades de Costa Rica, 2018.

Variedad / Híbrido	Aguas Zarcas	Turrialba	Monteverde	Guápiles	Promedio	DS*
EJN2	15,9 b	16,9 a	13,5 b	9,6 c	14,0	3,25
Nutrigano	14,8 b	11,6 c	12,8 b	7,9 c	11,7	2,90
Los Diamantes 8843	13,8 b	14,4 b	14,0 b	9,7 c	13,0	2,20
UPIAV-G6	15,6 b	15,3 b	14,5 b	9,8 c	13,8	2,71
Proteinta	13,1 b	12,9 b	13,2 b	10,7 c	12,5	1,19
JSáenz	14,0 b	13,8 b	13,6 b	9,7 c	12,7	2,06
H. CLTHY002	16,0 b	15,1 b	14,1 b	8,8 c	13,5	3,23
H. CLTHW002	15,1 b	14,1 b	10,5 c	7,3 c	11,8	3,56
Promedio	14,8	14,3	13,3	9,3	12,9	-
DS	1,06	1,60	1,24	1,12	-	-

* DS: Desviación estándar. Letras igual en la misma columna no difieren entre sí ($p < 0,05$).

En San Luis de Monteverde, los rendimientos de MS oscilaron entre 10,5 y 14,5 t.ha⁻¹, indicando la prueba de medias que el híbrido CLTHY002 alcanzó el menor valor (10,5.t.ha⁻¹), difiriendo significativamente ($p < 0,05$) del resto de los materiales. En Guápiles se alcanzaron los menores rendimientos de MS, los cuales oscilaron entre 10,7 y 7,3 t.ha⁻¹, sin diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los materiales evaluados.

El menor rendimiento de MS obtenido en la localidad de Guápiles, donde en promedio se produjo un 35% menos de biomasa en comparación a los otros sitios, está relacionado con el

menor crecimiento de las plantas en esta localidad, debido a las deficiencias nutricionales del suelo indicadas en la Tabla 2.

En términos generales, las variedades costarricenses EJN2 (14 t.ha⁻¹) y Upiav-G6 (13,8 t.ha⁻¹) alcanzaron los mayores rendimientos. Sin embargo, no difirieron significativamente ($p > 0,05$) del híbrido CLTHY0002 y de las variedades Los Diamantes 8843 (13 t.ha⁻¹) y JSáenz (12,7 t.ha⁻¹) y Proteinta (12,5 t.ha⁻¹). El híbrido CLTHW002 (11,8 t.ha⁻¹) y la variedad Nutrigrano (11,7 t.ha⁻¹) lograron las menores producciones (Figura 1).

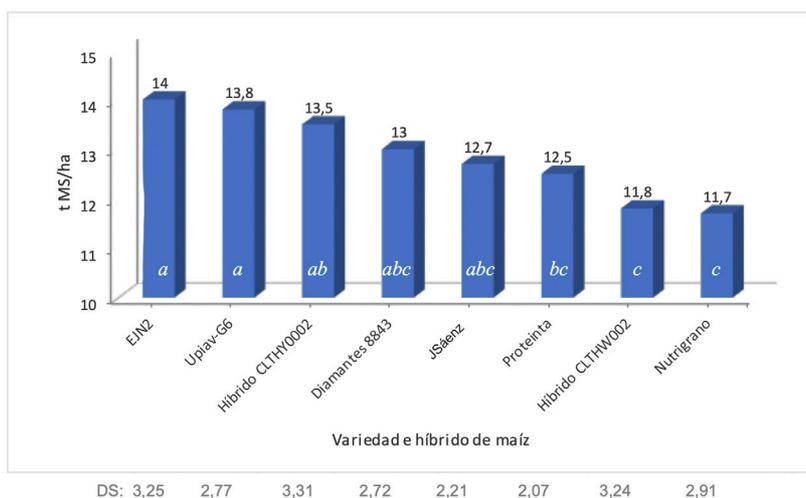


Figura 1. Producción promedio de materia seca ($t \cdot ha^{-1}$) de variedades e híbridos de maíz cosechados en estado de grano lechoso ($\frac{1}{2}$ línea leche) en 4 localidades de Costa Rica, 2018.

Es importante resaltar, que las variedades costarricenses EJN2 (grano amarillo), Upiav-G6, Los Diamantes 8843 y JSáenz (grano blanco), alcanzaron rendimientos semejantes ($p > 0,05$) al híbrido CLTHY002 de grano amarillo, y a la vez, fueron superiores ($p < 0,05$) al híbrido CLTHW002 de grano blanco, ambos seleccionados por el CIMMYT para la producción de forraje.

También se destaca que los rendimientos de MS obtenidos están relacionados con la fertilidad del suelo y la altura de la planta, ya que las mejores producciones se lograron en el sitio con suelo más fértil, donde a la vez, las plantas crecieron más.

Los rendimientos de MS alcanzados, en el presente estudio, se encuentran dentro del rango de $10,9$ a $17 t \cdot ha^{-1}$ reportado en varias investigaciones realizadas en Costa Rica (Amador y Boschini 2000, Elizondo y Boschini 2002, Boschini y Elizondo 2004, Elizondo y Boschini 2001, Elizondo 2011), con la diferencia de que, en estos trabajos, se utilizaron variedades acriolladas Costa Rica e híbridos importados. Además, estos estudios se realizaron en la zona alta (1450 msnm), donde

el ciclo del cultivo al momento de cosecha fue superior (125 días) a los registrados en el presente estudio (90 días).

En otras latitudes, México y Chile, han aumentado la densidad de siembra hasta 80 mil plantas por hectárea, con rendimientos entre 25 y 34 $t \cdot ha^{-1}$ de MS (Tadeo-Robledo *et al.* 2012, Fuentes *et al.* 2001 y Soto *et al.* 2002) superiores a las logradas en el presente estudio, aunque hay que tener presente, que dichos trabajos los realizaron con híbridos de maíz seleccionados para la producción de forraje y utilizaron planes de fertilización nitrogenada superior a los aplicados en el presente estudio. Además, que la cosecha la realizaron en “grano $\frac{3}{4}$ línea de leche”.

Con respecto a la composición química de los forrajes (MS, PC, FDN, FDA y CE), solamente las variables MS y PC resultaron significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos, el resto de las variables y la digestibilidad in vitro de la MS no variaron ($p > 0,05$) entre los materiales de maíz evaluados (Tabla 5).

Tabla 5. Composición química y digestibilidad in vitro de la materia seca, producción de variedades e híbridos de maíz cosechados en estado de grano lechoso (½ línea leche) en 4 localidades de Costa Rica, 2018.

Variedad/híbrido	Porcentaje (%)					
	MS*	PC*	FDN*	FDA*	CE*	DIVMS*
Los Diamantes 8843	28,4 ab**	7,6 c	62,1 a	48,3 a	7,3 a	59,7 a
EJN2	29,4 a	7,7 bc	61,6 a	50,0 a	8,4 a	56,7 a
JSáenz	26,6 d	7,6 c	60,0 a	47,9 a	7,3 a	60,1 a
UPIAV-G6	29,1 ab	7,8 bc	60,1 a	44,7 a	7,5 a	62,3 a
Proteinta	29,4 a	7,8 bc	61,3 a	51,1 a	6,6 a	62,2 a
Nutrigrano	28,1 bc	7,8 bc	59,0 a	49,8 a	7,7 a	59,2 a
Híbrido CLTHW002	27,1 dc	7,9 ab	59,0 a	47,3 a	8,6 a	61,5 a
Híbrido CLTHY002	26,5 d	8,1 a	58,9 a	48,1 a	7,8 a	61,2 a
Promedio	28,1	7,8	60,3	48,4	7,7	60,4
Desviación estándar	4,73	1,27	1,03	0,60	0,60	1,75

* MS: materia seca; PC: proteína cruda; FDN: fibra detergente neutro; FDA: fibra detergente ácido; CE: cenizas; DIVMS: digestibilidad in vitro de la MS.

** Letras igual en la misma columna no difieren entre sí ($p < 0,05$).

Materia seca (MS). En la localidad de San Luis de Monteverde, los contenidos de MS fueron semejantes entre los tratamientos, donde solamente la variedad Proteinta (33,6%) superó significativamente ($p < 0,05$) al resto de los materiales que fluctuaron entre 29,8 y 31,7%. Situación semejante sucedió en la localidad de Turrialba, ya que únicamente la variedad JSáenz (29,4%) fue inferior ($p < 0,05$) al resto de los forrajes, que alcanzaron porcentajes entre 32,9 y 34,8%.

En Aguas Zarcas y Guápiles se encontraron más diferencias entre los tratamientos en comparación a las otras localidades. En el caso de Aguas Zarcas, la variedad Upiav-G6 (28,5%) fue superior ($p < 0,05$) al resto de los materiales, mientras que las variedades EJN2, Proteinta y Nutrigrano, con valores que oscilaron entre 26,1 y 26,4%, superaron significativamente ($p < 0,05$) a las variedades Los Diamantes 8843 y JSáenz (22,7%), y a los híbridos, los cuales alcanzaron valores entre 21,7 y 23,3%.

En el caso de Guápiles, las variedades EJN2 (25,3%) y Los Diamantes 8843 (25,5%) alcanzaron los contenidos de MS más altos

($p < 0,05$), mientras que el híbrido CLTHY002 el valor más bajo (19,8%). Además de lo anterior, se encontró que las variedades JSáenz, Proteinta, Upiav-G6, Nutrigrano y el híbrido CLTHW002 presentaron valores intermedios (22,3 y 24,3%), semejantes entre sí ($p > 0,05$), pero diferentes a los mencionados anteriormente.

Importante resaltar que, el contenido de MS de los 2 híbridos seleccionados por el CIMMYT para la producción de forraje, fue semejante ($p > 0,05$) al alcanzado con las variedades costarricenses en cada una de las localidades evaluadas.

En el Alto de Ochomogo de Cartago, Boschini y Elizondo (2004), reportan contenidos de MS inferiores (entre 11,6 y 21%), a los obtenidos en el presente estudio, con híbridos y materiales de maíces acriollados. Situación similar (16,7 y 20,8%) encontraron Sánchez e Hidalgo (2018) al evaluar híbridos de maíz en Pacayas de Cartago, semejantes a Castillo *et al.* (2009) al evaluar un híbrido de maíz en asocio con la leguminosa *Vigna radiata* en Upala de Alajuela.

En otras latitudes, González (1988) y León y Montenegro (2001) reportan porcentajes de MS

semejantes (22,5 y 34,4%) a los encontrados en la presente investigación, aunque Fuentes *et al.* (2001), Soto *et al.* (2002) y Tadeo-Robledo *et al.* (2012) reportan contenidos de MS ligeramente superiores, entre 25,4 y 44% de MS.

Los contenidos de MS obtenidos en el presente estudio son adecuados, ya que la mayoría de los porcentajes se ubican entre el rango de 25 y 35%, valores adecuados para obtener un buen ensilaje y evitar pérdidas de nutrientes por efluentes y por respiración de las plantas después de ser cosechadas (Chaverra y Bernal 2001, Sandoval 2004, Mangado 2006).

Otro aspecto por considerar, es que el alto contenido de humedad antes de ensilar restringe el proceso de fermentación, debido a que el tiempo necesario para que el ensilado se establezca se retrasa, afectando negativamente el contenido celular final y la digestibilidad del ensilado (Siebald 1994, Van Vuuren *et al.* 1995). Además, cuando el contenido de MS es cercano al 20%, existe un ambiente húmedo que favorece el desarrollo de bacterias Clostridiales, inclusive a pH = 4 (Smetham 1990, Argamentería *et al.* 1997, Martínez 2003, De la Roza 2005).

Proteína cruda (PC). En la localidad de Guápiles se encontraron los mayores contenidos de PC, entre 7,9 y 9,1%, en comparación a las otras localidades, pero no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los materiales. Por el contrario, en Turrialba se hallaron los menores valores de PC (entre 5,4 y 7,1%), donde la variedad Los Diamantes 8843 (5,4%) fue la única que difirió ($p < 0,05$) del resto de los materiales. Los escasos contenidos de PC encontrados en este sitio, probablemente obedecen a las condiciones nutritivas del suelo, ya que en esta localidad, se presentaron las mayores limitaciones en fertilidad del suelo, en comparación a los otros sitios (Tabla 2).

En las localidades de Aguas Zarcas y San Luis de Monteverde, los contenidos de PC fueron semejantes, con valores que oscilaron entre 7,6 y 8,7%, sin diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los forrajes, en ninguno de los 2 sitios.

En promedio, todos los forrajes alcanzaron contenidos de PC cerca o superiores al 8%, excepto en la localidad de Turrialba, por lo que es de esperar que, al suplementar con este tipo de forraje, no se afecte el consumo voluntario, la capacidad del retículo-rumen, ni la tasa de pasaje de la ingesta (Allison 1985). Además, estos valores no limitan el crecimiento microbiano en el rumen, siempre y cuando exista un aporte energético balanceado en la dieta total (Cowan y Lowe 1998).

En un estudio realizado en San Antonio de Turrialba, Cartago (Dittel 2019), con los mismos materiales evaluados en la presente investigación, se reportan valores semejantes de PC entre 7,8 y 9,1%. Por otra parte, Méndez (2017) encontró contenidos superiores entre 10,2 y 11,3%, al evaluar las mismas variedades costarricenses en Barva de Heredia.

Elizondo y Boschini (2002) reportan valores de PC ligeramente inferiores entre 6,3 y 8% al cosechar variedades acriolladas de maíz entre los 100 y 126 días de crecimiento en Ochomogo de Cartago. Sin embargo, en la misma localidad, Boschini y Elizondo (2004) encontraron contenidos de PC ligeramente superiores entre 9,2 y 10,2% con híbridos forrajeros y materiales acriollados. Porcentajes semejantes entre 11,1 y 12,5% reporta Elizondo (2011) al estudiar materiales híbridos. También Sánchez e Hidalgo (2018) encontraron valores superiores de PC, entre 8,2 y 12,5%, al evaluar híbridos de maíz en Pacayas de Cartago.

En otras latitudes, Mena (2010) experimentó valores inferiores de PC entre 7,2 y 7,7% a los obtenidos en el presente estudio, al evaluar híbridos forrajeros en Chile. Demanet (2009), señala que el rango de proteína de la planta entera de maíz forrajero oscila entre 6 y 10%, lo que coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio, situación que no compromete los requerimientos de proteína microbiana en los rumiantes. Estos valores también concuerdan con los contenidos entre 7,8 y 9% encontrados por Zaragoza-Esparza *et al.* (2019), al evaluar 12 híbridos forrajeros en México.

Fibra Detergente Neutro (FDN). En la Tabla 5, se detalla el valor promedio de FDN de los materiales evaluados, donde se observa que el promedio de las variedades costarricenses (60,7%) es semejante ($p>0,05$) al obtenido con los híbridos forrajeros (59%) seleccionados por CIMMYT para la producción de forraje.

En la localidad de Turrialba se obtuvieron los mayores contenidos de FDN entre 63,4 y 65,7% en comparación a los otros sitios. Sin embargo, no hubo diferencias significativas ($p>0,05$) entre los materiales. Por el contrario, en Guápiles se encontraron los menores porcentajes FDN, entre 54,3 y 61,2%, pero al igual que en la localidad anterior, tampoco se presentaron diferencias significativas ($p>0,05$) entre los forrajes dentro de localidad.

En los sitios de San Luis de Monteverde y Aguas Zarcas, los contenidos FDN fueron muy semejantes, con porcentajes que oscilaron entre 57,7 y 63,2%, sin diferencias significativas ($p<0,05$) entre los materiales dentro de cada localidad.

Los valores de FDN encontrados en el presente estudio se ubican entre el rango (56,6 y 62,5%) reportado por varios autores (Méndez 2017, Gurdíán 2018, Dittel 2019) en trabajos realizados en Costa Rica con las mismas variedades de maíz, los cuales, a la vez, coinciden con otros resultados también obtenidos en Costa Rica (Castillo *et al.* 2009, Elizondo 2017) con híbridos forrajeros. Aunque Elizondo y Boschini (2002), Boschini y Elizondo (2004) y Elizondo (2011), reportan valores superiores, entre 63 y 76,8%, con materiales acriollados evaluados en Ochomogo de Cartago.

En México, Chile y Colombia, varios autores (Núñez *et al.* 2001, Mena 2010, Jiménez *et al.* 2005, Zaragoza-Esparza *et al.* 2019) reportan contenidos semejantes de FDN entre 50 y 63,3% con híbridos forrajeros. Aunque Bala *et al.* (2000) encontraron contenidos inferiores entre 44,6 y 46,5% y Yescas *et al.* (2015) valores superiores entre 65,4 y 67,5%, a los obtenidos en el presente estudio.

Fibra Detergente Ácida (FDA). En la localidad de Guápiles, se encontraron los menores valores de FDA (37,7 y 44,5%) con respecto a los otros sitios, situación que se relaciona con los mayores contenidos de PC y menores valores de FDN obtenidos en esta localidad, pero no se encontraron diferencias significativas ($p>0,05$) entre los tratamientos. Por el contrario, en Turrialba se obtuvieron los contenidos más altos de FDA (46,6-52%), en comparación a San Luis de Monteverde (42,5-47%) y Aguas Zarcas (43,2-47,7%), pero tampoco se encontraron diferencias significativas ($p>0,05$) entre los tratamientos, en ninguno de los sitios de evaluación.

También se determinó que los promedios de FDA de las variedades costarricenses (48,4%) no variaron significativamente ($p>0,05$) de los valores logrados, con los híbridos forrajeros (47,7%), en ninguna de las localidades.

En estudios realizados por Méndez (2017) y Gurdíán (2018) con las mismas variedades costarricenses, se reportan valores inferiores entre 32,4 y 36,2%. Situación semejante reportan Elizondo y Boschini (2002), Boschini y Elizondo (2004), Castillo *et al.* (2009), Elizondo (2011) y Sánchez e Hidalgo (2018), al citar contenidos de FDA entre 38,2 y 46,2%, en evaluaciones realizadas con híbridos forrajeros y variedades acriolladas en el país. Aunque Dittel (2019) reporta valores semejantes, entre 47 y 52%, a los obtenidos en el presente estudio.

En Chile, México y Colombia varios investigadores (Bala *et al.* 2000, Núñez *et al.* 2001, Jiménez *et al.* 2005, Mena 2010, Zaragoza-Esparza *et al.* 2019) reportan valores inferiores de FAD, entre 22 y 37,5%, al evaluar híbridos seleccionados para la producción de forraje.

Cenizas (CE). Los mayores contenidos de CE se lograron en la localidad de Guápiles, con valores que oscilaron entre 8,9 y 9,3%, pero no se presentaron diferencias significativas ($p>0,05$) entre los tratamientos. En las localidades de San Luis de Monteverde y Aguas Zarcas, los contenidos fueron semejantes, con porcentajes que oscilaron entre 8,5 y 8,7%, pero tampoco se observaron diferencias significativas ($p>0,05$)

entre los forrajes dentro de cada localidad. En Turrialba se obtuvieron los contenidos de CE más bajos (7,4-8,1%), situación que se relaciona con el menor contenido de PC y mayor aporte de fibra, lo que coincide con lo reportado por Boschini y Elizondo (2004), quienes encontraron que el contenido de CE en el forraje de maíz se reduce a como disminuye la PC e incrementa la fibra.

El contenido de CE encontrado en el presente estudio, concuerda con el rango de 7,3 a 9,2% reportado por Méndez (2017) y Dittel (2019) con las mismas variedades costarricenses. Contenidos semejantes entre 6,1 y 9,7% reportan Villa *et al.* (2010) y Araiza-Rosales *et al.* (2013) con híbridos forrajeros. Aunque Elizondo Boschini (2002), Boschini y Elizondo (2004) y Elizondo (2011) encontraron valores superiores, entre 7,8 y 14,5% al evaluar variedades acriolladas en Ochoмого. Otros autores (Sibanda *et al.* 1997, Mier 2009, Mena 2010, Jiménez-Leyva *et al.* 2016) citan valores inferiores en CE entre 3,8 y 7,1% a los encontrados en el presente estudio.

Según Weiss (2014), altas concentraciones de CE en los forrajes pueden indicar contaminación de metales pesados en el suelo, lo cual puede reducir la disponibilidad de minerales importantes en el forraje. Al respecto, Chaverra y Bernal (2001) mencionan que contenidos de CE, mayores a 12%, podrían estar asociados a contaminación con suelo durante la cosecha o manejo del forraje.

Para Maynard *et al.* (1989) y Fajardo y Sarmiento (2007), otro caso puede ser cuando se agrega un aditivo al forraje como la melaza, o una leguminosa, lo que incrementa el contenido de CE hasta un 13%.

A pesar de las explicaciones anteriores, es importante aclarar que la concentración de cenizas está sujeta a múltiples variables, entre las que se pueden mencionar la variedad o híbrido de maíz, edad fenológica de cosecha, altura de corte, deshidratación del forraje antes de ensilar y la inclusión de aditivos (WingChing-Jones 2006).

Digestibilidad in vitro de la MS (DIVMS).

La digestibilidad in vitro de la MS osciló entre 56,7 y 62,3%, sin diferencias significativas entre

los tratamientos ($p>0,05$) dentro de cada localidad. Los mayores valores absolutos se encontraron en los sitios con mayor contenido de PC y valores más bajos de fibra (Guápiles y Aguas Zarcas), lo que se relaciona con lo reportado por Bassi (2006), quien indica que las fibras inciden negativamente en la digestibilidad de MS cuando los contenidos son altos, situación que limita el consumo voluntario, la tasa de pasaje y el aporte de nutrientes.

Los valores encontrados en DIVMS son semejantes en el rango (56,7 y 64,4%) reportados por Méndez (2017) y Dittel (2019) con las mismas variedades costarricenses, aunque Gurdían (2018) reporta un aumento significativo (entre 64,2 a 67,6%) al ensilar estos materiales.

Sánchez e Hidalgo (2018) citan valores semejantes entre 60,6 y 65,6% con híbridos de maíz evaluados en Pacayas, al igual que Boschini y Elizondo (2004) al encontrar contenidos entre 49,8 y 64,1% en híbridos forrajeros evaluados en Ochoмого de Cartago. En otras latitudes, Villa *et al.* (2010) y Araiza-Rosales *et al.* (2013) reportan valores similares en DIVMS, entre 64,3 y 65,6%, con híbridos forrajeros seleccionados para clima cálido.

Otros autores (Núñez *et al.* 2001, Fuentes *et al.* 2001, Zaragoza *et al.* 2019, Araiza-Rosales *et al.* 2013, Castillo *et al.* 2009) reportan valores de DIVMS entre 65 y 78%, con híbridos seleccionados para producción de forraje y exclusivos para climas subtropical y fríos. Al respecto, Villa *et al.* (2010) reportan diferencias hasta de 12 unidades porcentuales a favor de los híbridos forrajeros seleccionados para climas subtropicales y fríos en comparación a los de clima tropicales.

CONCLUSIONES

Las variedades de maíces costarricenses EJN2, Los Diamantes 8843, JSáenz y Upiav-G6, tienen potencial para ser utilizadas como fuente forrajera para la alimentación de rumiantes, ya que alcanzaron rendimientos y valores nutritivos semejantes a los obtenidos con los híbridos

seleccionados por el CIMMYT para la producción de forrajes. Aunque los híbridos, redujeron su producción en los sitios con limitada fertilidad del suelo.

LITERATURA CITADA

- Allison, CD. 1985. Factors affecting forage intake by range ruminants: a review. *Journal of Range Management* 38:305-311.
- Amador, L; Boschini, C. 2000. Fenología productiva y nutricional de maíz para la producción de forraje. *Agronomía Mesoamericana* 11(1):171-177.
- Araiza-Rosales, E; Delgado-Licon, E; Carrete-Carreón, F; Medrano-Roldán, H; Solís-Soto, A; Murillo-Ortiz, M; Haubi-Segura, C. 2013. Degradabilidad ruminal in situ y digestibilidad in vitro de diferentes formulaciones de ensilados de maíz-manzana adicionados con melaza. *Avances en Investigación Agropecuaria* 17(2):79-96.
- Argentería, A; De la Roza, B; Martínez, A; Sánchez, L; Martínez, A. 1997. El ensilado en Asturias. Principado de Asturias, Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias. 127 p.
- Bala, MA; Shavera, RD; Shinnerson, KJ; Coors, JG. 2000. Stage of maturity, processing, and hybrid effects on ruminal in situ disappearance of whole-plant corn silage. *Animal Feed Science and Technology* 86:83-94.
- Bertsch, F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. 2 ed. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 78 p.
- Bonilla, N. 2009. Manual de recomendaciones técnicas, cultivo de maíz. San José, Costa Rica, INTA. 72 p.
- Boschini, C; Elizondo J. 2004. Desarrollo productivo y cualitativo de maíz híbrido para ensilar. *Agronomía Mesoamericana* 15(1):31-37.
- Bassi, T. 2006. Conceptos básicos sobre la calidad de los forrajes. Cátedra de Manejo de Pasturas. Lomas de Zamora, Argentina, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora. 13 p.
- Cabrales, R; Montoya R; Rivera J. 2007. Evaluación agronomica de 25 genotipos de maíz (*Zea mays*) con fines forrajeros en el Valle del Sinú Medio. *Rev. MVZ.* 12(2):105-1060.
- Cañete, MV; Sancha, JL. 1998. Ensilado de forrajes y su empleo en la alimentación de rumiantes. Madrid, España, Editorial Mundiprensa Libros. 260 p.
- Castillo, M; Rojas, A; WingChing, R. 2009. Valor nutricional del ensilaje de maíz cultivado en asocio con vigna (*Vigna radiata*) *Agronomía Costarricense* 33(1):133-146.
- Chaverra, H; Bernal, J. 2001. El ensilaje en la alimentación del ganado vacuno. Bogotá, Colombia, IICA, Tercer Mundo Editores. p. 65-123.
- CIA (Centro de Investigaciones Agronómicas). 2016. Mapa digital de suelos de Costa Rica. Universidad de Costa. Consultado 10 nov. 2023. Disponible en <http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costa-rica>
- Cowan, RT; Lowe, KF. 1998. Tropical and subtropical grass management and quality. *In* Chenney JH; Cherney DJR (eds.). *Grass for Dairy Cattle*. Wallingford, Oxon, U.K. CABI Publishing. p. 101-136.
- De la Roza, B. 2005. El ensilado en zonas húmedas y sus indicadores de calidad. IV Jornadas de alimentación animal. Laboratorio de Mouriscade. Lalin, Pontevedra. p. 1-20.
- Demagnet, R. 2009. Híbridos de maíz para ensilaje en la zona sur. *In* Es tiempo de en silaje de maíz. Bioleche. Osorno, Chile, Casas del Alto. s. p.
- Dittel, F. 2019. Evaluación del potencial forrajero y de ensilabilidad de seis variedades de maíces costarricenses en Santa Cruz de Turrialba. Tesis Lic. Turrialba, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 77 p.
- Elizondo, J; Boschini, C. 2002. Producción de forraje con maíz criollo y maíz híbrido. *Agronomía Mesoamericana* 13(1):13-17.
- Elizondo, J. 2011. Influencia de la variedad y alturas de cosecha sobre el rendimiento y valor nutritivo de maíz para ensilaje. *Agronomía Mesoamericana* 32(2):105-111.
- Elizondo, J. 2017. Producción de biomasa y calidad nutricional de tres forrajes cosechados a dos alturas. *Agronomía Costarricense* 28(2):329-340.
- Fajardo, E; Sarmiento, S. 2007. Evaluación de melaza de caña como sustrato para la producción de *Saccharomyces cerevisiae*. Bogotá, Colombia, Pontificia Universidad Javeriana. 24 p.
- Fuentes, J; Cruz, A; Castro, L; Gloria, G; Rodríguez, S; Ortiz, B. 2001. Evaluación de variedades e híbridos de maíz (*Zea mays* L.) para ensilar. *Agronomía Mesoamericana* 12(2):193-197.
- González, J. 1988. Evaluación de la elaboración del ensilaje de maíz en cinco fincas del cantón de Alfaro Ruiz. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 50 p.
- Gurdián, M. 2018. Evaluación del potencial de ensilabilidad y valor nutricional del ensilado de cuatro variedades costarricenses de maíz en Santa Lucía de Barva, Heredia. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional. 80 p.
- InfoStat 2008. InfoStat versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Argentina, Universidad Nacional de Córdoba.

- IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2016. Mapas de temperatura y precipitación mínima y máxima 1960-2013. Sistema Nacional de Información Terrestre, Instituto Geográfico Nacional. Consultado 22 oct. 2022. Disponible en <https://www.snitcr.go.cr/Visor/nodos2>
- Jiménez, P; Cortés, H; Ortiz, S. 2005. Rendimiento forrajero y calidad del ensilaje de canavalia en monocultivo y asociada con maíz. *Acta Agron.* 54(2):31-36.
- Jiménez-Leyva, D; Romo-Rubio, J; Flores-Aguirre, L; Ortiz-López, B; Barajas-Cruz R. 2016. Edad de corte en la composición química del ensilado de maíz blanco. *Abanico Veterinario* 6(3):13-23.
- León, B; Montenegro, A. 2001. Sistema de cultivo de maíz asociado con soya para la elaboración de ensilaje. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 90 p.
- Mangado, J. 2006. Cómo realizar correctamente el ensilaje de maíz. *Revista AFIGRA* 64:56-62.
- Martínez, A. 2003. Ensilabilidad de especies pratenses en Asturias y su interacción con el uso de aditivos. Tesis Ph.D. España, Universidad de Oviedo. 450 p.
- Maynard, L; Loosli, F; Hintz, W; Warner, W. 1989. *Nutrición animal*. 7 ed. México, Mac Graw Hill. 640 p.
- Mena, F. 2010. Evaluación de 4 híbridos de Maíz Forrajero (*Zea mays* L.) en la Comuna de Futrono. Tesis Lic. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 52 p.
- Méndez, I. 2017. Potencial forrajero de cuatro variedades costarricenses de maíz (*Zea mays*) evaluadas a diferentes densidades de siembra en Santa Lucía, Barva de Heredia. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional. 64 p.
- Mier, M. 2009. Caracterización del valor nutritivo y estabilidad aeróbica de ensilados en forma de microsilos para maíz forrajero. Tesis M.Sc. Universidad de Córdoba, Andalucía, España. 66 p.
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía). (s.f.). Mapa de zonas de vida de Costa Rica. Instituto Geográfico Nacional. Consultado 22 oct. 2022. Disponible en <https://bit.ly/3Zrn65p>
- Núñez, G; Faz, R; Tovar, MR; Zavala, A. 2001. Híbridos de maíz para la producción de forraje con alta digestibilidad en el Norte de México. *Técnica Pecuaria* 39(2):77-88.
- Paliwal, RL. 2001. El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción. FAO, Departamento de Agricultura. Roma. Consultado 20 abr. 2022. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/003/X7650S/x7650s00.HTML>
- Pigurina, G; Pérez, E. 1994. Momento de cosecha de maíz para ensilar. Uruguay, INIA. Boletín N°. 43. 12 p.
- Roig, CA. 1989. Evaluación preliminar de 200 accesiones de leguminosas forrajeras tropicales en el ecosistema de Bosque Tropical Lluvioso en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 179 p.
- Romero, L. 2004. Silaje de maíz: calidad de forrajes conservados. EEA Rafaela, Argentina, INTA. p. 31-33.
- Sánchez, W; Hidalgo, C. 2018. Potencial forrajero de nueve híbridos de maíz en la zona alta lechera de Costa Rica. *Revista Agronomía Mesoamericana* 29(1):153-164.
- Sandoval, CA. 2004. Ensilaje de Forrajes: Alternativa para alimentación de rumiantes en el trópico. México, Universidad Autónoma de Yucatán. 55 p.
- Sibanda, S; Jingura, J; Topps, J. 1997. The effect of level of inclusion of legume *Desmodium uncinatum* and the use of molasses or ground maize as additives on the 79 chemical composition of grass and maize-legume silages. *Animal Feed Science Technology* 68(1):295-305.
- Siebold, E. 1994. Utilización de ensilajes para producción de carne. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Remehue, Osorno (en Línea). Consultado 20 jul. 2023. Disponible en http://www.inia.cl/remehue/publicaciones/online/serie_remehue/52/cap6.pdf
- Smetham, ML. 1990. The conservation of herbage as hay or silage. Pastures their ecology and management. *In* RHM Larger (ed.). s. l. Oxford University Press. p. 337-369.
- Soto, P; Jahn, E; Arredando, S. 2002. Población y fertilización nitrogenada en un híbrido de maíz para ensilar el Valle Central Regado. *Agrícola Técnica* 62 (2):255-265.
- Toledo, JM; Schultze-Kraft, R. 1982. Metodología para la evaluación agronómica de pastos tropicales. *In* Manual para la Evaluación Agronómica. Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales, Cali, Colombia, CIAT. p. 91-109.
- Tadeo-Robledo, M; Espinosa-Calderón, A; Zaragoza-Esperanza, J; Turrent-Fernández A; Sierra-Macías, M; Gómez-Montiel, N. 2012. Forraje y grano amarillo para el Valle alto de México. *Agronomía Mesoamericana* 23(2):281-288
- Van Vuuren, A; Huhtanen, P; Dulphy, J. 1995. Improving the feeding and health value of ensiled forages. *Proceedings of the 1vth. International Symposium of the Nutrition of Herbivores*. Francia. p. 279-308.
- Villa, AF; Meléndez, AP; Carulla, JE; Pabón, ML; Cárdenas, EA. 2010. Estudio microbiológico y calidad nutricional del ensilaje de maíz en dos ecorregiones de Colombia. *Rev Colomb. Cienc. Pecu.* 23(1):65-77.
- Weiss, B. 2014. Forage evaluation: Wading through a sea of numbers. Ohio State University. Consultado 8 feb. 2018. Disponible en <http://www.dairyherd.com/>

- dairy-news/Forage-evaluation-Wading-through-a-sea-of-numbers-259091251.html
- Wingching-Jones, R. 2006. Evaluación del proceso de ensilaje de *Arachis pintoi*. Tesis M.Sc. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 65 p.
- Yescas, CP; Segura, MA; Martínez, L; Álvarez, VP; Montemayor, JA; Orozco, JA; Frias, JE. 2015. Rendimiento y calidad de maíz forrajero (*Zea mays* L.) con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas. Revista Internacional de Botánica Experimental 84:272-279.
- Zaragoza-Esparza, J; Tadeo-Robledo, M; Espinosa-Calderón, A; López-López, C; García-Espinosa, JC; Zamudio-González B; Turrent-Fernández, A; Rosado-Núñez, F. 2019. Rendimiento y calidad de forraje de híbridos de maíz en Valles Altos de México Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 10(1):101-111.



INCREMENTO DE LA FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO Y EL CRECIMIENTO DE LA SOYA (*Glycine max*) MEDIANTE EL USO DE HONGOS SOLUBILIZADORES DE FÓSFORO*

Leida Castro-Barquero¹

Palabras clave: solubilizadores de P; *Bradyrhizobium*; sostenibilidad; FBN; consorcio microbiano; sideróforos.
Keywords: P solubilizers; *Bradyrhizobium*; sustainability; BNF; microbial consortium; siderophores.

Recibido: 25/07/23

Aceptado: 02/10/23

RESUMEN

Introducción. La soya establece una simbiosis con *Bradyrhizobium japonicum* para fijar N atmosférico. La coinoculación con otros microorganismos promotores del crecimiento (MPC) puede incrementar la Fijación Biológica de Nitrógeno (FBN) y el crecimiento de las plantas. **Objetivo.** Determinar si la inoculación con los hongos solubilizadores de P (SP), *Aspergillus flavus* (S1) y *Trichoderma longibrachiatum* (S2), afecta variables de crecimiento y de FBN en soya. **Materiales y métodos.** En un Andisol y un Ultisol en invernadero, se evaluaron variables de crecimiento y FBN en soya inoculada con *B. japonicum* y 2 SP. Se evaluaron 5 tratamientos: un testigo absoluto (T), adición de roca fosfórica (RF), adición de RF e inoculación con *B. japonicum* (BRF) y la adición de RF, *B. japonicum* y los 2 SP de manera independiente (BRFS1 y

BRFS2). Se estableció un diseño irrestricto al azar con 4 repeticiones y los datos se analizaron según la normalidad, con ANDEVA y DGC al 5% o Kruskal Wallis al 5%. **Resultados.** Se obtuvo un efecto positivo sobre las variables evaluadas, cuando la soya se inoculó con los SP además de *B. japonicum*. El efecto fue tendencia en el Andisol, para las variables peso fresco aéreo y número de nódulos y su peso seco, mientras que para el Ultisol se encontró significancia para estas mismas variables, así como para el peso seco aéreo, área foliar y contenido de N y P foliar, el efecto fue mayor en BRFS2. En términos absolutos el mayor contenido de P en la biomasa microbiana del suelo y la mayor población de SP se encontró en el tratamiento con la presencia de S2. Las poblaciones de Fijadores de N fueron mayores para T y RF. **Conclusión.** La inoculación con hongos SP puede afectar positivamente la FBN, las cantidades de N y P foliar así como el crecimiento de las plantas de soya.

* Investigación financiada bajo el marco del proyecto VI-33-B6-083 inscrito en la Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica.

¹ Autora para correspondencia. Correo electrónico: leida.castro@ucr.ac.cr
Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas-Agroalimentarias, San José, Costa Rica.  0000-0002-3788-7173.

ABSTRACT

Increase the biological nitrogen fixation and the growth of soybean (*Glycine max*) using phosphorus-solubilizing fungi.

Introduction. Soybean establishes a symbiosis with *Bradyrhizobium japonicum* that allows it to fix atmospheric N. Coinoculation with other plant growth-promoting microorganisms can increase Biological Nitrogen Fixation (BNF) and plant growth. **Objective.** Determine if inoculation with P-solubilizing fungi (SP), *Aspergillus flavus* (S1) and *Trichoderma longibrachiatum* (S2), affects growth and BNF variables in soybeans. **Materials and methods.** In the greenhouse on an Andisol and an Ultisol, growth variables and BNF were evaluated in soybeans inoculated with *B. japonicum* and 2 SPs. Five treatments were evaluated: an absolute control (T), addition of phosphate rock (RF), addition of RF and inoculation with *B. japonicum* (BRF) and the addition of RF, *B.*

japonicum and the 2 SPs independently (BRFS1 and BRFS2). An unrestricted randomized design with 4 repetitions was established and the data was analyzed according to normality, either with ANDEVA and DGC at 5% or Kruskal Wallis at 5%. **Results.** The responses obtained showed a positive effect on the evaluated variables when soybeans were inoculated with SP in addition with *B. japonicum*. The effect was a trend in Andisol, for the variables aerial fresh weight and number of nodules and their dry weight, while for Ultisol significance was found for these same variables, as well as for aerial dry weight, leaf area and N content and foliar P, with the greatest effect in BRFS2. In absolute terms, the highest P content in the soil microbial biomass and the highest SP population was found in the treatment with the presence of S2. The populations of N Fixers (NF) in the soil were higher for T and RF that did not have inoculation with *B. japonicum*. **Conclusion.** Inoculation with SP fungi can positively affect BNF, foliar N and P amounts as well as soybean plant growth.

INTRODUCCIÓN

El N y el P son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y el soporte de la vida en su conjunto. La disponibilidad de estos nutrientes está regulada en los ecosistemas, a través de procesos complejos relacionados con los ciclos biogeoquímicos, y son mediados de una u otra manera por una alta diversidad de poblaciones microbiológicas (Parewa *et al.* 2018) interrelacionadas, interdependientes y autoorganizadas (Morin 2002).

En el caso del N, la atmósfera está compuesta por 78,08% de N₂, un gas inerte que en condiciones naturales es prácticamente no disponible para plantas y animales (Islam *et al.* 2017) y solo puede ser disponibilizado por bacterias y arqueas en los ambientes bióticos. Después de que Fritz Haber y Carl Bosch descubrieron, en las primeras décadas del siglo XX, la forma de sintetizarlo de la atmósfera, la tecnología se

ha utilizado en la fabricación de fertilizantes nitrogenados. Esto ha permitido aplicar grandes cantidades de N soluble en los suelos agrícolas y aumentar ampliamente el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, de manera asociada el uso de esta tecnología ha contribuido de forma muy significativa con la contaminación de mantos acuíferos, la eutrofización, la desestabilización de las poblaciones naturales, la producción de gases de efecto invernadero, la lluvia ácida (Savci 2012) y los daños a la salud humana (El-Nahhal 2018). Además el proceso demanda mucha energía y requiere quemar toneladas de gas natural y contar con reactores de acero de paredes gruesas para contener la presión necesaria. Por otro lado, el proceso industrial está muy cercano a los límites tecnológicos, lo que deja casi sin espacio a las mejoras adicionales mediante la optimización tecnológica (Cherkasov *et al.* 2015).

En el caso del P, además del impacto ecológico negativo de su uso como fertilizante

soluble, que incluye la contaminación de mantos acuíferos, la eutrofización, la desestabilización de las poblaciones naturales, entre otras (Schindler *et al.* 2008), este nutriente impone un límite físico insoslayable a la agricultura industrial, ya que el cenit de los yacimientos fosfóricos se estima para la década del 2030-2040, lo que limitará inevitablemente la producción de fertilizantes fosforados de síntesis química (Fernández y González-Reyes 2014).

En los últimos años, la productividad de muchos cultivos se ha reducido, debido a la degradación de la calidad y salud de los suelos y los ecosistemas en general. Una de las causas principales de esta problemática es el uso continuo de fertilizantes químicos solubles, sobre todo de N y P (Savci 2012). Hay consenso en que esta práctica tiene un efecto nocivo sobre el suelo y los ecosistemas en general (Savci 2012, Parewa *et al.* 2018), por lo que es urgente encontrar nuevas vías para solventar la nutrición de las plantas. La producción sostenible de cultivos agrícolas sólo podrá lograrse mediante la aplicación de técnicas que no deterioren la salud del suelo y los ecosistemas (Parewa *et al.* 2018, Singh *et al.* 2016), cualquier otra vía no podrá ser sostenible en una biosfera finita.

Debido a esto, existe un creciente interés para reducir la dependencia en la fertilización química, con el establecimiento de prácticas agrícolas que aprovechen y se integren con los procesos y ciclos naturales (Giraldo 2015) para mantener la calidad y salud de los suelos. La inoculación de plantas con microorganismos con capacidad biofertilizante es una práctica acorde con la puesta en marcha de una nueva racionalidad, que entiende que la agricultura, además de producir bienes agrícolas como alimentos y fibras, tiene un impacto directo sobre la estabilidad dinámica de los ecosistemas, la sostenibilidad ambiental, y el bienestar animal y humano (Kibblewhite *et al.* 2008; Giraldo y Toro 2020).

Los microorganismos del suelo que se asocian a las plantas y presentan efectos benéficos para su desarrollo, han sido denominado microorganismos promotores del crecimiento

vegetal (MPCV), dentro de ellos se encuentran los conocidos como biofertilizantes. Los biofertilizantes representan una herramienta para mejorar la nutrición de las plantas, ya que posibilitan la disponibilidad de nutrientes, así como una mejor eficiencia de su uso, sin causar daños en los ecosistemas (Singh *et al.* 2016).

Los biofertilizantes incluyen, entre otros, los microorganismos solubilizadores de fósforo (SP) y las bacterias fijadoras de N (FN). En cuanto a las FN se encuentran tanto las de vida libre como el género *Azotobacter*, las asociadas a la rizosfera como el género *Azospirillum* y las que establecen asociaciones simbióticas endofíticas con plantas como las leguminosas y forman estructuras radicales especializadas para la fijación del N atmosférico, conocidas como nódulos (Parewa *et al.* 2018). Este último es el caso de la relación simbiótica entre la bacteria *Bradyrhizobium japonicum* y la soya.

Las bacterias FN en toda su diversidad, forman parte integral de sistemas vivos concretos y ecosistemas y son reconocidas como responsables de la mayor parte de la fijación del nitrógeno atmosférico, por medio del proceso conocido como Fijación Biológica de Nitrógeno (FBN) (Soumare *et al.* 2020). Al contrario del proceso industrial Haber-Bosch, la FBN tiene lugar imperceptiblemente a temperatura y presión ambiente, por esto desde el punto de vista ambiental se muestra como un proceso de autorregulación sistémica que no tiene problemas ambientales asociados (Cherkasov *et al.* 2015).

Los géneros de *Rhizobium* y *Bradyrhizobium* han sido utilizados como inoculantes en la agricultura, en la producción de leguminosas de interés para el consumo humano y animal. Entre los que destaca el cultivo de la soya (*Glycine max*) y una gran variedad de frijoles (*Phaseolus* sp.) que producen biomasa y grano, así como también leguminosas utilizadas para la producción de forrajes, coberturas y abonos verdes (Hungria *et al.* 2013).

Las leguminosas tienen un papel fundamental en el desarrollo de estrategias para asegurar una producción agrícola sin afectar

negativamente el medio ambiente, ya sea por la producción directa de los cultivos de leguminosas o por la utilización de los residuos de cosecha que pueden incorporarse al suelo superficialmente y/o ser aprovechados en asociaciones y rotaciones, como fuente de N para el suelo y otros cultivos (Islam *et al.* 2017).

Las asociaciones simbióticas entre las leguminosas y *Rhizobium* pueden reducir alrededor de 70 millones de toneladas por año de N atmosférico a amoníaco; esta cantidad representa el 40% del total del N fijado biológicamente, el 60% restantes es fijado por bacterias en asociación en la rizosfera o aquellas de vida libre (Islam *et al.* 2017).

El cultivo de la soya en asociación con *Bradyrhizobium* puede fijar hasta 300 kg.ha⁻¹. año⁻¹ de N atmosférico para su crecimiento y a la vez enriquecer la fertilidad y el contenido de materia orgánica del suelo (Rattan *et al.* 2017, Soumare *et al.* 2020, Islam *et al.* 2017).

Para el caso particular de la soya, el establecimiento de la simbiosis es fundamental para lograr una producción adecuada, por lo que la inoculación con cepas de *B. japonicum* eficientes ha sido bastante estudiada (Rahmani *et al.* 2000, Kazemi *et al.* 2005, Saranraj *et al.* 2021, Edson Zilli *et al.* 2021). Maluk *et al.* (2023) indican que la capacidad de FBN de la soya nodulada se puede utilizar para proporcionar la mayoría de los requisitos de N de la planta, pero requiere la inoculación con cepas de *Bradyrhizobium* no nativas, ya que la falta de inoculación da como resultado reducciones significativas tanto en el rendimiento como en la calidad del grano.

La investigación sobre la contribución de la inoculación múltiple de biofertilizantes en la producción de soya es menos abundante y se ha prestado menor atención al efecto combinado de la inoculación con microorganismos SP. El P, a pesar de ser abundante en los suelos tanto en formas inorgánicas como orgánicas, es poco disponible para las plantas en muchos de los suelos agrícolas en todo el mundo e incluso en suelos considerados como fértiles, generalmente no es suficiente debido a su poca disponibilidad

(Gyaneshwar *et al.* 2002). El P es requerido para procesos tan importantes como la fotosíntesis, la FBN, el desarrollo de la raíz, la floración, la formación de semillas, la fructificación y la mejora de la calidad de los cultivos (Lamyaa *et al.* 2019).

Debido a la inmovilización en los suelos la eficiencia del uso de fertilizantes fosfóricos en todo el mundo es de alrededor de 10-25% y la concentración de fósforo disponible (aniones de ortofosfatos) para las plantas en la solución del suelo es muy baja y alcanza el nivel de 1 a 5 μM (Gyaneshwar *et al.* 2002, Richardson *et al.* 2009, Islam *et al.* 2017, Lamyaa *et al.* 2019).

Los microorganismos pueden biodisponibilizar el P nativo del suelo, así como fuentes adicionadas como la roca fosfórica (RF). La biodisponibilidad de P por los microorganismos se atribuye principalmente a la solubilización por excreción de ácidos orgánicos, sin embargo, otros procesos como la producción de sideróforos están involucrados (Hallama *et al.* 2019, Rawat *et al.* 2021, Basílio *et al.* 2022). De esta manera, estos microorganismos son capaces de transformar el P fijado o no disponible en el suelo, a formas disponibles para la planta. Paralelamente, la biomasa microbiana puede asimilar el P soluble y evitar que se fije en la fase mineral del suelo, y de esta forma permanece biodisponible (Patiño-Torres y Sanclemente-Reyes 2014, Islam *et al.* 2017, Lamyaa *et al.* 2019, Rawat *et al.* 2021).

El P es requerido en cantidades apropiadas por todos los cultivos, pero para las leguminosas su presencia es muy relevante, ya que la FBN es un proceso altamente demandante de energía y por tanto, dependiente de una cantidad adecuada de P disponible, el cual forma parte de la molécula de adenosín trifosfato (ATP), principal transportador energético para la mayoría de los procesos celulares incluyendo la FBN (Kleinert *et al.* 2014, Li *et al.* 2020, Lamyaa *et al.* 2019, Islam *et al.* 2017).

Se ha observado que la co-inoculación de cepas de *Rhizobium* junto con otros MPCV, como los solubilizadores de P, permite una mayor FBN y un mejor crecimiento y producción de las plantas, debido posiblemente a una nutrición más

adecuada y/o a otros efectos promovidos por la interacción de los microorganismos inoculados y sus relaciones con el entorno, dentro del concepto de holobionte (Cassan *et al.* 2009, Zarei *et al.* 2012, Parewa *et al.* 2018, Lyu *et al.* 2021). De esta manera, los microorganismos que fijan N y aquellos que solubilizan P presentan potencial para ser utilizadas como parte de un sistema general de gestión agrícola, que permita reducir el uso de fertilizante sintético (Parewa *et al.* 2018, Islam *et al.* 2017).

En esta investigación, se evaluó a nivel de invernadero y en suelos (Andisol y Ultisol) de Costa Rica, el efecto de la inoculación con los hongos nativos, *Aspergillus flavus* (CIA-UCR-20SP) y *Trichoderma longibrachiatum* (CIA-UCR-29SP), descritos previamente como SP por Vargas y Castro (2019), sobre el crecimiento y la nutrición nitrogenada y fosfórica de las plantas

de soya y la relación simbiótica que establece con *Bradyrhizobium japonicum*. Esto con el fin de explorar técnicas agroecológicas particulares y locales que puedan insertarse dentro de un manejo agrícola sostenible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos se realizaron en el invernadero del Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (LMA-CIA-UCR). Se utilizaron 2 suelos un Andisol de Rancho Redondo, San José y un Ultisol de Sarapiquí, Heredia. Los respectivos análisis de suelo se muestran en la Tabla 1. Cada suelo por separado se homogeneizó y se colocaron en recipientes de 4 litros de capacidad.

Tabla 1. Análisis químico de los suelos utilizados realizados en el LSF-CIA.

pH		cmol (+).L ⁻¹					% mg.kg ⁻¹		mg.L ⁻¹					
H ₂ O	CE mS/cm	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P-Total	P	Zn	Cu	Fe	Mn	
5,5	1,5	0,5	4	1	0,2	5			10	3	1	10	5	
Andisol	5,6	0,4	0,16	6,32	1,70	0,23	8,41	2	986	17	5,4	9	140	6
Ultisol	5	0,1	1,41	3,33	1,27	0,18	6,19	23		3	5,0	7	273	34

Para la siembra de cada unidad experimental, se utilizó 2 semillas de soya de la variedad para grano y forraje CIGRAS-UCR-06 y se inocularon según el tratamiento, con 3 cepas de *Bradyrhizobium japonicum* en mezcla (CIA-UCR-506, CIA-UCR-508 y CIA-UCR-514), *Aspergillus flavus* (cepa CIA-UCR-20SP) (S1) y *Trichoderma longibrachiatum* (cepa CIA-UCR-29SP) (S2), hongos previamente identificados (Vargas y Castro 2019) por técnicas moleculares en el Centro de Investigación en Protección de Cultivos de la UCR (CIPROC-UCR), además Vargas y Castro (2019) describen su potencial como SP. Ocho días antes de la siembra se aplicó

a los tratamientos que así lo requerían 8 g de roca fosfórica 33% P.maceta⁻¹.

La inoculación con *B. japonicum* se realizó directamente a la siembra con la aplicación de 10 ml a cada semilla de una solución con una población de 10⁸ UFC.ml⁻¹. La mezcla bacteriana se suspendió en agua esterilizada, a partir del crecimiento en placas Petri con el medio agar levadura manitol (ALM). Los hongos se aplicaron cuando las plantas emergieron del suelo (10 días después de la siembra) y se realizó una segunda aplicación 24 días después de la siembra. Los hongos se aplicaron también en una solución acuosa con una concentración 10⁶, la

suspensión en agua se realizó a partir del crecimiento sobre placas de Petri con medio papa dextrosa agar (PDA) y se aplicaron 50 ml de la solución en forma de “drench” alrededor de cada planta, para un total de 100 ml por maceta.

Los ensayos se organizaron de manera independiente en un diseño experimental irrestricto al azar con 4 repeticiones y los 5 tratamientos siguientes: un testigo absoluto (T), adición de roca fosfórica (RF), adición de RF e inoculación con *B. japonicum* (BRF), y la adición de RF, *B. japonicum* y los 2 SP independientemente (BRFS1 y BRFS2) (Figura 1A). Luego de comprobar la normalidad de los datos (Shapiro-Wilks), se analizaron con ANDEVA y

DGC ($p < 0,05$) y con Kruskal Wallis al 5% de significancia.

Los ensayos fueron evaluados en la etapa fenológica 50% de floración. Se separó la parte aérea y la parte radical y al tejido foliar se le determinó el peso fresco y se llevó a un horno con temperatura de 60°C por 48 horas, hasta alcanzar el peso seco que fue medido. A la parte radical se le determinó el peso fresco y se extrajeron los nódulos presentes, los mismos fueron colocados en contenedores metálicos para ser contados y pesados (Figura 1B), ambos materiales fueron llevados al horno por 48 horas y se les determinó el peso seco.

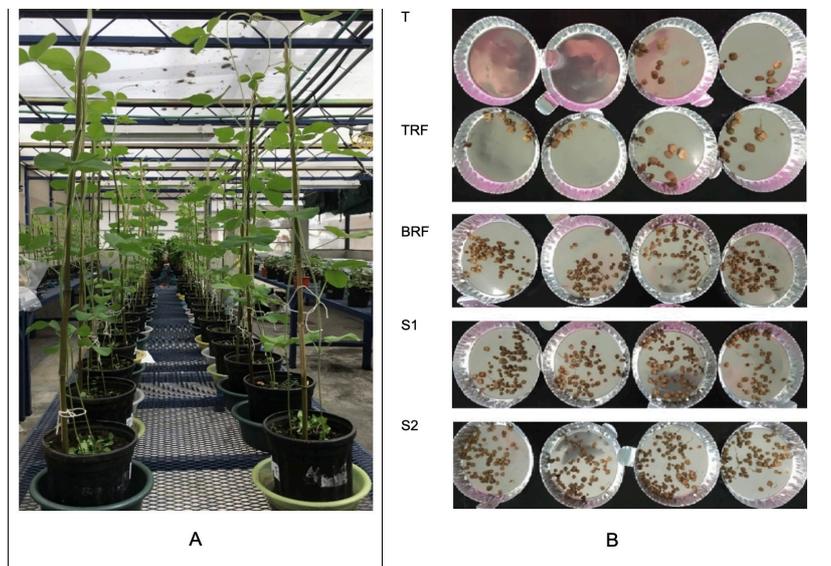


Figura 1. A. Organización del ensayo en el invernadero del LMA-CIA. B. Recolección de nódulos para su conteo y determinación de masa húmeda y seca.

Los pesos secos y frescos de los tejidos vegetales fueron determinados en una balanza granataria digital marca Sartorius, mientras que para los nódulos se utilizó una balanza analítica digital Explorer de OHAUS.

Las variables evaluadas en el Andisol para determinar el efecto sobre el crecimiento de las plantas fueron: el peso fresco y seco tanto foliar como radical (PFA, PSA, PFR, PSR). Mientras que, para determinar el efecto sobre las variables de FBN, se determinó el número de nódulos y el

peso fresco y seco (PFN: Peso fresco de nódulos y PSN: Peso seco de nódulos) de estos. En el Ultisol, se midieron estas mismas variables, pero como se observaron diferencias en el tamaño y el color de las hojas en los diferentes tratamientos, se evaluó el área foliar, de la hoja más grande presente en las 6 hojas más jóvenes completamente desarrolladas. Así también, se determinó la concentración de N y P foliar por los métodos descritos por Díaz y Hunter (1978) y Henríquez y Cabalceta (2012) aplicados en el Laboratorio de Suelos y Foliar del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (LSF-CIA-UCR). Las variables de FBN evaluadas fueron las mismas que en el Andisol.

En el Ultisol se evaluó, en el LMA-CIA-UCR, las poblaciones de solubilizadores de fósforo, fijadores de Nitrógeno y la biomasa microbiana de P en el suelo. Para determinar las poblaciones, se realizaron diluciones seriadas y recuentos viables (MLA-CIA-UCR 2015). Para las poblaciones de FN, se determinaron las unidades formadoras de colonias (UFC) mediante el recuento en el medio fijadores de N (FN) (MLA-CIA-UCR 2015). Las poblaciones de SP, se determinaron según la técnica del número más probable (NMP) (MLA-CIA-UCR 2015), con el medio de crecimiento propuesto por Osorio y Habte (2001) y la metodología utilizada por Vargas y Castro (2019). La determinación de biomasa microbiana de P en el suelo se realizó mediante el procedimiento de extracción-fumigación de Vance *et al.* (1987) y el P en solución se determinó en LSF-CIA-UCR por Espectroscopia de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).

De manera complementaria se determinó la capacidad de producción de sideróforos de las cepas *Aspergillus flavus* (cepa CIA-UCR-20SP) y *Trichoderma longibrachiatum* (cepa CIA-UCR-29SP), por medio de la metodología propuesta por Milagres *et al.* (1999), la cual determina un viraje de color del medio Cromo azulol S agar (CAS-azul), de azul a colores rojizos o naranjas, esto debido al secuestro del Fe, por los sideróforos producidos por el microorganismo. Debido a

que el medio CAS-azul es tóxico para muchos microorganismos, se preparan placas Petri con el medio indicado para el microorganismo a evaluar y el medio CAS-azul. Para este caso los hongos se colocaron para su crecimiento en PDA que ocupó el 50% de la placa y el viraje de color se evaluó en el medio CAS-azul que ocupó el otro 50%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En ambos suelos, se observó un efecto positivo de la inoculación con los hongos *Aspergillus flavus* (S1) y *Trichoderma longibrachiatum* (S2) sobre variables de crecimiento y FBN en el cultivo de la soya. Para el Andisol esta respuesta fue tendencia, y para el Ultisol fue estadísticamente significativa.

En cuanto al Andisol (Tabla 2), el tratamiento T mostró el menor PFA con 18,58 g y los 2 tratamientos con SP los mayores pesos (22,93 y 22,4 g) sin ser estos estadísticamente diferentes a los tratamientos TRF y BRF (20,73 y 21,31 g). Las variables PSA, PFR y PSR no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. En las variables de FBN el tratamiento T y TRF obtuvieron los menores valores para la variable número de nódulos (5,5 y 11), ya que en este caso no hubo inoculación con *Bradyrhizobium* y los nódulos formados fueron producto de la nodulación con cepas presentes en el suelo. Estos nódulos eran grandes, redondeados, pero poco esféricos, el color interno claro y ubicados en las raíces periféricas (Figura 2A). Los tratamientos BRFS1 y BRFS2 mostraron el mayor número de nódulos (73,25 y 79,75) mientras que el tratamiento BRF presentó un comportamiento intermedio para esta variable con 64,25 nódulos. Estos últimos 3 tratamientos mencionados mostraron nodulación en la base de la raíz y los nódulos eran más pequeños, esféricos (Figura 2B) y rojos en su interior, lo que indica la presencia activa de leghemoglobina, proteína involucrada en la regulación de la concentración de oxígeno dentro del nódulo e indicadora de la fijación por parte de la enzima nitrogenasa (Lloret-Pastor

2021). La posición espacial de los nódulos, en la base radical, es usual en la nodulación producto de la inoculación, ya que la infección con la

bacteria se da en los primeros estados de la germinación de la semilla.

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos para las variables evaluadas en el Andisol.

Tratamiento	PFA ¹ g	PSA g	PFR g	PSR g	PFN ¹ mg	PSN ¹ mg	Número nódulos ²
T	18,58 B	4,38	16,51	1,53	222,2 B	054,8 B	5,5 B
RF	20,73 A	4,55	16,15	1,56	636,4 A	149,4 A	11 B
BRF	21,31 A	4,44	16,41	1,55	678,4 A	185,4 A	64,25 AB
BRFS1	22,93 A	4,51	16,01	1,39	834,9 A	217,8 A	73,25 A
BRFS2	22,4 A	4,65	12,1	1,07	819,3 A	230,7 A	79,75 A

Letras diferentes en la misma columna muestran diferencias estadísticas entre medias, según DGC al 5% o Kruskal Wallis al 5% (¹ y ² respectivamente).



A



B

Figura 2. Tamaño, forma y posición de los nódulos en las plantas sin inocular (A) y aquellas inoculadas con *B. japonicum* (B).

Para las variables PFN y PSN, el tratamiento T mostró los menores valores, los otros tratamientos no presentaron diferencias significativas, pero la tendencia fue encontrar los mayores pesos en los tratamientos BRFS1 y BRFS2, los cuales contenían, además de la

cepa de *Bradyrhizobium*, los hongos *Aspergillus flavus* (S1) y *Trichoderma longibrachiatum* (S2) (Tabla 2).

En el Ultisol, se encontraron diferencias significativas en las variables PFA, PSA, PFN, PSN, número de nódulos, área foliar y

concentración de P y N foliar. Para el peso fresco aéreo (Figura 3), los tratamientos T, TRF y BRF mostraron el menor peso foliar con pesos entre 15 y 19,24 g; mientras que los tratamientos BRFS1 y BRFS2 mostraron los mayores pesos frescos foliares con valores de 23,77 y 25,78 g, respectivamente. El peso seco aéreo (Figura 3)

mostró el mismo comportamiento, en este caso, los tratamientos T, TRF y BRF mostraron pesos entre 4,49 y 5,50 g y los tratamientos con *Aspergillus flavus* (S1) y *Trichoderma longibrachiatum* (S2) valores significativamente mayores de 6,53 y 7,08 g para S1 y S2 respectivamente.

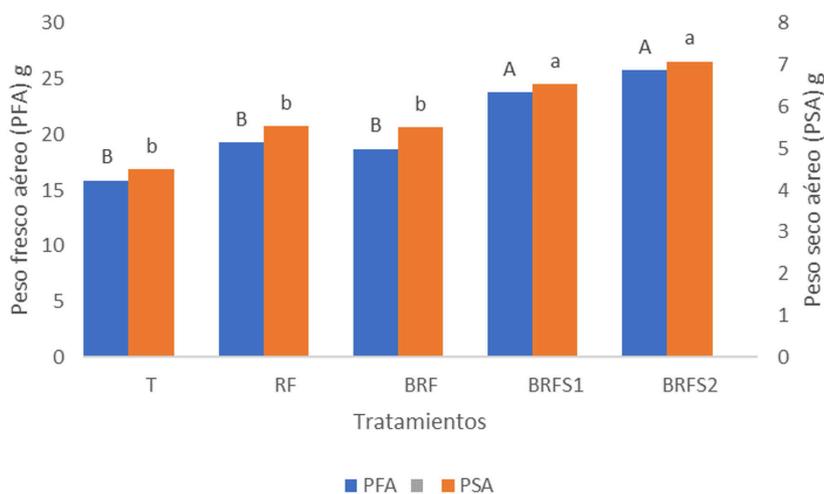


Figura 3. Peso fresco y seco aéreo encontrado en los diferentes tratamientos.

Letras diferentes en las columnas según el eje muestran diferencias estadísticas entre medias, según DGC al 5%.

Para las variables PFN y PSN (Figura 4), los tratamientos se distribuyeron en aquellos que presentaron los valores más bajos, que fueron el T y el TRF con 31,7 y 16,9 mg para el peso fresco, y 8 y 5 mg para el seco respectivamente. Así

como, los tratamientos con los valores estadísticamente más altos que fueron BRF con valores de 189 y 63 mg, y BRFS1 y BRFS2 con valores de 230 y 252,7 mg en peso fresco y 69 y 80 mg en peso seco.

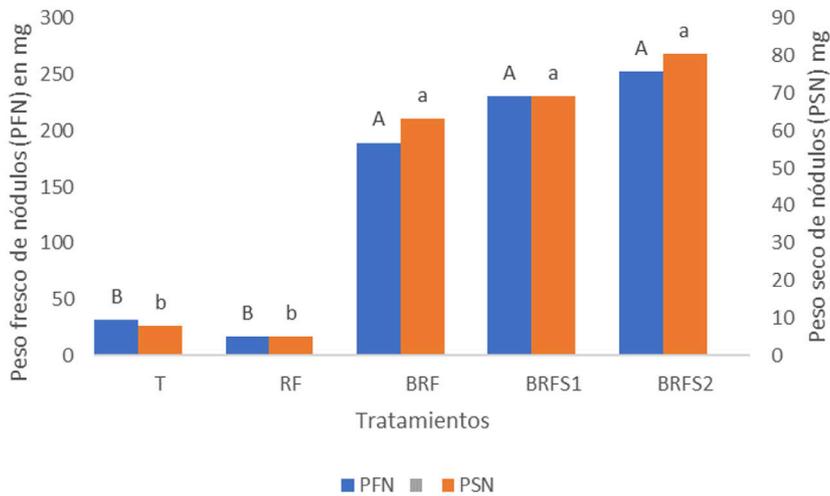


Figura 4. Peso fresco y seco de nódulos en los diferentes tratamientos.

Letras diferentes en las columnas según el eje muestran diferencias estadísticas entre medias, según DGC al 5% para el peso fresco y Kruskal Wallis al 5% para el peso seco.

Para la variable número de nódulos (Figura 5A), el comportamiento fue similar al observado en el suelo Andisol, tanto a las tendencias como en lo que se apuntó con respecto al tamaño, color y posición de los nódulos. En este caso, los tratamientos T y RF presentaron la menor cantidad de nódulos con un máximo de 2 nódulos,

el tratamiento BRF presentó un valor de 35,5 nódulos y valor intermedio de significancia, mientras que los tratamientos con *Aspergillus flavus* (BRFS1) y *Trichoderma longibrachiatum* (BRFS2) presentaron significativamente la mayor cantidad de nódulos con valores entre 48,75 y 52,75.

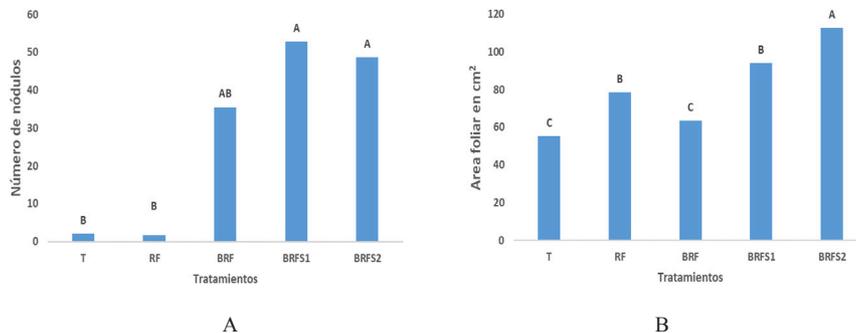


Figura 5. Número de nódulos (A) y área foliar (B) de las plantas de soya en los diferentes tratamientos.

Letras diferentes en las columnas muestran diferencias estadísticas entre medias, según DGC al 5% para el área foliar y Kruskal Wallis al 5% para el número de nódulos.

La variable área foliar (Figura 5B) presentó diferencias más diversas, en este caso, T y BRF mostraron los valores más bajos (55,18 y 63,62 cm²), los tratamientos RF y BRFS1 con valores de 78,54 y 94,03 cm² respectivamente y el mayor valor para esta variable lo obtuvo el tratamiento BRFS2 con un valor de 112,63 cm². Para esta variable se observa una reducción en la superficie foliar cuando se realiza la inoculación con *Bradyrhizobium* en presencia RF, pero sin los solubilizadores de P. En términos de valores absolutos, tanto BRFS1 como BRFS2, mostraron los valores más altos.

Con respecto al contenido de N foliar (Figura 6) los tratamientos con *Aspergillus*

flavus (BRFS1) y *Trichoderma longibrachiatum* (BRFS2) mostraron los valores más altos con 177 y 188 mg.planta⁻¹ respectivamente, mientras que el resto de los tratamientos mostraron valores más bajos entre 134 y 155 mg.planta⁻¹ (Figura 6). Los tratamientos no inoculados con *Bradyrhizobium* presentaron desde el inicio de la floración, hojas superiores amarillas, en contraste con los tratamientos inoculados (Figura 7). Para el contenido de P, destacó BRFS2 con el mayor valor (6,3 mg.planta⁻¹) seguido por BRFS1 con un valor intermedio en significancia de 5,2 mg.planta⁻¹, mientras que los tratamientos T, RF, BRF presentaron los menores valores (entre 3,8 y 4,4 mg.planta⁻¹) (Figura 6).

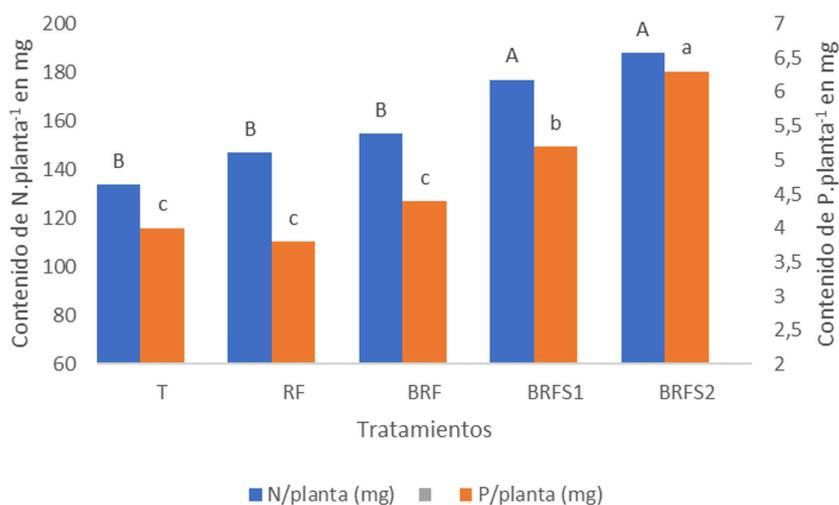


Figura 6. Contenido de N y P foliar en plantas de soya para los diferentes tratamientos.

Letras diferentes en las columnas según el eje muestran diferencias estadísticas entre medias, según DGC al 5%.

En relación con los resultados anotados anteriormente, Rosas *et al.* (2002) y Olivera *et al.* (2002) indican que la inoculación combinada de soya con *B. japonicum* y microorganismos SP (en este caso bacterias), aumentó el peso seco de las plantas, este resultado coincide con los resultados obtenidos en esta investigación.

Por su parte, Lamyaa *et al.* (2019) y Stajković-Srbinić *et al.* (2021) mostraron que la aplicación de fuentes fosfóricas, junto con bacterias SP también incrementó el rendimiento de grano y la biomasa seca de la soya y posibilitaron una mejor absorción de nutrientes, comparado con la aplicación del fósforo solo, lo que concuerda

con los resultados de la presente investigación, en donde, en el caso del Ultisol se obtuvo un aumento foliar de aproximadamente 20% en el contenido de N y 30% en el contenido de P, cuando se utilizaron los hongos solubilizadores junto con la aplicación de roca fosfórica, mostrando la necesidad de la mediación microbiológica para la obtención de estos nutrientes por la planta. En

este mismo sentido, Cao *et al.* (2017) también indicaron aumentos significativos en el rendimiento de la soya, debido a la co-inoculación con bacterias solubilizadoras de fósforo. Mientras que Sukiman *et al.* (2019) observaron resultados similares al inocular hongos micorrízicos junto con *Bradyrhizobium*.

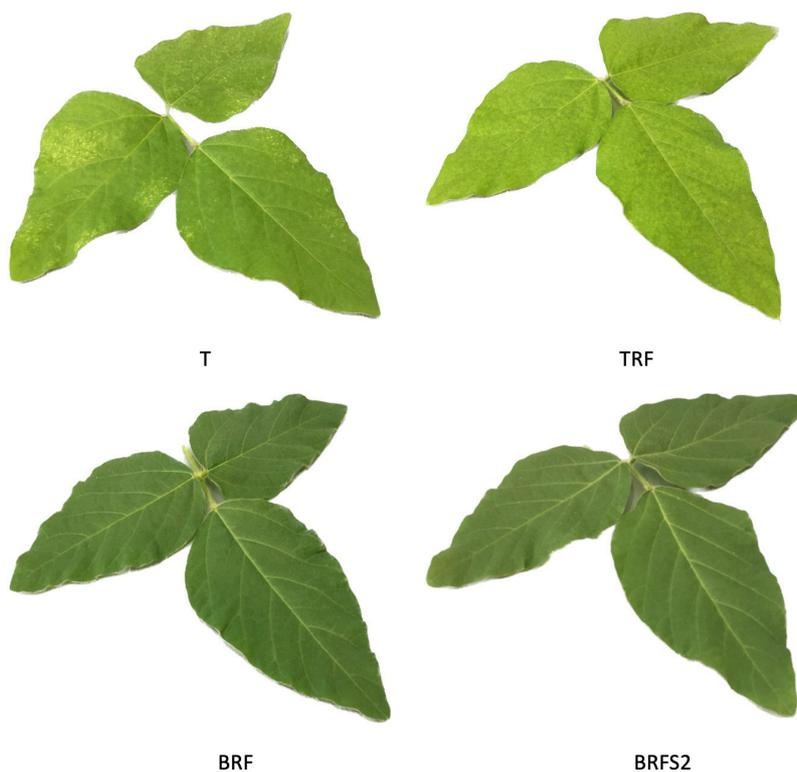


Figura 7. Coloración de las hojas jóvenes según tratamiento en el suelo Ultisol.

Hay poca información para soya, específicamente respecto a la utilización de hongos filamentosos como *Aspergillus flavus* (S1) y *Trichoderma longibrachiatum* (S2), utilizados en esta investigación. El-Nahrawy *et al.* (2020) mostraron que en condiciones de déficit hídrico la cepa de *Trichoderma* que utilizaron afectó

positivamente a la soya nodulada con *B. japonicum*. Las personas autoras indican que el hongo actuó como estimulador del desarrollo vegetativo y aumentó el contenido de N foliar y pigmentos fotosintéticos y proponen que un consorcio microbiano adecuado de *Bradyrhizobium* y *Trichoderma* podría representar un método práctico

y prometedor para aumentar la productividad de la soya y otras leguminosas agrónomicamente importantes; sin embargo, no indican que la cepa de *Trichoderma* utilizada fuera solubilizadora de P. Por su parte da Costa Leite *et al.* (2023) reportan incrementos en variables de crecimiento y producción de la soya inoculada con *Bradyrhizobium* sp., *Trichoderma asperellum* y *Bacillus amyloliquefaciens*, pero tampoco detallan las propiedades solubilizadoras de P de la cepa de *Trichoderma* utilizada.

Para las variables biomasa microbiana de P y las poblaciones de FN y SP evaluadas en el suelo de las unidades experimentales (Tabla 3), se observa que, aunque no se encontraron diferencias significativas, en términos absolutos el mayor contenido de P en la biomasa microbiana se encontró en el tratamiento con la inoculación de *Trichoderma longibrachiatum* (S2) así como, la mayor población de solubilizadores de P. Además, por reaislamiento se determinó que el microorganismo con mayor abundancia era S2. En el caso de las poblaciones de FN, se observó una tendencia a una población mayor en los tratamientos que no fueron inoculados con *B. japonicum*, lo que indica un posible efecto antagónico entre *B. japonicum* y otras cepas fijadoras de N presentes. Este efecto podría corresponder a regulaciones ecosistémicas de las poblaciones microbiológicas del suelo relacionadas con la FBN (Smercina *et al.* 2019).

Tabla 3. Resumen de los resultados obtenidos de biomasa microbiana de P y poblaciones de FN y solubilizadores de P.

Tratamientos	Biomasa de P mg.g ⁻¹	Log de UFC de FN	Log de UFC de SP
T	1,41	8,10	5,37
TRF	1,28	8,17	5,12
BRF	1,40	7,74	5,51
BRFS1	1,23	7,88	5,45
BRFS2	1,60	7,88	5,59

Las diferencias encontradas en la significancia estadística entre ambos suelos, que mostraron solo una tendencia para el suelo Andisol, mientras que fueron estadísticamente significativa en el Ultisol, se pueden relacionar con la mayor cantidad de P disponible en el Andisol (Tabla 1). Este elemento es necesario en el proceso de FBN, al menos para la gestión energética ya que se requieren 16 moles de ATP para reducir una molécula de N₂ atmosférico (Sun *et al.* 2021, Lloret-Pastor 2021). Como tal elemento era disponible a una mayor concentración para la planta en el Andisol, las diferencias entre los tratamientos fueron menores y no claramente definidos por el análisis estadístico. En el mismo sentido, el tamaño y la coloración de las hojas no mostraron diferencias evidentes en el Andisol, mientras que en el Ultisol, las diferencias en la coloración fueron contrastantes visualmente (Figura 5B, Figura 7). Esto indicó la deficiencia de N en los tejidos jóvenes en los tratamientos T y TRF que mostraron un color amarillo. Esta coloración se corrigió, con la aplicación de *Bradyrhizobium* en el tratamiento BRF, pero la adición de los hongos solubilizadores *Aspergillus flavus* (BRFS1) y *Trichoderma longibrachiatum* (BRFS2) incrementó significativamente el valor de los contenidos de N y P en las plantas (Figura 6), así como el tamaño de las hojas al comparar estos tratamientos con el BRF (Figura 5B).

Respecto a la producción de sideróforos, en la Figura 8 se observa que *Aspergillus flavus* mostró capacidad de producción, ya que viró el color del medio CAS-azul (en la parte superior) a tonos rojizos, a partir de los 30 días de crecimiento, mientras que *Trichoderma longibrachiatum* no presentó esa capacidad después de 45 días. La biodisponibilidad de P por los microorganismos se atribuye principalmente a la solubilización por excreción de ácidos orgánicos, pero otros procesos incluyen, la producción de sideróforos, oxidación directa, liberación de protones, producción de polisacáridos, simbiosis con micorrizas y, para el caso del P orgánico, la producción de enzimas como las fosfatasas y fitasas (Hallama *et al.* 2019, Rawat *et al.* 2021, Basilio

et al. 2022). Bajo las condiciones evaluadas en este ensayo, se puede descartar para *Trichoderma longibrachiatum* (cepa CIA-UCR-29SP), la producción de sideróforos como mecanismo de biodisponibilidad de P ya que fue incapaz de virar el color del medio CAS-azul (Figura 8).

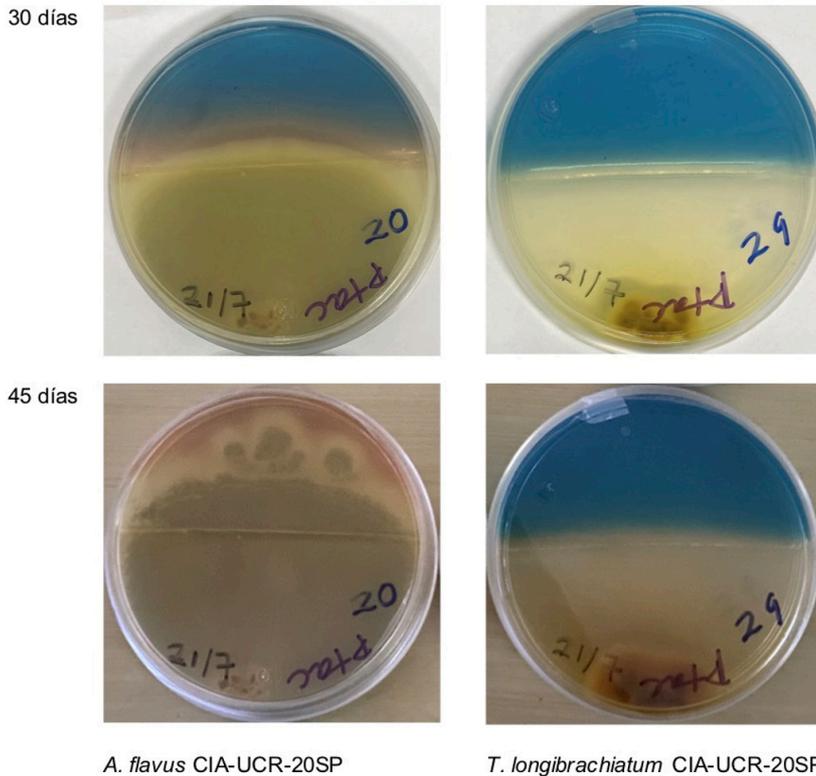


Figura 8. Placas Petri con medio CAS-azul (parte superior) y PDA (parte inferior) con los hongos *Aspergillus flavus* (izquierda) y *Trichoderma longibrachiatum* (derecha).

CONCLUSIÓN

La presente investigación muestra que la inoculación con los hongos solubilizadores de P, *Aspergillus flavus* (cepa CIA-UCR-20SP) y *Trichoderma longibrachiatum* (cepa CIA-UCR-29SP), puede afectar positivamente la FBN, los contenidos de P foliar y el crecimiento de las plantas de soya.

Las leguminosas son particularmente dependientes de una adecuada nutrición fosfórica, debido entre otras razones, al alto costo energético que supone la FBN, por esto, una adecuada disponibilidad de P es fundamental para el éxito de la simbiosis y se debe contemplar al utilizar leguminosas, para este fin, una vía ecológicamente viable es la biodisponibilidad microbiológica de fósforo a partir de fuentes

poco solubles como la roca fosfórica o las inmovilizadas en los suelos.

Aprovechar los beneficios de los consorcios microbianos en los suelos, es una estrategia prometedora para impulsar la adquisición de nutrientes por las plantas, fomentar efectos sinérgicos beneficiosos entre los microorganismos, promover la calidad y salud de plantas y suelos.

LITERATURA CITADA

- Basílio, F; Dias, T; Santana, M; Melo, J; Carvalho, L; Correia, P; Cruz, C. 2022. Multiple modes of action are needed to unlock soil phosphorus fractions unavailable for plants: The example of bacteria- and fungi-based biofertilizers. *Applied Soil Ecology* 178:1-11.
- Cao, N; Nguyen, B; Van, T. 2017. Effects of Bradyrhizobia and Phosphate-solubilizing bacteria on soybean (*Glycine max* L. Merrill) cultivated on Ferrasols of Cujut district, DakNong province, Vietnam. *Inter. J. Envir. & Agric.Res.* (3):70-79.
- Cassan, F; Perriga, D; Sgroya, V; Masciarellia, O; Pennab, C; Luna, V. 2009. *Azospirillum brasilense* Az39 and *Bradyrhizobium japonicum* E109, inoculated singly or in combination, promote seed germination and early seedling growth in corn (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L.). *European Journal of Soil Biology* 45:28-35.
- Cherkasov, N; Ibadon, A; Fitzpatrick, P. 2015. A review of the existing and alternative methods for greener nitrogen fixation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 90:24-33.
- da Costa Leite, R; Hungria, M; da Costa Leite, R; Souza de Ávila, W; Barata da Silva, G. 2023. Co-inoculation of soybean with *Bradyrhizobium* spp. and amazonian strains of *Trichoderma asperellum* and *Bacillus amyloliquefaciens* increases the productivity and profitability of the crop. *Crop Science* 1-47. DOI: <https://doi.org/10.1002/csc.21091>
- Díaz, R; Hunter, A. 1978. Metodologías de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 2 p.
- Edson Zilli, J; Sanches Pacheco, R; Gianluppi, V; Smiderle, O; Urquiaga, S; Hungria, M. 2021. Biological N₂ fixation and yield performance of soybean inoculated with *Bradyrhizobium*. *Nutr Cycl Agroecosyst* 119:323-336.
- El-Nahhal, Y. 2018. Nitrate Residues in Fruits, Vegetables and Bread Samples and Their Health Consequences. *Health* 10:487-501.
- El-Nahrawy, S; Elbagory, M; El-Dein, O. 2020. Biocompatibility Effect of *Bradyrhizobium japonicum* and *Trichoderma* Strains on Growth, Nodulation and Physiological Traits of Soybean (*Glycine max* L.) under Water Deficit Conditions. *Journal of Advances in Microbiology* 20 (11):52-66.
- Fernández, R; González-Reyes, D. 2014. En la espiral de la energía. Colapso del capitalismo global y civilizatorio. Volumen II. Madrid, España, *Ecologistas en Acción*. 449 p.
- Giraldo, O. 2015. Agroecología y complejidad. Acoplamiento de la técnica a la organización ecosistémica. *Polis* 41:1-21.
- Giraldo, O; Toro, I. 2020. Afectividad ambiental: sensibilidad, empatía, estéticas del habitar. Chetumal, Quintana Roo, México, El Colegio de la Frontera Sur. 172 p.
- Gyaneshwar, P; Naresh Kumar, G; Parekh, L; Poole PS. 2002. Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant Soil* 245:83-93.
- Hallama, M; Pekrun, C; Lambers, H; Kandelers, E. 2019. Hidden miners -the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant Soil* 434:7-45.
- Henríquez, C; Cabalceta, G. 2012. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 111 p.
- Hungria, M; Nogueira, M; Araujo, R. 2013. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve sustainability. *Biol Fertil Soils* 49:791-801.
- Islam, M; Ahmed, M; Hossain, M; Akter, H; Aktar S. 2017. Response of soybean to Rhizobium biofertilizer under different levels of phosphorus. *Progressive Agriculture* 28(4):302-315.
- Kazemi, S; Ghaleshi, S; Ghanbari, A; Kianoush, G. 2005. Effects of planting date and seed inoculation by the bacteria on the yield and yield components of two soybean varieties. *Agri. Sci. Nat. Resour.* 12(4):20-26.
- Kibblewhite, M; Ritz, K; Swift, M. 2008. Soil health in agricultural systems. *Philos. Trans. R Soc Lond B Biol Sci.* 363(1492):685-701.
- Kleinert, A; Venter, M; Kossmann, J; Valentine A. 2014. The reallocation of carbon in P deficient lupins affects biological nitrogen fixation. *Journal of Plant Physiology* 171:1619-1624.
- Lamyaa, A; El-Rahman, A; Sayed, D; Ewais, M. 2019. Effect of Different Sources of Phosphorus and Bio Fertilizers on Yield and Seeds Quality of Soybean. *Egypt Menoufia J. Soil Sci.* 4:15-35.
- Li, Y; Li, Q; Guan, G; Chen, S. 2020. Phosphate solubilizing bacteria stimulate wheat rhizosphere and endosphere biological nitrogen fixation by improving phosphorus content. *PeerJ* 8: e9062. DOI: 10.7717/peerj.9062

- Lloret-Pastor, F. 2021. Fijación biológica del nitrógeno y síntesis del nitrato: usos y aplicaciones. *An. Quím.* 117(3):203-208.
- Lyu, D; Zajonc, J; Pagé, A; Tanney, C; Shah, A; Monjezi, N; Msimbira, L; Antar, M; Nazari, M; Backer, R. 2021. Plant Holobiont Theory: The Phytomicrobiome Plays a Central Role in Evolution and Success. *Microorganisms* 9:675.
- Maluk, M; Madeline Giles, M; Wardell, G, Akramin, A; Ferrando-Molina, F, Murdoch, A; Barros, M; Beukes, C; Vasconcelos, M; Harrison, E; Daniell, T, Quilliam, R; Iannetta, P; James, E. 2023. Biological nitrogen fixation by soybean (*Glycine max* [L.] Merr.), a novel, high protein crop in Scotland, requires inoculation with non-native bradyrhizobia. *Front. Agron. Sec. Plant-Soil Interactions* 5:1196873.
- Milagres, A; Machuca, A; Napoleao, D. 1999. Detection of siderophore production from several fungi and bacteria by a modification of chrome azurol S (CAS) agar plate assay. *Journal of Microbiological Methods* 37:1-6.
- MLA-CIA-UCR (Manual de Laboratorio de Microbiología Agrícola-Centro de Investigaciones Agronómicas Universidad de Costa Rica). 2015. Técnicas para el recuento de Microorganismos. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 47 p.
- Morin, E. 2002. El método II. La vida de la vida 5 ed. Madrid, España, Ediciones Catedra. 529 p.
- Olivera, M; Iribarne, C; Lluch, C. 2002. Effect of phosphorus on nodulation and N fixation by bean (*Phaseolus vulgaris*). Proceedings of the 15th International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization. Salamanca, Spain, Salamanca University. s. p.
- Osorio, N; Habte, M. 2001. Synergistic influence of an arbuscular mycorrhizal fungus and a P solubilizing fungus on growth and P uptake of *Leucaena leucocephala* in a Oxisol. *Arid Land Research and Management* 15:263-274.
- Parewa, H; Meena, V; Jain, L; Choudhary, A. 2018. Sustainable Crop Production and Soil Health Management Through PlantGrowth-Promoting Rhizobacteria. In Meena, VS. (ed.). *Role of Rhizospheric Microbes in Soil*, Springer Nature Singapore Pte Ltd. p. 299-329.
- Patiño-Torres, C; Sanclemente-Reyes, O. 2014. Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible. *Entramado* 10(2):288-297.
- Rahmani, A; Rastin, S; Sajadi, A. 2000. Investigate the possibility of predicting the need of inoculation of soybean, based on the determine number of Bradyrhizobium japonicum bacteria and index of availability of soil nitrogen. *Soil Water J.* 12(7):21-32.
- Rattan, L; Claire, Ch; Philippe, C. 2017. Letter to the Editor: Answer to the Viewpoint “Sequestering Soil Organic Carbon: A Nitrogen Dilemma. *Environ. Sci. Technol.* 51:11502-11502.
- Rawat, P; Das, S; Shankhdhar, D; Shankhdhar, S. 2021. Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21:49-68.
- Richardson, A; Barea, J; McNeill, A; Prigent-Combaret, C. 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant Soil* 321:305-339.
- Rosas, S; Rovera, M; Andres, J; Correa, N. 2002. Effect of phosphorous solubilizing bacteria on the rhizobia-legume symbiosis. Proceedings of the 15th International Meeting on Microbial phosphate Solubilization. Salamanca, Spain, Salamanca University.
- Saranraj, P; Sivasakthivelan, P; Al-Tawaha, A; Sudha, A; Al-Tawaha, A; Sirajuddin, S; Hastang. 2021. Diversity and evolution of Bradyrhizobium communities relating to Soybean cultivation: A review. *Earth and Environmental Science* 788:012208.
- Savci, S. 2012. An Agricultural Pollutant: Chemical Fertilizer International Journal of Environmental Science and Development 3(1):77-80.
- Schindler, D, Hecky, R, Findlay, D, Stainton, M; Parker, B; Paterson, M; Beaty, K; Lyng, M; Kasian, S. 2008. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *PNAS* 105(32):11254-11258.
- Singh, M; Dotaniya, M; Mishra, A; Dotaniya, C; Regar, K; Lata, M. 2016. Role of Biofertilizers in Conservation Agriculture. *Conservation Agriculture* 113-134. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-2558-7_4
- Smercina, D; Evans, S; Friesen, M; Tiemann, L. 2019. To fix or not to fix: controls on free-living nitrogen fixation in the rhizosphere. *Appl Environ Microbiol* 185:02546-18. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02546-18>
- Soumare, A; Diedhiou, A; Thuita, M; Hafidi, M; Ouhdouch, Y; Gopalakrishnan, S; Kouisni, L. 2020. Exploiting Biological Nitrogen Fixation: A Route Towards a Sustainable Agriculture *Abdoulaye Plants* 9:1-22.
- Štajković-Srbinović, O; Kuzmanović, D; Rasulić, N; Knežević, M; Ugrenović, V; Buntić, A; Dušica, D. 2021. Effect of inoculation with Bradyrhizobium and phosphate solubilizing bacteria on soybean seed yield and composition. *Zemljiste I Biljka* 70(2):56-66.
- Sukiman, H; Lekatompessy, S; Widowati T; Simarmata, R. 2019. Application of arbuscular mycorrhizal fungi in combination with nitrogen fixing bacteria and other potential soil microbes as biofertilizer for soybean plant. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental*

- Science 308 012059. DOI:10.1088/1755-1315/308/1/012059
- Sun, W; Shahrajabian, M; Cheng, Q. 2021. Nitrogen Fixation and Diazotrophs-A Review. Rom Biotechnol Lett. 26(4):2834-2845.
- Vance, E; Brookes, P; Jenkinson, D. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry 19(6):703-707.
- Vargas, P; Castro, L. 2019. Aislamiento y Evaluación de Microorganismos Solubilizadores de Fósforo de Andisoles de Costa Rica. Agronomía Costarricense 43(1):47-68.
- Zarei, I; Sohrabi, Y; Heidari, G; Jalilian, A; Mohammadi, K. 2012. Effects of biofertilizers on grain yield and protein content of two soybean (*Glycine max* L.) cultivars African Journal of Biotechnology 11(27):7028-7037.



Nota técnica

CAMBIOS DE ALGUNAS PROPIEDADES QUÍMICAS EN TRES SUELOS SALINOS, TRATADOS CON CINCO ENMIENDAS CÁLCICAS

Edgar Patricio Cedeño-Coll¹, Josué Otoniel Dilas-Jiménez^{2*}, Manuel Danilo Carrillo-Zenteno³

Palabras clave: conductividad eléctrica; pH; fertilidad del suelo.

Keywords: electrical conductivity; pH; fertility the soil.

Recibido: 23/08/23

Aceptado: 25/10/23

RESUMEN

Introducción. Los suelos salinos son una amenaza para la productividad de los cultivos, lo que ocurre en las zonas arroceras del Ecuador. **Objetivo.** Evaluar los cambios en algunas propiedades químicas en 3 suelos debido al efecto de la aplicación de 5 enmiendas minerales, particularmente los efectos sobre las variables relacionadas con la salinidad. **Materiales y métodos.** Las enmiendas cálcicas ensayadas (CaCO_3 , Ca(OH)_2 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CaSiO_4) y una zeolita, se aplicaron en 5 dosis al cultivo de arroz. El diseño experimental fue completamente al azar, con arreglo factorial $3 \times 5 \times 5 \times 3$ de los tratamientos. Cada tratamiento se repitió 3 veces. **Resultados.** Los tratamientos provocaron cambios en la Conductividad Eléctrica (CE) y pH de la solución del suelo y en la fertilidad del suelo. La salinidad de los suelos en la zona de estudio se debe a la presencia de

Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y principalmente Mg^{2+} en el extracto de saturación de los suelos. **Conclusiones.** El uso de enmiendas en general, específicamente CaSO_4 , zeolita y Ca(OH)_2 , mejoraron las propiedades químicas de los suelos al reducir la CE de la solución del suelo.

ABSTRACT

Changes in the chemical characteristics of three saline soils, treated with five calcium amendments. Introduction. Saline soils are a threat to crop productivity, which occurs in the rice-growing areas of Ecuador. **Objective.** To assess the changes in the chemical properties of 3 experimental soils caused by the effect of the application of mineral amendments, particularly the effects on the variables related to salinity. **Materials and methods.** The

* Autor para correspondencia. Correo electrónico: 20191708@lamolina.edu.pe

1 Universidad Tecnológica Equinoccial, Santo domingo de Tsáchilas, Ecuador.  0000-0002-7607-4191.

2 Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.  0000-0003-4256-8393.

3 Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). Estación Experimental Tropical Pichilingue (EETP). Departamento de Manejo de Suelos y Aguas (DMSA). Quevedo, Los Ríos, Ecuador.  0000-0001-7062-8248.

calcium amendments tested (CaCO_3 , Ca(OH)_2 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Ca_2SiO_4) and a zeolite, were applied in five doses to the rice crop. The experimental design was completely randomized, with a 3 x 5 x 5 x 3 factorial arrangement of the treatments. Each treatment was repeated three times. **Results.** The treatments caused changes

in the Electric Conductivity (EC) and pH of the soil solution and in soil fertility. The salinity of the soils in the study area is due to the presence of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and mainly Mg^{2+} . **Conclusions.** the use of amendments: CaSO_4 , zeolite and Ca(OH)_2 , improved the chemical properties of the soils by decreasing the EC of the soil solution.

INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa*) es el cereal de mayor importancia alimenticia a nivel mundial, los principales países productores son China, India, Indonesia y Pakistán (FAO 2015); no obstante, se produce en los 5 continentes (Ramos Gamiño 2013). En América Latina, los países con mayores rendimientos de arroz por hectárea son Uruguay, Argentina, Perú y Brasil con rendimientos de hasta 8 t.ha⁻¹. En Ecuador, el promedio corresponde a 4,42 t.ha⁻¹, que es menor a los reportados en Colombia, que están alrededor de 7 t.ha⁻¹ (Faostat 2021).

En el 2021 en Ecuador, se sembraron alrededor de 340 mil ha de arroz (Faostat 2021). Aproximadamente, 95% de la superficie sembrada se ubica en las provincias del Guayas, Los Ríos y Manabí. Los cantones con mayor producción son Daule, en la provincia del Guayas, y Babahoyo, en la provincia de Los Ríos; sólo la provincia del Guayas representa un 61% del área sembrada con este cultivo (Litardo *et al.* 2023). El cultivo de arroz se realiza en diferentes tipos de suelos y el éxito o fracaso de los emprendimientos agrícolas depende del uso de nuevas tecnologías para incrementar los rendimientos de los cultivos. Esto aún más, en suelos degradados donde ha ocurrido reducción de los rendimientos y de la economía del productor (FAO 1996).

Aproximadamente, el 15% de los suelos del mundo se encuentra en proceso de degradación física y química por erosión y salinización. Este último es uno de los problemas graves que enfrenta la agricultura a nivel mundial (Lamz Piedra y González Cepero 2013). Los suelos a nivel mundial afectados por acumulación de

cantidades excesivas de sales solubles, como el sodio, son cerca del 0,8 y 1,3 millones de km², afectan y alteran la productividad (Toth *et al.* 2008, Shrivastava y Kumar 2015) y se incrementan paulatinamente con el uso de agua salina utilizada para el riego (Hoang *et al.* 2016).

Los suelos salinos sódicos se caracterizan por tener una alta presencia del sodio, que coincide con su proximidad del nivel freático a la superficie terrestre. Esta condición les otorga características físico-químicas especiales no favorables para la producción de muchos cultivos, y por tanto, una baja productividad (Roca y Pazos 2007).

En la cuenca del Guayas en Ecuador, se reportan suelos con problemas de alta salinidad (Baquerizo *et al.* 2019). El cultivo de arroz ocupa un área significativa de esta zona, pero sus suelos presentan signos de salinización, por lo que es conveniente verificar frecuentemente su condición (Pozo *et al.* 2010). Esta acumulación de sales deteriora la calidad de los suelos destinados a la producción de cultivos e interfiere de manera negativa en el crecimiento de las plantas (Otero *et al.* 2002). Entre los efectos negativos está la inhibición de la germinación de semillas y la degradación del suelo, que generan calidad deficiente y bajos rendimientos en los cultivos (Pozo *et al.* 2010).

Por los antecedentes de salinidad de las aguas y de los suelos cultivados con arroz, que afectan al desarrollo del cultivo, se planteó la presente investigación. El objetivo fue evaluar los cambios en algunas propiedades químicas de los suelos experimentales, provocados por el efecto de la aplicación de enmiendas minerales;

particularmente, los efectos sobre las variables relacionadas con la salinidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características de la zona de estudio

La investigación se desarrolló en el invernadero y laboratorio del Departamento de Suelos de la Estación Experimental Litoral Sur (EELS)

del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) (2°15'28.6" Latitud Sur y 79°38'42.6" Longitud Oeste). Las colecciones de suelos se realizaron en los siguientes lugares: La Cuca (3°28'22.2" Latitud Sur y 80°04'55.4" Longitud Oeste); El Pan (2°05'18.8" Latitud Sur y 79°46'00.4" Longitud Oeste); y Petrillo (1°59'01.1" Latitud Sur y 80°02'10.8" Longitud Oeste). Las características climáticas registradas en los años 2009 y 2010 de las zonas donde se recolectaron los suelos para el estudio se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características climáticas del sitio de trabajo (invernadero) y de los cantones de donde tomaron los suelos.

Variables Climáticas	EELS*	Daule*	Yaguachi**	Arenillas**
Altura (msnm)	17,0	7,0	13,0	26,0
Temperatura (°C)	26,3	26,6	25,7	25,0
Precipitación anual media (mm)	1002,7	1177,1	1369,5	1161,5
Humedad relativa (%)	82,0	87,0	79,0	84,0
Heliofania (horas luz año ⁻¹)	726,0	1118,8	973,4	992,0

* INAMHI 2010; ** INAMHI 2009

EELS = Estación Experimental Litoral Sur (INIAP), ubicación del invernadero.

Recolección y algunas características de los suelos

Se recolectaron suelos salinos de 3 cantones arroceros ubicados en: Petrillo, parte norte del cantón Guayaquil; El Pan, cantón Yaguachi, parte centro oeste de la misma provincia; La

Cuca, cantón Arenillas, parte sur de la provincia de El Oro.

Algunas de las propiedades químicas de los suelos de estudio se presentan en la Tabla 2 y se realizaron en el laboratorio del Departamento de Suelos de la EELS.

Tabla 2. Propiedades químicas de los suelos usados en el estudio, según su localidad.

Identificación de suelos	pH	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Fee	Mn	B
		mm.kg ⁻¹		meq.100 ml ⁻¹			mm.kg ⁻¹					
La Cuca	6,5 LAc	26,0	47,0	0,8	11,1	7,1	334,0	3,7	2,7	30,0	124,0	2,1
El Pan	7,8 LAI	30,0	10,0	0,3	15,5	12,9	216,0	1,4	15,9	6,0	55,0	0,2
Petrillo	7,0 N	36,0	6,0	0,5	16,0	12,2	606,0	3,8	5,8	5,0	44,0	1,1

LAc = Ligeramente Ácido.

LAI = Ligeramente Alcalino.

N = Neutro.

Se determinaron las propiedades químicas de los suelos mediante la relación suelo:agua de 1:2,5; el pH se determinó con peachímetro; la materia orgánica (MO) con el método de Walkley-Black; el nitrógeno (N), fósforo (P) y boro (B) por colorimetría; Azufre (S) por turbidimetría y los cationes intercambiables extraídos con solución Olsen Modificada. El extractante Olsen Modificado es una solución acuosa de 0,5 M de bicarbonato de sodio con 0,01M de EDTA

con un pH regulado de 8,5 (Aucatoma 2017), donde las muestras procesadas fueron leídas en absorción atómica, y para B y S se usó fosfato de calcio monobásico.

La salinidad como CE (Conductividad Eléctrica) y RAS (Relación de Adsorción de Sodio) se determinó en el extracto de pasta saturada. También se midieron los cationes intercambiables mediante absorción atómica, lo que permitió clasificar los suelos como salinos (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis químico de salinidad en extracto de pasta saturada en suelos salinos de La Cuca, El Pan y Petrillo.

LOTE	pH	CE	Na	K	Ca	Mg	Suma	CO ₃ H	CO ₃	SO ₄	Cl	RAS	PSI
		dS.m ⁻¹	mg.l ⁻¹					meg.l ⁻¹					
La Cuca	7,8	17,48	1038,0	104,1	1264,0	856,4	3262	2,0	ND	32	148	6	6
El Pan	8,3	3,33	297,8	7,2	206,5	129,0	640,4	5,2	0,8	7	22	4	4
Petrillo	8,0	6,89	666,7	22,8	380,0	270,0	1339,0	6,6	0,2	21	44	6	8

RAS = Rango Absoluto de Salinidad.

PSI = Porcentaje de Sodio Intercambiable.

La textura de los 3 suelos se determinó por el método de Bouyoucos. Esta es una de las formas más rápidas para analizar la textura de suelo, ya que se miden las partículas en suspensión, es decir, se calculan las partículas en suspensión con un agente químico dispersante como el (NaPO₃)₆ y Na₂CO₃ (Muelas y Muñoz 2015).

La densidad del suelo se midió por el método del terrón parafinado, donde se seca el terrón de suelo a 105 grados Celsius y se recubre con parafina, luego se introduce en un

contenedor con volumen de agua conocido, y así la diferencia en cambio de volumen de agua corresponde al volumen de la masa de suelo seco. En vista de que la mayoría de las rocas tienen como regla general una densidad aparente de 2,65 gr.cm⁻³ y un suelo franco limoso tiene un espacio poroso del 50% y una densidad aparente de 1,33 gr.cm⁻³, esta relación apoya a que uno de los métodos más confiables para densidad aparente del suelo sea el de terrón parafinado (Gómez 2013). La Tabla 4 presenta algunas propiedades físicas medidas de los suelos usados.

Tabla 4. Características físicas y materia orgánica de los suelos usados en el estudio.

Identificación	M.O	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	Densidad Aparente
	%	dag.kg ⁻¹				t.m ⁻³
La Cuca	3,0	49	43	8	Arcilloso	1,1
El Pan	3,2	13	35	52	Franco	1,2
Petrillo	4,7	13	31	56	Arcilloso	1,4

Muestreo de suelos experimentales

Se recolectaron los suelos de Petrillo, La Cuca y El Pan a partir de la capa superficial (0-20 cm de profundidad) en las 3 zonas arroceras con problemas de salinidad seleccionadas para el estudio (previa determinación de la CE). Cada muestra fue equivalente a 200 gr de suelo seco, molido y tamizado por malla de 2 mm. Luego se procedió a colocar el agua de tubería, respectivamente analizada (Tabla 5); y se le agregó a cada una de las macetas de los 3 suelos; Petrillo (1170 cc de agua); El Pan (1160 cc de agua); La Cuca

(760 cc de agua). Una vez alcanzada la saturación del suelo, se dejó una lámina de 2 cm sobre la superficie de estas, la cual duró aproximadamente 1 hora para luego proceder a medir la CE y el pH de la solución que se encontraba en las macetas. La medición se realizó con un medidor de CE y pH calibrado en el laboratorio de análisis de suelo y aguas de la EELS.

La dosis de enmiendas fue calculada al considerar una hectárea de suelo a 20 cm de profundidad y la densidad aparente determinada del suelo.

Tabla 5. Propiedades químicas del agua usada en la investigación.

Identificación	CE	Ca	Mg	Na	K	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	pH	RAS	PSI	Na	Clase
Muestra	dS.m ⁻¹	mg.l ⁻¹				meq.l ⁻¹							%	
Agua EELS	0,379	27,0	3,5	62,6	1,2	0,8	1,4	0,8	1,0	8,3	3,0	3,0	62,0	C2SI

EELS: Estación Experimental Litoral Sur.

La reposición del agua del suelo se realizó entre 2 y 3 veces a la semana, según las condiciones de temperatura en el invernadero. La pérdida de agua de evaporación fue contabilizada en las macetas auxiliares descritas y la reposición fue de acuerdo con el peso perdido.

Medición de la conductividad eléctrica (CE) de la solución del suelo que drenaba. Esta variable se registró desde la instalación del experimento y hasta los 60 días (0, 15, 30, 45 y 60 días después de la aplicación), a partir de los 15 DDA (días después de la aplicación), en cada uno de estos tiempos, se eliminó y se repuso el agua. En la parte central del suelo de cada maceta, se realizó un orificio con un diámetro aproximado de 2 cm, donde se acumuló la solución del suelo y sirvió para drenarla. En el agua drenada, se introdujo el electrodo del equipo portátil del conductímetro/peachímetro, previamente calibrado en el laboratorio, y se registró la CE de cada tratamiento en dS.m⁻¹.

Medición del (pH) de la solución del suelo que drenaba. Al mismo tiempo que se registró la CE, con el mismo equipo portátil del conductímetro/peachímetro, se midió el pH de la solución del suelo. La fertilidad del suelo, transcurridos los 60 días de tratamiento, fueron secados al ambiente, molidos, tamizados, para, posteriormente, recolectar sub muestras de 150 gr de cada una de las macetas. Así pues, con el uso de las 3 repeticiones, se formó una muestra compuesta para ser enviada al laboratorio del Departamento de Suelos de la EELS, donde se analizó y se determinó la disponibilidad de nutrientes, CE, el pH, aniones y cationes, y el RAS.

Características generales de los suelos

Petrillo, cantón Daule. Los suelos de esta localidad son vérticos arcillosos con 35% de arcilla muy plástica y pegajosa, y 50% de la fracción de arcilla expandible (2:1) con un severo

agrietamiento e hinchamiento del suelo; así como reacción calcárea con presencia de carbonato de calcio libre dentro de los 50 cm (efervescencia con HCl) o pH 7,3 (Vallejo 1997).

El Pan, cantón Yaguachi. Los suelos son vertisoles arcillosos Gley con > 35% arcilla, muy plástica y pegajosa, y > 50% de la fracción de arcilla expandible (2:1) con severo agrietamiento e hinchamiento del suelo. Están mal drenados, saturados con agua por más de 60 días la mayoría de los años; además, presentan moteados con cromas < 2 en los primeros 60 cm y debajo de los horizontes AB.

La Cuca, cantón Arenillas. Estos suelos son francos con 35% de arcilla, excepto lugares con arenas francas semi modificadas, sobre arcilla, con características vérticas, calcáreas. Subsuelo franco, igual que el tipo arcillo gravilloso. Suelo seco por más de 60 días consecutivos, con profundidad de 20 a 60 cm. De tipo calcáreo, carbonato de calcio libre dentro de los 50 cm con efervescencia de HCl y pH > 7,3.

Diseño del experimento y tratamientos

Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial $3 \times 5 \times 5 + 3$ que correspondió a 3 suelos salinos, 5 enmiendas, 5 dosis para cada enmienda, más 3 tratamientos testigo y cada uno se replicó 3 veces. A continuación, el detalle de los tratamientos:

Los suelos experimentales son los salinos recolectados en Petrillo, El Pan y La Cuca a una profundidad de 0 – 20 cm. Asimismo, las enmiendas minerales ensayadas fueron CaCO_3 ; Ca(OH)_2 ; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; zeolita y Ca_2SiO_4 (Ácido

Monosilícico=Ac Monos). Esta última se aplicó en forma líquida a razón de 1,5; 3,0; 4,5; 6,0 y 7,5 litros.ha⁻¹. Para el resto de las enmiendas, la dosis de aplicación de cada una de ellas fue de 1,5 t.ha⁻¹; 3,0 t.ha⁻¹; 4,5 t.ha⁻¹; 6,0 t.ha⁻¹ y 7,5 t.ha⁻¹.

Procesamiento y análisis de datos

Para el análisis de los resultados de las mediciones, se utilizó el método de las medias comparadas, mediante la prueba de rango múltiple de Duncan con el 5% de probabilidad. Para el procesamiento de los datos y la elaboración de gráficas, se usó el programa INFOSTAT.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La CE en la solución del suelo, correspondiente a los tratamientos testigos del muestreo al día inicial o cero, fue de 1,52; 0,92 y 0,85 dS.m⁻¹, para La Cuca, El Pan y Petrillo, respectivamente. La aplicación de las enmiendas provocó cambios rápidos en la conductividad eléctrica de la solución del suelo. La CE en el suelo de La Cuca, tratado con CaCO_3 , se elevó a 1,69 dS.m⁻¹; en el suelo de El Pan, tratado con ácido monosilícico, la CE fue de sólo 0,96 dS.m⁻¹. Se especula que el cambio pudo haber sido por el efecto de las propias sales libres del suelo o por liberación de los cationes retenidos en la superficie de las arcillas. El anión del ácido monosilícico Si(OH)_3 logra reemplazar, en la solución del suelo, al anión fosfato de calcio, magnesio, aluminio y fosfatos de hierro (Matichenkov 2008). En el suelo de Petrillo, no hubo efecto inmediato de la aplicación de todas las enmiendas (Figura 1).

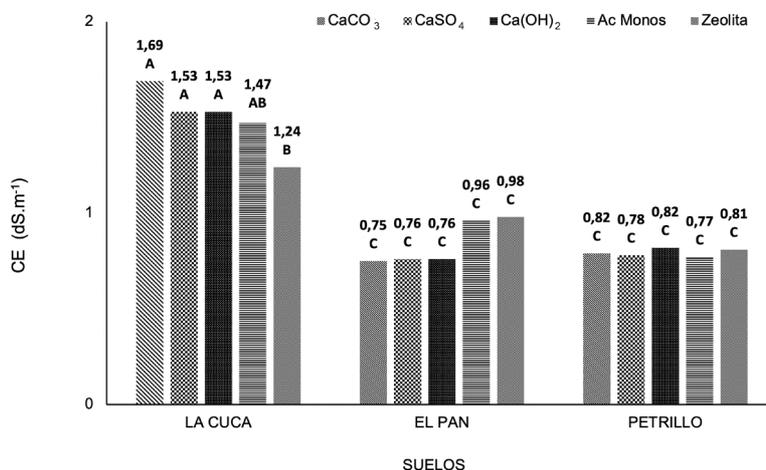


Figura 1. Conductividad eléctrica (CE) de la solución en suelos salinos de La Cuca, El Pan y Petrillo, a los 0 días de aplicar las 5 enmiendas.

A los 60 DDA, la CE en los suelos de El Pan y Petrillo fue similar, debido a la menor salinidad inicial 3,33 y 6,89 dS.m⁻¹ con respecto

al suelo de La Cuca, que tuvo una CE de 17,48 dS.m⁻¹ (Figura 2).

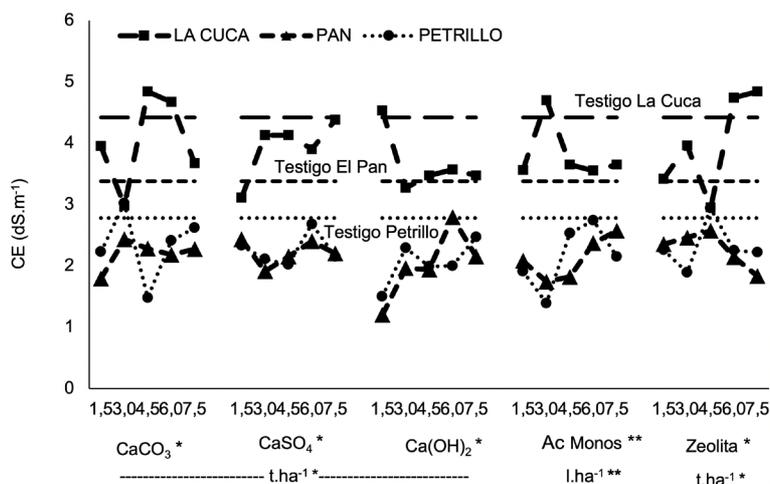


Figura 2. Cambios de la CE 60 días después de la aplicación de las 5 enmiendas en suelos salinos de La Cuca, El Pan y Petrillo.

La mayor CE de la solución del suelo a los 60 DDA fue de 4,84 dS.m⁻¹, se observó en La Cuca, en los tratamientos con 4,5 y 7,5 t.ha⁻¹ de CaCO₃ y zeolita, respectivamente. En este mismo, la aplicación de Ca(OH)₂ disminuyó la salinidad de la solución del suelo. En El Pan y Petrillo, la mayor CE de la solución del suelo se registró en el tratamiento con 6,0 t.ha⁻¹ de Ca(OH)₂ y 3,0 t.ha⁻¹ de CaCO₃, respectivamente.

La CE de la solución del suelo del tratamiento testigo de La Cuca 4,42 (dS.m⁻¹), se observó con los tratamientos 3,0; 1,5 y 4,5 t.ha⁻¹ de CaCO₃, CaSO₄ y zeolita, respectivamente. Asimismo, disminuyó la CE de la solución a valores cercanos a 3,00 dS.m⁻¹ (ca 32%), lo que indica que con los lavados quincenales previos hubo mayor extracción de sales en los tratamientos con estas dosis de enmiendas.

La aplicación de Ca(OH)₂ no aumentó la CE de la solución, como ocurrió con las restantes enmiendas evaluadas. La dosis de Ca(OH)₂ con mejor desempeño fue 3,0 t.ha⁻¹.

En el suelo de El Pan, todas las enmiendas evaluadas disminuyeron la CE de la solución del suelo, sobresaliendo el Ca(OH)₂. La dosis de 1,5 t.ha⁻¹ disminuyó la CE de la solución a 1,20 dS.m⁻¹, esto es 65% menos que la CE del tratamiento, testigo que fue de 3,38 dS.m⁻¹.

Al igual que en El Pan, el suelo de Petrillo respondió mejor a la aplicación de Ca(OH)₂, en dosis de 1,5 t.ha⁻¹; además, de CaCO₃ y Ac Monos en dosis de 3,0 t.ha⁻¹, que llegaron a valores de alrededor de 1,50 dS.m⁻¹ y

provocaron una disminución del 46% de la CE en la solución del suelo.

Los diferentes efectos sobre la CE de la solución del suelo, provocados por las enmiendas evaluadas, se dieron debido a los contenidos variables de elementos constituyentes y características físicas de estas, así como químicas y físicas de los suelos. La enmienda zeolita, provocó adsorción de los iones de Na⁺, en sus paredes, por desprendimiento e intercambio con los iones Ca²⁺ y por consiguiente incremento de los valores de pH como fue anotado por Torri *et al.* (2021); asimismo, el CaCO₃, CaSO₄ y Ca(OH)₂, también indujo al desprendimiento del Na⁺ de los sitios de intercambio, lo cual elevó la CE inicial, para posteriormente precipitar los aniones CO₃, SO₄ e (OH)₂ (Feuchter 2010, citado por Suárez 2010, Kass 2007, Sierra *et al.* 2007), lo que facilitó la salida del sistema en el proceso de lavado.

Se mostró, con el transcurrir del tiempo, el pH de las soluciones del suelo fue elevándose por acción de la aplicación de las enmiendas, pues partió de 7,46 y 7,77 para el suelo de La Cuca y Petrillo, y alcanzó los 8,58 y 9,15, respectivamente. Asimismo, se observaron modificaciones en el pH de la solución del suelo solamente por efectos simples de los suelos, enmienda y dosis, en el tiempo 0 DDA, donde el menor pH de 7,46 correspondió al suelo de La Cuca, que resultó estadísticamente diferente a los otros que tuvieron pH superiores a 7,70. La misma tendencia se presentó en las evaluaciones realizadas a los 30, 45 y 60 DDA (Figura 3).

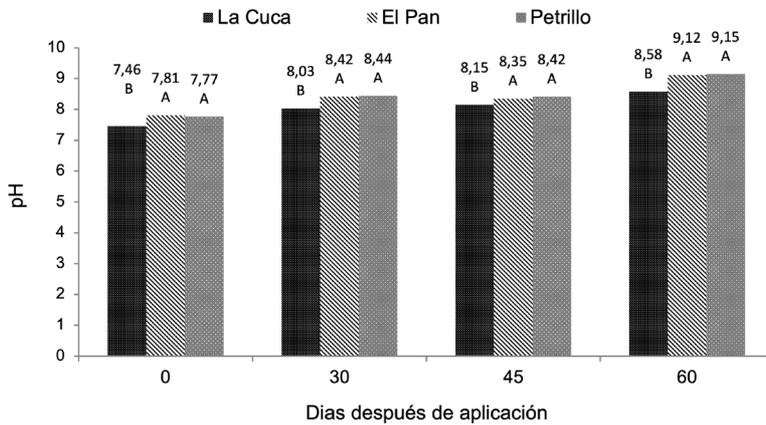


Figura 3. pH del suelo a los 0, 30, 45 y 60 días después de la aplicación de enmiendas al suelo salino de La Cuca, El Pan y Petrillo.

La tendencia de los valores de pH de los suelos no varió en el tiempo, siempre el pH del suelo de la Cuca resultó ser el más bajo, esto debido al pH inicial de cada suelo. Al final de esta fase, se encontró que hubo modificación del pH del suelo, cuyo rango de variación fue de 1,12 en el suelo de La Cuca hasta 1,38, que fue el mayor en el del Petrillo.

Se encontraron diferencias estadísticas significativas en el pH de la solución del suelo a los 0 DDA por efecto de las enmiendas evaluadas. En la Figura 4, se observa que por efecto del uso de CaCO_3 , CaSO_4 y zeolita, el pH estuvo alrededor de 7,40 y resultó estadísticamente diferente (significancia del 5%) a los pH registrados con el uso de Ca(OH)_2 y Ac Monos que presentaron valores mayores de 7,8.

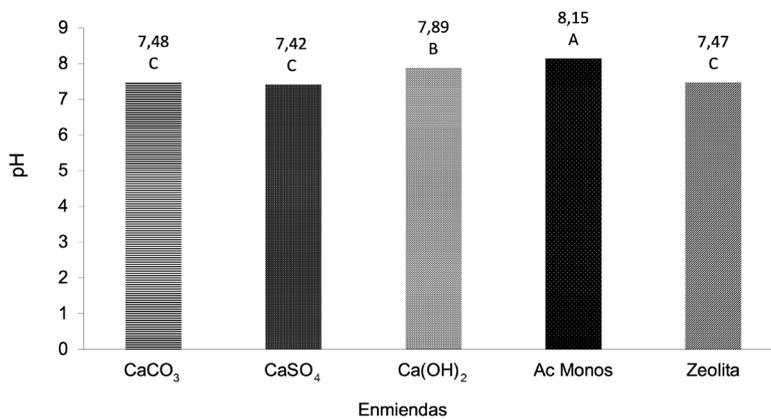


Figura 4. pH de la solución del suelo de los suelos salinos de La Cuca, El Pan y Petrillo, al momento 0 DDA de ser tratados con 5 enmiendas al suelo.

A los 0 DDA se encontraron diferencias estadísticas significativas en el pH de la solución del suelo por acción de las dosis de enmienda usadas. Se observó una tendencia a elevar el pH conforme se incrementa la dosis aplicada

(Figura 5). Este efecto era de esperarse, en vista que estos productos también son utilizados para realizar corrección de acidez, además, aportan OH^- a la solución del suelo.

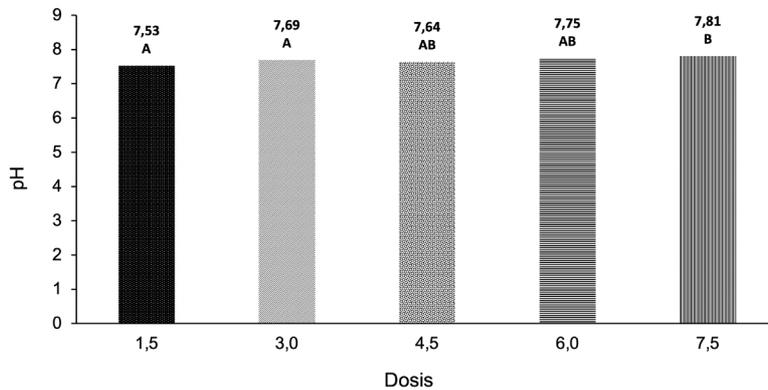


Figura 5. Variación en el pH de la solución del suelo de suelos salinos de La Cuca, El Pan y Petrillo, por efecto de dosis de enmiendas aplicadas al suelo.

En los suelos de La Cuca, la aplicación de enmiendas cálcicas presentaron una diferencia no significativa, salvo con la aplicación del CaCO_4 (Tabla 6). Por otro lado, en el suelo de El Pan, se observó que los valores de P, S, Ca y Mg se elevaron por efecto de la aplicación de las enmiendas. Esto se aprecia en el Zn y B, donde el tratamiento testigo tenía un valor de 1,0 y 0,1

mg.kg^{-1} , considerados bajos. De esta manera, se elevó a 2,3 y 0,4 mg.kg^{-1} , respectivamente, con uso de Ca(OH)_2 y mayores con las restantes enmiendas, valores que son considerados adecuados para la nutrición de los cultivos (Tabla 7). En el caso de los suelos de La Cuca, los niveles de los mismos nutrientes no fueron suficientes para considerarse adecuados.

Tabla 6. Fertilidad de suelos de La Cuca, 60 días después de haber sido corregida su salinidad con aplicaciones de 5 enmiendas cálcicas.

ENMIENDA	N	P	K	Ca	Mg	SB	S	Zn	Cu	Fe	Mn	B
	mg.kg^{-1}			meq.100 ml^{-1}			mg.kg^{-1}					
Testigo	20,0	67,0	0,6	12,1	5,8	18,5	80,0	3,5	6,0	131,0	373,5	0,9
CaCO_3	20,0	75,6	0,6	13,6	6,7	21,0	82,6	3,7	6,4	154,6	468,5	0,9
CaSO_4	19,6	88,2	0,6	15,5	8,1	24,2	130,8	3,6	6,6	107,8	456,5	0,8
Ca(OH)_2	17,6	78,4	0,6	14,3	5,8	20,7	72,8	3,5	6,3	132,2	464,4	1,0
Ac Monos	16,2	81,0	0,6	14,2	6,2	20,9	80,6	3,8	6,4	172,8	539,6	1,0
Zeolita	19,0	71,6	0,6	13,3	6,1	20,0	86,6	3,6	6,3	147,4	423,0	1,0

Tabla 7. Fertilidad de suelos de El Pan, 60 días después de haber sido corregida su salinidad con aplicaciones de 5 enmiendas cálcicas.

ENMIENDA	mg.kg ⁻¹			meq.100.ml ⁻¹		SB	S	Zn	mg.kg ⁻¹			
	N	P	K	Ca	Mg				Cu	Fe	Mn	B
Testigo	26,0	8,0	0,3	17,1	13,7	31,1	96,0	1,0	22,2	17,0	70,2	0,1
CaCO ₃	33,2	7,6	0,4	18,6	15,1	34,1	187,8	2,5	17,2	25,0	32,2	0,7
CaSO ₄	32,8	7,4	0,4	16,9	13,8	31,2	169,6	2,2	16,8	48,4	116,4	0,5
Ca(OH) ₂	32,0	8,8	0,4	19,3	14,1	33,8	158,2	2,3	17,8	26,0	36,3	0,4
Ac Monos	33,8	6,8	0,4	21,0	14,3	35,7	191,8	3,0	13,8	23,2	38,8	0,6
Zeolita	33,0	7,2	0,4	21,0	13,4	34,8	175,4	2,8	14,3	20,6	34,4	0,5

El exceso de sales en la solución del suelo puede causar problemas en la fertilidad de los suelos, pues produce un efecto negativo en el potencial osmótico del agua del suelo, lo cual dificulta su absorción y los iones que se encuentran disueltos en ella. También provocan toxicidades en las plantas, por los excesos de iones como Na, Cl, Mg y SO₄: los excesos de sales promueven la estimulación de desbalances nutricionales, todas estas causas en combinación afectan indudablemente a los cultivos. Los suelos alcalinos y sódicos, en particular, se consideran de baja fertilidad, debido a que varios nutrientes son esenciales para las plantas lo que afecta su disponibilidad en condiciones de alcalinidad (García 2012).

El comportamiento del suelo de Petrillo fue diferente a los anteriores, ya que, con la aplicación de las enmiendas, se redujo la disponibilidad de P, S y Zn y se halló una pequeña elevación del Ca y Mg, que se reflejó en la SB (suma de bases); el B se mantuvo sin cambios. Nutricionalmente, la mejor enmienda para el suelo de Petrillo, resultó la aplicación de la zeolita, donde se registra la menor disminución de la disponibilidad de P, elemento importante para el desarrollo de las raíces, elevación mínima de Ca y Mg, con una SB de 34; además, de conseguir el mayor aumento en la disponibilidad de S y Zn (Tabla 8).

Tabla 8. Fertilidad de suelos de Petrillo, 60 días después de haber sido corregida su salinidad con aplicaciones de 5 enmiendas cálcicas.

ENMIENDA	mg.kg ⁻¹			meq.100.ml ⁻¹		SB	S	Zn	mg.kg ⁻¹			
	N	P	K	Ca	Mg				Cu	Fe	Mn	B
Testigo	32,0	7,0	0,5	17,5	13,1	31,1	180,0	3,7	9,6	12,0	34,2	0,6
CaCO ₃	28,2	5,0	0,4	17,6	13,7	31,8	165,8	2,5	12,7	10,8	27,2	0,6
CaSO ₄	31,2	5,0	0,4	20,6	14,6	35,6	185,6	2,3	13,5	10,4	29,4	0,6
Ca(OH) ₂	32,8	6,2	0,4	18,8	14,4	33,6	161,6	1,9	15,1	10,4	24,5	0,6
Ac Monos	30,4	6,4	0,3	17,8	15,3	33,4	160,8	1,5	18,3	10,6	25,2	0,6
Zeolita	36,8	6,8	0,4	19,7	13,9	34,0	217,8	2,6	14,9	16,4	33,9	0,6

CONCLUSIONES

De las 5 enmiendas evaluadas, el CaCO_3 , el CaSO_4 y las zeolitas a dosis de $3,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ tuvieron mejor comportamiento sobre los 3 suelos salinos. Lograron solubilizar las sales encontradas en estos suelos, disminuyeron la presencia de elementos que causan la salinidad y mejoraron sus propiedades químicas.

La aplicación de enmiendas minerales, tanto sólidas como líquidas (Ac. Monosilícico) consiguieron reducir la salinidad, con lo cual se dan opciones para los agricultores en sus programas de recuperación de suelos, así como para optimizar la fertilización.

LITERATURA CITADA

- Aucatoma, B. 2017. Elaboración y Caracterización de un Material de Referencia Interno de suelos para los Macro Elementos P, K, Ca y Mg Extraídos con Olsen Modificado para Análisis de Suelos Cañeros del Orden Inceptisol, Entisol y Vertisol de la Cuenca Baja del Río Guayas. Tesis M. Sc. Guyaquil, Ecuador, Escuela Superior Politécnica del Litoral. 73 p.
- Baquerizo, M; Acuña, M; Solis, M. 2019. Contaminación de los ríos: caso río Guayas y sus afluentes. Manglar 16(1):63-70. DOI: <https://doi.org/10.17268/manglar.2019.009>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1996. Degradación del suelo debido a actividades humanas (en línea, sitio web). Roma, Italia. Consultado 1 ago. 2023. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/003/w2612s/w2612smap12-s.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2015. Information on post-harvest operations (en línea, sitio web). Consultado 1 ago. 2023. Disponible en <http://www.fao.org/inpho/inpho-post-harvest-compendium/cereales-y-granos/es/>
- Faostat. 2021. Food and Agriculture Organization statistical database (en línea, sitio web). Faostat. Consultado 5 ago. 2023. Disponible en <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- García, G. 2012. Absorción, distribución, de las sales y comportamiento del sistema antioxidante en dos genotipos de cebolla (*Allium cepa* L.) sometidas al estrés salino. Tesis Ph.D. Maracay, Venezuela, Universidad Central de Venezuela. 28 p.
- Gómez, J. 2013. Manual de Prácticas de Campo y del Laboratorio de Suelos. SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje SENA-REGIONAL). Espinal, Tolima, Colombia, Centro Agropecuario La Granja. 100 p.
- Hoang, TM; Tran, TN; Nguyen, TK; Williams, B; Wurm, P; Bellairs, S; Mundree, S. 2016. Improvement of salinity stress tolerance in rice: challenges and opportunities. Agronomy 6(4):1-23. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy6040054>
- Kass, D. 2007. Fertilidad de los suelos. Costa Rica, EUNED. 272 p.
- Lamz Piedra, A; González Cepero, MC. 2013. La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. Cultivos tropicales 34(4):31-42.
- Litardo, RCM; Bendezú, SJG; Zenteno, MDC; Mora, FC; Rivas, LLP. 2023. Sistema de producción del cultivo de arroz en zonas con alta salinidad en suelos y agua. Ciencia y Tecnología Agropecuaria 24(2): e2812. DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:2812
- Matichenkov, V. 2008. Diferencia y funcionalidad del sílice en Suelos, cosechas y alimentos. II Conferencia Internacional Sobre Eco-Biología del Suelo y del Compost. Puerto de la Cruz-Tenerife, España. p. 431-438.
- Muelas, A; Muñoz, M. 2015. Determinación de la textura por el método de Bouyoucos. Laboratorio de Agroquímica, Química, Ciencias Naturales Exactas y de la Educación. Universidad del Cauca. Consultado 1 oct. 2023. Disponible en <https://es.scribd.com/document/329131507/282421691-Lab-Determinacion-de-La-Textura-Por-El-Metodo-de-Bouyoucos>
- Otero, J; García, C; Sanchez, R. 2002. Zonificación de los procesos de salinización de los suelos de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM. República de Colombia Ministerio del Medio Ambiente. Colombia, Subdirección de Geomorfología y Suelos. 5 p.
- Pozo, W; Carrera, G; Sanfeliu, T. 2010. Variabilidad espacial temporal de la salinidad del suelo en los humedales de arroz de la Cuenca baja del río Guayas, Sudamerica. Revista Tecnológica Espol. 23(1):73-79.
- Ramos Gamiño, F. 2013. Maíz, trigo y arroz: los cereales que alimentan al mundo (en línea). Nuevo León, México. Consultado 10 ago. 2023. 85 p. Disponible en <http://eprints.uanl.mx/3649/1/maiztrigoarroz.pdf>
- Roca, N; Pazos, MS. 2007. Clasificación comparada de los suelos salino-sódicos de Fray Mamerto Esquiú (Argentina) con la WRB y la taxonomía de suelos. Terra Latinoamericana 25(3):231-238.
- Shrivastava, P; Kumar, R. 2015. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. Saudi

- Journal of Biological Sciences 22(2):123-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>
- Sierra, C; Lancelloti, A; Vidal, I. 2007. Azufre Elemental como Corrector del pH y la Fertilidad de Alfunos Suelos de la III y IV Región de Chile. *Agricultura Técnica* 67(2):173-181. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072007000200007>
- Suarez, M. 2010. Efecto de enmiendas de origen químico y orgánico en condición de salinidad del agua de riego para incrementar el rendimiento de cebolla (*Allium cepa* L.). La Libertad, Ecuador. 181 p.
- Torri, SI; Amaturro, JI; Sánchez, L; Pacheco-Rudz, EO. 2021. Efecto de las zeolitas sobre ciertas propiedades de un suelo enmendado con biosólidos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 37:419-430. DOI: <https://doi.org/10.20937/RICA.53796>
- Toth, G; Montanarella, L; Stolbovoy, V; Maté, F; Jones, A; Panagos, P; Van Liedekerke, M. 2008. *Soils of the European Union* (en línea). Luxemburgo. 85 p. Consultado 5 ago. 2023. Disponible en https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR23439.pdf
- Vallejo, LM. 1997. Reconocimiento de los suelos del Ecuador en base a su capacidad-fertilidad. Mapa general de clasificación por capacidad-fertilidad. Quito, Ecuador, Instituto Geográfico Militar. 57 p.



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

DEBERES DE LAS PERSONAS REVISORAS

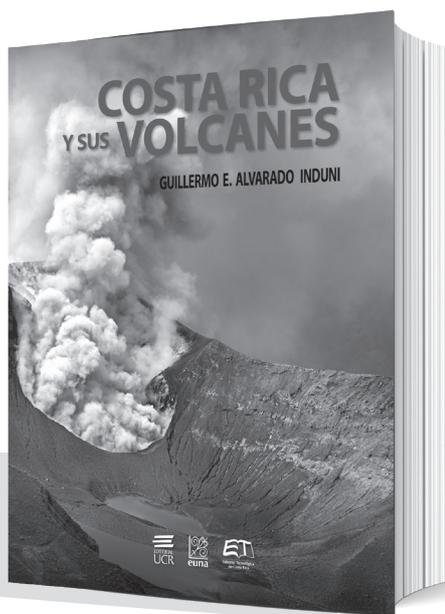
A toda persona especialista le compete notificar al editor o editora, cuando se le consulte, si le es posible revisar el documento que se le solicita evaluar. De aceptar deberá realizar su trabajo de manera objetiva, sus críticas han de tener argumentos sustentados en la ciencia y no ha de tener ningún 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.

EDITORIAL UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Costa Rica y sus volcanes

Guillermo Alvarado Induni



1.a ed. 2021
21,83 cm x 28,42 cm
976 pp.
ISBN 978-9968-46-776-6

Se presenta un cuadro sinóptico y actualizado sobre los volcanes de Costa Rica, su formación y actividad eruptiva, historia, influencia socioeconómica y cultural, hasta llegar a un grado de conocimiento y desarrollo vulcanológico, que posiciona a Costa Rica a nivel internacional.


EDITORIAL
UCR

LIBRERÍA — UCR
Tels.: 2511 5858 • 2511 5859

Portal DE LA Investigación

Ciencia universitaria a su alcance

⌘ **Información**

- Noticias de ciencia y tecnología
- Proyectos de investigación
- Agenda de investigación
- Nuevas publicaciones

⌘ **Opinión**

- Vox populi
- Opinión
- Foro

⌘ **Plataforma de medios**

- Programa En la Academia
- Serie televisiva Girasol
- Revista Girasol digital
- Cápsula Girasol



Esta revista se terminó de imprimir en la
Sección de Impresión del SIEDIN, en junio 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

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

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, US\$ 20.40

Asia y África US\$ 71.40

Resto del mundo

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

Contents

Scientific papers

- Vegetative-generative of hydroponic tomato and sweet pepper produced under greenhouse, subjected to moisture content depletion.
Freddy Soto-Bravo and Alejandro Betancourt-Flores 9-26
- Adaptability and stability of tomato mutants in Los Santos, Panama.
Jorge Enrique Jaén-Villarreal, María Caridad González-Cepero, Ismael Camargo-Buitrago, Román Gordón-Mendoza, Ana Elida Sáez-Cigarruista and Francisco Alberto Centella-Pereira 27-38
- Nitrogen and chlorophyll concentration in leaves of hydroponic sweet pepper in greenhouse under different irrigation and nutrition management strategies.
Freddy Soto-Bravo and María Alejandra Angulo-Guillén 39-56
- Preliminary response of canavalia to mycorrhizal inoculation in an edaphic environment of Jibacoa.
Yusdel Ferrás-Negrín, Ramón Rivera-Espinosa, Vidalina Pérez-Salina and Ciro Sánchez-Esmori 57-66
- Effect of growth retardants on reducing lodging in sweet forage sorghum.
Deisy Lorena Flórez-Gómez, Karen Viviana Osorio-Guerrero, Gustavo Adolfo Rodríguez-Yzquierdo, Sair Jaramillo-Bonilla, Luis Ernesto Ortegón-Herrera, Evelin Gómez-Delgado and Guillermo Alberto Brochero-Aldana 67-78
- Forage potential of selected Costa Rican corn varieties for grain.
William Sánchez-Ledezma, Nevio Bonilla-Morales, Moisés Hernández-Chavez and Cinthia Granados-Marín 79-92
- Increase the biological nitrogen fixation and the growth of soybean (*Glycine max*) using phosphorus-solubilizing fungi.
Leida Castro-Barquero 93-109
- ### Technical notes
- Changes in the chemical characteristics of three saline soils, treated with five calcium amendments.
Edgar Patricio Cedeño-Coll, Josué Otoniel Dilas-Jiménez and Manuel Danilo Carrillo-Zenteno 111-123