

REVISTA

U.D.C.A

ACTUALIDAD & DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

Revista Científica | ISSN: 2619-2551 (en línea) ISSN: 0123-4226 (impreso) | enero - junio 2023 | Volumen 26 No. 1 D.L. | Bogotá, D.C. - Colombia



PUBLICACIÓN OFICIAL DE LA UNIVERSIDAD
DE CIENCIAS APLICADAS Y AMBIENTALES U.D.C.A,
INSTITUCIÓN CON ACREDITACIÓN DE ALTA CALIDAD

ENFOQUE Y ALCANCE

La Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica es una publicación seriada, multidisciplinar*, arbitrada que adopta la revisión por pares de doble ciego, de acceso abierto vía diamante y de producción continua (Hacer click aquí para ver el proceso de publicación), dirigida a investigadores. Tiene como finalidad evaluar, publicar y difundir la producción científica, principalmente, de la región iberoamericana y de las otras regiones tropicales y subtropicales.

Para facilitar el acceso y la apropiación, se aceptan manuscritos en idiomas español, inglés y portugués. La mayoría de los documentos que publica pertenecen a artículos científicos; sin embargo, también edita artículos de reflexión, de revisión, reporte de casos y notas técnicas.

La revista es editada, sin interrupción, desde 1998 y se encuentra indizada en Scopus, Chemical Abstracts, CAB Abstracts, Índice Bibliográfico Nacional Publindex clasificada en “B” Convocatoria No. 910 de 2021, SciELO Colombia, Reseñada en Latindex e incluida en la base de datos Periódica UNAM, México, en el Directory of Open Access Journals-DOAJ y en la Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico-REDIB.

La gratuidad para el autor y el lector obedece a la financiación de la revista por parte de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A y a la colaboración desinteresada de los evaluadores externos.

*Temas abordados: Ciencias Agrarias, Ciencias Naturales y Ciencias Sociales.

FOCUS AND SCOPE

The “Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica”, is a serial, multidisciplinary*, refereed publication that adopts double-blind peer review, diamond open-access and continuously produced publication (Click here to know the publication process), aimed at researchers. Its purpose is to evaluate, publish and disseminate scientific production, mainly from the Ibero-American region, but also from the others tropical and subtropical regions.

To extend the dissemination of articles and facilitate access and appropriation, manuscripts in Spanish, English or Portuguese are accepted. Most of the documents published belong to scientific articles, however, it also publishes articles of reflection, reviews, case reports and technical notes.

The journal has been edited, without interruption, since 1998 and is indexed in Scopus, Chemical Abstracts, CAB Abstract, Publindex National Bibliographic Index classified in “B” Announcement No. 910 of 2021, SciELO Colombia, Review in Latindex and included in the database Periodica UNAM, Mexico, in the Directory of Open Access Journals-DOAJ, and in the Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico-REDIB.

The not charges for the publication to the authors and the free access to the readers obey to the financing of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales and the disinterested collaboration of the peer reviewers.

*Topics covered: Agricultural Sciences, Natural Sciences and Social Sciences.

FOCO E ESCOPO

A Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica é uma revista multidisciplinar* que avalia, publica e divulga a produção científica da região ibero-americana, utilizando o sistema de avaliação duplo-cega e adotando o sistema de acesso aberto via diamante (Clique aqui para saber mais sobre o processo de publicação).

Com o propósito de facilitar o acesso e a apropriação da produção científica produzido por e para a região, a revista publica os artigos em espanhol, inglês e português. A gratuidade para o autor, como para o leitor, deve-se ao apoio financeiro da Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales e a colaboração desinteressada dos avaliadores externos.

A revista tem uma trajetória de mais de 20 anos e se encontra indexada no Scopus, Chemical Abstracts, CAB Abstract, Índice Bibliográfico Nacional Publindex classificada em “B” Circular No.910 de 2021, SciELO Colombia, revisada em Latindex e incluída na base de dados Periódica UNAM, México, no the Directory of Open Access Journals-DOAJ, e na Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico-REDIB

A gratuidade para o autor, como para o leitor, deve-se ao apoio financeiro da Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales e a colaboração desinteressada dos avaliadores externos. Além disso, esta edição conta com o apoio financeiro do Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, através do anuncio No 1041 de 2022.

*Temas comprendidos: Ciências Agrárias, Ciências Naturais e Ciências Sociais.

EQUIPO EDITORIAL

Editor

Helber Adrián Arévalo Maldonado
Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A
Bogotá, Colombia

Comité editorial

Carlos Alberto Blanco Montero
USDA-Animal and Plant Health Inspection Service APHIS
Washington, Estados Unidos de América

Eduardo José Delgado Hernández
Universidad Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora
Barinas, Venezuela

Marlete Brum Cleff
Universidade Federal de Pelotas UFP
Pelotas, Brasil

Rosângela Brito
Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS
Porto Alegre, Brasil

Comité científico

Adriana Posada Arrubla
Investigador Independiente
Bogotá, Colombia

Alfonso Javier García
Universidad de Sevilla
Sevilla, España

Andrés Franco Herrera
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Santa Marta, Colombia

Clistenes Williams Araújo do Nascimento
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Recife, Brasil

Francisco Alonso Solís Marín
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México

Galdino Andrade Filho
Universidade Estadual de Londrina
Londrina, Brasil

Jesús Muñoz Rojas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla de Zaragoza, México

Jhon James Mora Rodríguez
Universidad ICESI
Cali, Colombia

José Eleutério Junior
Universidade Federal do Ceará
Ceará, Brasil

José Gregorio Lanza Marchán
Normalización Chile-LAN Consultores
Santiago, Chile

José Siles González
Universidad de Alicante
Alicante, España

Laura Barcia Rivera
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay

Rita María Ávila G. de Hernández
Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado
Barquisimeto, Venezuela

Samuel Moisés Nucamendi Guillén
Universidad Panamericana
Guadalajara, México

Sildivane Valcácia Silva
Universidade Federal da Paraíba
Paraíba, Brasil

Equipo colaborador

Correctora de estilo y ortográfica
Norella Castro Rojas

Asistente editorial
Héctor William Duarte Gómez

Diagramadores
Fabian Ernesto Ramírez Cárdenas
Camilo Eduardo Carrasco Borrero

CONTENIDO
Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica
Volumen 26 número 1- enero-junio, 2023
<https://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023>

EDITORIAL

40 años: el recorrido de la U.D.C.A

Germán Anzola Monteroe2476
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2476>

CIENCIAS AGRARIAS

Response of ‘criolla’ potato (*Solanum tuberosum*) cultivar Colombia to mineral organic fertilization

Jorge Alberto Alvarado-Barrera; Miguel Angel Ramírez-Avellaneda; Hans Nicolas Chaparro-Zambrano; Fernando Javier Peña-Baracaldo ..e2036
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2036>

Espectroscopía visible y del infrarrojo cercano para el análisis de nutrientes en tejido vegetal de caña de azúcar para producción de panela

Deisy Bibiana Camargo-Hernández; Diana Marcela Parra-Forero; Viviana Marcela Varon-Ramírez; Juan Carlos Lesmes-Suárez; Ayda Fernanda Barona-Rodríguez; Claudia Ariza-Nietoe2062
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2062>

Calcium foliar fertilization and its effect on quality and shelf life in andean blackberry fruits (*Rubus glaucus* Benth.)

William Andrés Cardona; María Cristina García-Muñoz; Blanca Lucía Botina-Azain; Clara Viviana Franco-Flórez Pablo Edgar Jiménez-Ortegae2083
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2083>

Integrated processing methodology to identify the spatial variability of accumulated infiltration for agricultural soil

Helber Milton Orjuela-Matta; Danny Wilson Sanjuanelo-Corredor; Jonathan Vásquez-Lizcano; Katherin Cubides-Posada; Julián Francisco Rodríguez-Tibaquirá; Juan Carlos Torres-Rodríguez; Heiner Alfonso Ramírez-Povedae2365
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2365>

Validación de un modelo para la estimación del contenido de agua del suelo mediante espectroscopía en el infrarrojo cercano

Andrea Katherin Carranza-Díaz; Jesús Hernán Camacho-Tamayo; Yolanda Rubiano-Sanabriae2329
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2329>

Habilidad combinatoria de los caracteres relacionados con la producción de habichuela (*Phaseolus vulgaris* L.)

Mayra Contreras-Rojas; Franco Alirio Vallejo-Cabrera; Sanín Ortiz-Grisalese2217
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2217>

Caracterización física y sensorial de 24 genotipos especiales de cacao *Theobroma cacao*

Lucero Gertrudis Rodríguez-Silva; Lucas Fernando Quintana-Fuentes; Roberto Antonio Coronado-Silva; Alberto García-Jerez; Eliana Yadira Báez-Daza; Genaro Andrés Agudelo-Castañedae2410
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2410>

Valoración de un método de osmoguiado a flores de durazno (*Prunus persica*) aplicado en abejas *Apis mellifera*

Camilo Andrés Higuera-Higuera; Saira María Esiponsa-Sánchez; Diana María Dueñas-Quintero; Mariana Palacios-Preciado; Fabio Eleazar Lozano-Suarez; Victor Manuel Solarte-Cabrera; Oswaldo Andrés Sánchez-Alarcóne2242
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2242>

Effect of carotenoid pigments extracted from papaya epicarp (*Carica papaya*) on the characteristics of Frankfurt sausages

Viviana Andrea Velasco-Arango; José Igor Hleap-Zapata; Luis Eduardo Ordóñez-Santose2167
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2167>

Effect of applications of 1-MCP and ethylene on the ripening and degreening process of banana fruits cv. Barranquillo
Edwin Yobany Valbuena-Téllez; John Edison Patiño-Guio; Helber Enrique Balaguera-Lópeze1978
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.1978>

Carotenogénesis y pigmentos en *Cucurbita* spp.
Robert Augusto Rodríguez-Restrepo; Magda Piedad Valdés-Restrepo; Juan José Ortiz-López; Sanin Ortiz-Grisalese2218
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2218>

Evaluación de la dinámica de impregnación al vacío de cogollos de palma de iraca
Misael Cortes-Rodríguez; Rodrigo Hoyos-Sánchez; Leidy Areiza-Restrepo; Cristian Camilo Ossa-Cardonae2380
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2380>

CIENCIAS NATURALES

Caracterización de compost de residuos sólidos orgánicos urbanos de seis distritos de la provincia Leoncio Prado, Perú
Emilio Anthony Ríos-Velasquez, Nelino Florida-Rofner, Angelo Lama-Isminioe2371
<https://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2371>

Captadores de niebla y recolección de agua en un ecosistema de páramo colombiano
Francisco Cortés-Pérez, Oscar M. Roa-Casas, Carlos Andrés Villate-Suarez, David Ricardo Hernández-Velandia, Felipe Moreno-Mancilla, Laura L. Hernández-Pinedae1994
<https://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.1994>

Nuevas localidades en la distribución de *Corallus blombergi* (Rendahl & Vestergren ,1941) (Reptilia: Squamata, Boidea), para Colombia
Lucellis M. Rivas-Albornoz, Mayra Rengifo-Palacios, Jhon Tailor Rengifo-Mosquerae2066
<https://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2066>

Mejoramiento de un método no comercial para la extracción de ADN de moscas de interés médico-legal
Andrés F. Maya, Yesica Durango, Luz M. Gómez-Piñerez, Giovan F. Gómeze1946
<https://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.1946>

FE DE ERRATAS

Fe de errata al artículo: Efecto de la incorporación de aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) en las características fisicoquímicas, bromatológicas y vida útil de un yogurt de leche de búfala.e2353
<https://dx.doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2353>

PARES EVALUADORES

40 años: el recorrido de la U.D.C.A

40 years: the U.D.C.A's history

Germán Anzola Montero¹ 

¹Rector. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. Bogotá, D.C., Colombia.

Como citar: Anzola Montero, G. 2023. 40 años: el recorrido de la U.D.C.A. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2476. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2476>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Un aniversario no es solo una celebración, es un recordatorio y cuando se cumplen 40 años, lo es aún más. Una remembranza de lo que somos, de lo que fuimos y de lo que queremos ser; una forma de volver a formular los objetivos fundacionales y el camino recorrido. Sin duda, es motivo de celebración, pero, fundamentalmente, de reflexión.

Cumplir 40 años se constituye en un referente de significativa importancia, ya que se traduce en haber alcanzado o logrado, justamente, el punto medio de un objetivo o proceso, de todo aquello que se pueda considerar temporal, tal y como sucede con el concepto correspondiente a la línea del Ecuador, como referente imaginario, que sirve para dividir nuestro planeta en dos hemisferios.

A partir de la citada consideración y de muchas otras, se puede contextualizar y referenciar el arribo de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A a esta importante etapa. Los 40 años se consideran un estadio determinante del desarrollo de una organización e, incluso, de cada uno de nosotros como individuos.

Stanley Brandes (1995), en su artículo ¿Qué significa cumplir los cuarenta? Cultura y Crisis a la mitad de la vida, establece tres objetivos, que permiten analizar las consecuencias de alcanzar los 40 años, entre estos se destacan: Perfilar las implicaciones personales que se identifican a los 40 años; explicar por qué los cuarenta han llegado a ser considerados como una línea divisoria y, finalmente, analizar los cambios en lo que se debe de incurrir al arribar a esta etapa.

Cumplir 40, no es cualquier celebración, es una que representa aspectos trascendentales en todos los órdenes de la existencia, así como sucede con el género humano. El número cuarenta, desde la antigüedad, ha estado asociado al significado de MUCHO, incluso, de un MONTÓN, pero más que la cantidad, debe animarnos los frutos de esa cosecha, que se inició tiempo atrás. Por esto, el momento conmemorativo para la Universidad, nos debe recordar

que estamos llamados a rendirle cuentas a la sociedad, sobre la consolidación de un Proyecto Educativo Institucional, que ha estado marcado por la transparencia y por la rectitud en su actuar.

Por tal razón, desarrollar el concepto cuatro veces diez, en el contexto de la U.D.C.A, nos hace recordar cuatro etapas que han marcado el desarrollo de la institución:

1. De 1983-1990: lapso que permitió superar la crisis de inicio de labores, para ordenar el desarrollo de las responsabilidades.

2. De 1990 a 1999: podemos considerar a esta etapa como la apropiación de los conceptos de Universalización de la institución, pues logramos desarrollar el significado de Universidad y abarcar todos los ámbitos del saber, con una oferta en diversas disciplinas del conocimiento.

3. Del 2000 al 2010: este periodo estuvo marcado por la construcción y la apropiación de la Universidad, promoviendo la consolidación de una planta profesoral capacitada, de una comunidad de estudiantes cohesionada y de la generación de nuevo conocimiento, mediante la investigación.

4. Del 2010-2023: es la etapa actual y en la que hemos podido reafirmar y promover la búsqueda de la excelencia académica, de manera permanente.

Y aunque algunos señalan que llegar a los 40 permite cuestionar el desarrollo organizacional, celebrar el cuadragésimo aniversario de la U.D.C.A, debe conducirnos a querer y desear nuevas direcciones y orientaciones, a promover un periodo de fuertes y evidentes transiciones.

En esta nueva etapa que comienza y que marca un antes y un después para toda la Comunidad Universitaria, debemos privilegiar el querer hacer, que debe nacer de nuevos horizontes y de la formulación de retos no imaginados antes. Por lo anterior, es preciso indicar que el

aniversario cuarenta representa un momento para cambios críticos, en el ciclo del desarrollo de esta organización.

El inicio de los nuevos 40 debe empezar por:

- a) Redefinir nuevos propósitos.
- b) Entender las nuevas realidades de la humanidad y el llamado a la transformación que demanda la Educación Superior.
- c) Aprender, de manera permanente, de voces expertas.
- d) Garantizar la actualización continua de toda la Comunidad Universitaria.
- e) Valorar y tomar en cuenta la experiencia, que ha construido lo que, hoy en día, tenemos.
- f) Fortalecer el trabajo colaborativo y la generación de nuevas sinergias.
- g) Creer fielmente en lo que hacemos, sin olvidar para quienes lo hacemos.

El grado de madurez alcanzado a la fecha, traducido en un tiempo que aún es breve, es en el que hemos acumulado valiosas experiencias, producto de los obstáculos que vencimos a diario. Podemos asegurar que nos tenemos fe, pero no es una certidumbre vana o superficial, sino férrea y respaldada por los resultados que hemos logrado, con el paso del tiempo.

Al celebrar el cuadragésimo aniversario tenemos mucho que agradecer a esta Comunidad Universitaria, Fundadores, Estudiantes, Profesores, Personal administrativo y directivo y Egresados. Son ellos quienes hacen que la U.D.C.A siga formando profesionales talentosos y con un compromiso irrestricto por el país; que exista

una planta docente productiva y que desarrolla sus capacidades en ambientes de construcción del saber colectivo y funcionarios, quienes con su profesionalismo, lealtad y compromiso, contribuyen al desarrollo permanente de nuestra institución.

Equidad y conocimiento son dos grandes retos que tenemos a futuro, porque, aunque pendientes en nuestra región no podemos dejar de afrontarlos como universidad. Por esto, reitero mi llamado a pensar en el cuarenta como el sinónimo de mucho, como una regeneración permanente y como el renacer con algo nuevo.

Reitero mi invitación a no perder la esencia de la U.D.C.A, que se refleja en el ADN institucional que nos hace únicos, para que cada año que pase parezcamos más jóvenes y podamos diferenciarnos de los demás, por la permanente construcción de excelencia.

Hoy, nos percibimos hacia adelante, como una institución en crecimiento de manera sostenible, de forma ordenada y sistemática, tras los objetivos y metas que nos hemos propuesto, para continuar contribuyendo a la construcción de una Colombia mucho mejor para todos.

El editorial para la Revista Actualidad & Divulgación Científica corresponde al Discurso pronunciado por el Rector, el 18 de mayo de 2023, en conmemoración de los 40 años de aniversario de la Universidad.





REFERENCIAS

1. BRANDES, S. 1995. ¿Qué significa cumplir los cuarenta? Cultura y crisis a la mitad de la vida. *Disparidades. Revista de Antropología*. 50(2):27-51. <https://doi.org/10.3989/rdtp.1995.v50.i2.311>



Response of 'criolla' potato (*Solanum tuberosum*) cultivar Colombia to mineral organic fertilization

Respuesta de la papa criolla (*Solanum tuberosum*) cultivar Colombia a la fertilización orgánico mineral

Jorge Alberto Alvarado-Barrera¹ ; Miguel Angel Ramírez-Avellaneda¹ ; Hans Nicolas Chaparro-Zambrano^{1,2} ; Fernando Javier Peña-Baracaldo^{3*} 

¹Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Programa de Ingeniería Agronómica. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: joalvarado@udca.edu.co; migramirez@udca.edu.co

²Pontificia Universidad Católica de Chile, Ciencias de la Agricultura. Macul, Región Metropolitana de Santiago, Chile; e-mail: hnchaparro@uc.cl

³Investigador independiente, Bogotá, D.C., Colombia, e-mail: fjb74@hotmail.com

*corresponding author: fjb74@hotmail.com

How to cite: Alvarado-Barrera, J.A.; Ramírez-Avellaneda, M.A.; Chaparro-Zambrano, H.N.; Peña-Baracaldo, F.J. 2023. Response of 'criolla' potato (*Solanum tuberosum*) cultivar Colombia to mineral organic fertilization. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2036. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2036>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

Received: February 3, 2022

Accepted: January 20, 2023

Edited by: Helber Adrián Arévalo Maldonado

ABSTRACT

The 'Criolla' potato (*Solanum tuberosum*) phureja group cultivated in the inter-Andean valleys of the high tropics, is commonly fertilized only with mineral nutrients in conventional production, without the use of soil test and use of organic fertilizers. The purpose of this study was to determine the potential of organic chicken manure as a source of nutrients to increase yield and quality in 'Criolla' potatoes compared to conventional fertilization. Treatments evaluated were organic chicken manure, mineral nutrition based on soil tests, organic manure mixed with mineral nutrition, and conventional nutrition based on farmers' typical nutrition plans. In plant response conventional and mineral treatments mixed with organic matter were the best in leaf area and dry weight of shoot and tuber. Treatment with mineral nutrition mixed with organic manure (2 and 6 t) obtained the largest length of the main stems. The best yield response was obtained with conventional nutrition, while the major size was obtained with mineral and mineral combined with organic treatments. According to the results, the best response was obtained with the application of mineral nutrition in the combination of 6 t ha⁻¹ organic manure.

Keywords: Chicken manure; Crop yield; Agronomic characters; Organic substrates; Plant nutrition.

RESUMEN

La papa criolla (*Solanum tuberosum*) grupo phureja es cultivada en los valles interandinos del trópico alto, comúnmente fertilizada con nutrientes minerales en la producción convencional, sin hacer uso de análisis de suelos y nutrición con fertilizantes orgánicos. El objetivo de este estudio fue determinar el potencial de la materia orgánica de gallinaza, como fuente de nutrientes, para incrementar el rendimiento y la calidad en la papa criolla, comparándola con la nutrición convencional. Los tratamientos evaluados fueron gallinaza, nutrición mineral, basado en análisis de suelos; nutrición mineral, combinada con materia orgánica y un tratamiento soportado en la fertilización convencional, con base en los planes nutricionales, típicos de los agricultores. En las respuestas de la planta, los tratamientos convencionales y minerales mezclados con nutrición mineral obtuvieron los valores más altos en área foliar y peso seco de la parte aérea y el tubérculo. En longitud de tallo, la mejor respuesta se obtuvo con los tratamientos minerales mezclados con materia orgánica (2 y 6 toneladas). La mejor respuesta en rendimiento fue obtenida en la nutrición mineral convencional, mientras que las papas con mayor calibre, se lograron con los tratamientos mineral y mineral mezclado con orgánico. De acuerdo con los resultados, la mejor respuesta en cultivo se puede obtener con la nutrición mineral, en combinación con 6 toneladas de materia orgánica.

Palabras clave: Gallinaza; Características agronómicas; Sustratos orgánicos; Nutrición vegetal; Rendimiento vegetal; Rendimiento de cultivos.

INTRODUCTION

The potato, *Solanum tuberosum* L. is one of the main sources of food, with a worldwide production of 876,005,707 t, in 2022, just after sugarcane, maize, rice paddy and wheat. For the year 2022, the area of potato cultivation in Colombia reached about 258,517 ha (FAO, 2023), of which the diploid potato ‘Criolla’ potato (*S. tuberosum*) *phureja* group, represented approximately 7 % with exports close to 1.000 t.year⁻¹ (FNFP, 2017). In Colombia, the name ‘Criolla’ potato corresponds to morphotypes that have tubers with yellow skin and flesh color (egg yolk phenotype).

‘Criolla’ potato is cultivated from 2.600 to 3.500 m a.s.l. with a temperature range between 10 and 20 °C (Rozo Rodríguez & Ramírez, 2011); crop yield varies according to the environmental offer, management practices, cultivars sown, and other factors. The Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia MADR (2019) reports a maximum yield of 22.7 t ha⁻¹. In Peru, the best yield reported corresponds to cv ‘Blanca amarilla’ with 27.8 t ha⁻¹ (Seminario-Cunya *et al.* 2018).

Proper nutrition management requires: knowing the fertility of the soil, the total demand, and the daily rate of nutrient accumulation by the crop, which are a function of the growth rate, phenology, variety, environmental offer, and yield goal. Therefore, the profitability and environmental impact caused by fertilizers on the soil, water, and air must be considered (Sifuentes Ibarra *et al.* 2013).

The beneficial effect of organic manure on potato crops is known. The crops react favorably to organic fertilizers because they improve the soil structure and gradually release plant nutrients, an ideal complement for chemical fertilization (Mallory & Porter, 2007), constituting an ideal complement for chemical synthesis fertilizers. The use of farmyard manure increases the yield of crop potatoes concerning mineral nutrition and promotes soil health (Meena *et al.* 2019). Integrated nutrient plans including poultry manure and inorganic mineral nutrient allow obtaining the best availability of P and K, higher yields (22.86 t ha⁻¹) and a major number of tubercles (Kafle *et al.* 2019).

Romero-Lima *et al.* (2000) evaluated different organic and mineral nutrient sources, in another group of *Solanum tuberosum*, and found that the complementary nutritional requirements were lower when chicken manure was applied, obtaining bigger tubers and an increase in yield.

The purpose of this study was to determine the effects of organic fertilization and its contribution to the yield and quality increase of potato tubers cv ‘Colombia’, and how the interaction with the mineral source of nutrients could enhance these variables.

MATERIALS AND METHODS

The study was carried out during January and May of a year with el niño phenomena, at the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Bogotá, Colombia; altitude of 2.560 m a.s.l.

coordinates 04°35’N 74°04’. The plant material used was potato cv. ‘Criolla’ Colombia, a clonal selection of round yellow native cultivars, which were planted at a depth of 10 cm. The crop was established in a soil classified as Andisol with a degree of evolution from low to moderate, regular to well-drained, loamy to clay loam texture, in the surface horizon and clayey, in the deepest ones. The soils have moderate effective depth, limited in some cases by a fluctuating water table. The morphology of the profile shows an Ap. horizon over a Bw, being the first one of black color, due to the high percentage of organic matter and with subangular block structure, moderately developed. The second horizon is grayish brown.

The soil was amended one month before planting with a dose of 2 t ha⁻¹ of dolomite lime to correct the acidic pH (4.86) and reduce the 30 % of aluminum saturation. The dolomite lime was applied at the bottom of the groove.

A completely random design was used with eight treatments, three replications per treatment. For measure, were evaluated 3 samples per replication. Planting density was 0.30 m between plants and 0.90 m between rows, each treatment was composed of 90 plants sowed in plots of 30 m².

Fertilization of mineral and organic was carried out at the time of sowing and was distributed in the different treatments to be evaluated.

Eight treatments were evaluated: T1 to T3 correspond to organic treatments consisting of 3 different doses of chicken manure (organic source); T1, organic (1.000 kg ha⁻¹); T2 organic (2.000 kg ha⁻¹); T3 organic (6.000 kg ha⁻¹).

T4 to T6 treatments correspond to mixed, different doses of chicken manure (organic source) and a mineral treatment with one level of mineral nutrition according to soil test (Table 1), being mineral treatment doses of 15 kg ha⁻¹ DAP, 10.16 kg ha⁻¹ of KCl and supplemented with 5 kg ha⁻¹ of urea, nested with 3 levels of organic manure, T4 mineral + organic (1.000 kg ha⁻¹); T5 mineral + organic (4.000 kg ha⁻¹); T6 mineral + organic (6.000 kg ha⁻¹).

T7 and T8 treatment were two hangout treatments, T7 mineral treatment with 15 kg ha⁻¹ DAP, 10.16 kg ha⁻¹ of KCl and supplemented with 5 kg ha⁻¹ of urea, and T8 conventional nutrition 321 kg ha⁻¹ of multi-nutrient fertilizer 10-30-10.

Sampling was focused on the variables of growth and development of the plant. A total of 9 plants were evaluated per treatment on nondestructive measures, number, and length of stems; destructive measures were leaf area (cm²) using CID CI202 laser equipment, dry weight of shoot, and tubers (g). Samples were performed during the crop cycle at 22, 53, 73, 90, and 105 days after sowing (DAS). To determine yield, ten plants were sampled by treatment, and to recognize the quality of the potatoes, tubers’ equatorial diameters were measured by a caliper, dividing the potatoes into three categories according to local market requirements: large (4-6 cm), medium (2-4 cm), and small (<2 cm).

Table 1. Soil test and nutrient requirements of potato crops according to soil extraction.(latency period).

Parameter	Test value	Soil content (kg ha ⁻¹)	Extraction by crop (kg ha ⁻¹)
pH	4.86	-	
Bulk density (g.cm ³⁻¹)	1.1		
Organic matter (%)	10.5	-	
Nitrogen (%)	0.53	227	75.8
Phosphorus (ppm)	0.86	2	7.4
Potassium(meq.100g ⁻¹)	0.15	129	135.1
Magnesium (meq-100g ⁻¹)	0.33	87	5.1
Calcium (meq-100gr ⁻¹)	0.84	370	1.7
Aluminum (meq-100g ⁻¹)	0.6	-	-
Sodium (meq-100g ⁻¹)	0.08	40	-
Sulfur (ppm)	-	-	8.5
Iron (ppm)	84	184.8	0.3
Boron (ppm)	0.62	1.4	0
Copper (ppm)	0.02	0,0	0
Manganese (ppm)	0.14	0.3	0
Zinc (ppm)	0.69	1.5	0.1
SCEC (meq/ 100g)	2		
EC (dS/m)	0.1		
Na Saturation (%)	4		
K saturation (%)	7.5		
Ca Saturation (%)	42		
Mg saturation (%)	16.5		
Bases saturation (%)	70		
Aluminum saturation (%)	30		

Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), means comparisons were performed using Tukey honestly significant difference (HSD), analyses and calculations were calculated using Statistix, and graphics were generated using IBM SPSS Statistics version 23.

Data analysis for variables that did not accomplish statistical assumptions for ANOVA, were analyzed using the Area under disease progress stairs (AUDPS) (Simko & Piepho, 2012). Analysis and calculations were done using statistical software R 3.5.3, using the RStudio interface and the Agricole package.

RESULTS AND DISCUSSION

In general, the leaf area for the treatments managed only with the organic source was low (Figure 1a), also the area values of AUDPS were low in comparison with the other treatments (Figure 1b). On the other hand, greater leaf expansion was observed in the conventional and mineral fertilizer treatments (Figure 1a, b), where the plants obtained a larger leaf size.

Sinks are net importers of assimilates and consist of rapidly growing organs such as meristems and immature leaves, and storage tissues such as tubers, seeds, or roots (Foyer & Paul, 2001). Nitrogen and potassium are known to increase the leaf area in potato crops (Kundu *et al.* 2019). In the case of organic manure, the N and K nutrients have low concentrations (>5 %) compared with a chemical source, these levels affect the leaf area in other crops like wheat (Limon-Ortega *et al.* 2008).

At 110 days after sowing (DAS) the accumulation of dry weight in shoots and tubers in the treatment with organic-mineral 6 Tons achieved the best dry weights; this behavior was followed by mineral fertilization and conventional fertilization (Figure 2). The increase of dry weight DW in treatments with conventional and mineral organic (6t) was much greater in AUDPS.

Conventional (T7) and mineral mixed with 6Tons of organic source (T6) treatments, obtained the best response in leaf DW (Figure 2a), this could be influenced by the high levels of nitrogen that induce vegetative growth, as seen in the leaf area (Figure 1). These results

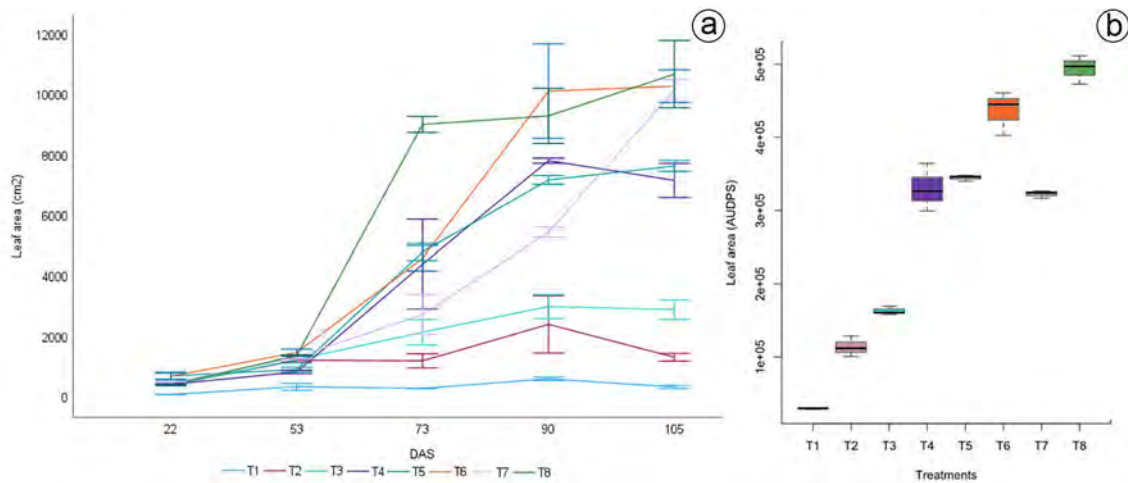


Figure 1. a) Mean values for Leaf area cm²; b) boxplot for AUDPS leaf area values for the whole cycle of the plant, measures made at 22, 53, 73, 90 and 105 days after sowing (DAS).

Error bars correspond to standard deviation ± 1 .

T1: 1.000 kg ha⁻¹ of chicken manure (CM); T2: 2.000 kg ha⁻¹ CM; T3: 6.000 kg ha⁻¹ CM; T4: mineral + 1.000 kg ha⁻¹ CM; T5: mineral + 4.000 kg ha⁻¹ CM; T6: mineral + 6.000 kg ha⁻¹ CM; T7: 15 kg ha⁻¹ of DAP, 10.16 kg ha⁻¹ of KCl and 5 kg ha⁻¹ of urea; T8: 321 kg ha⁻¹ of 10-30-10.

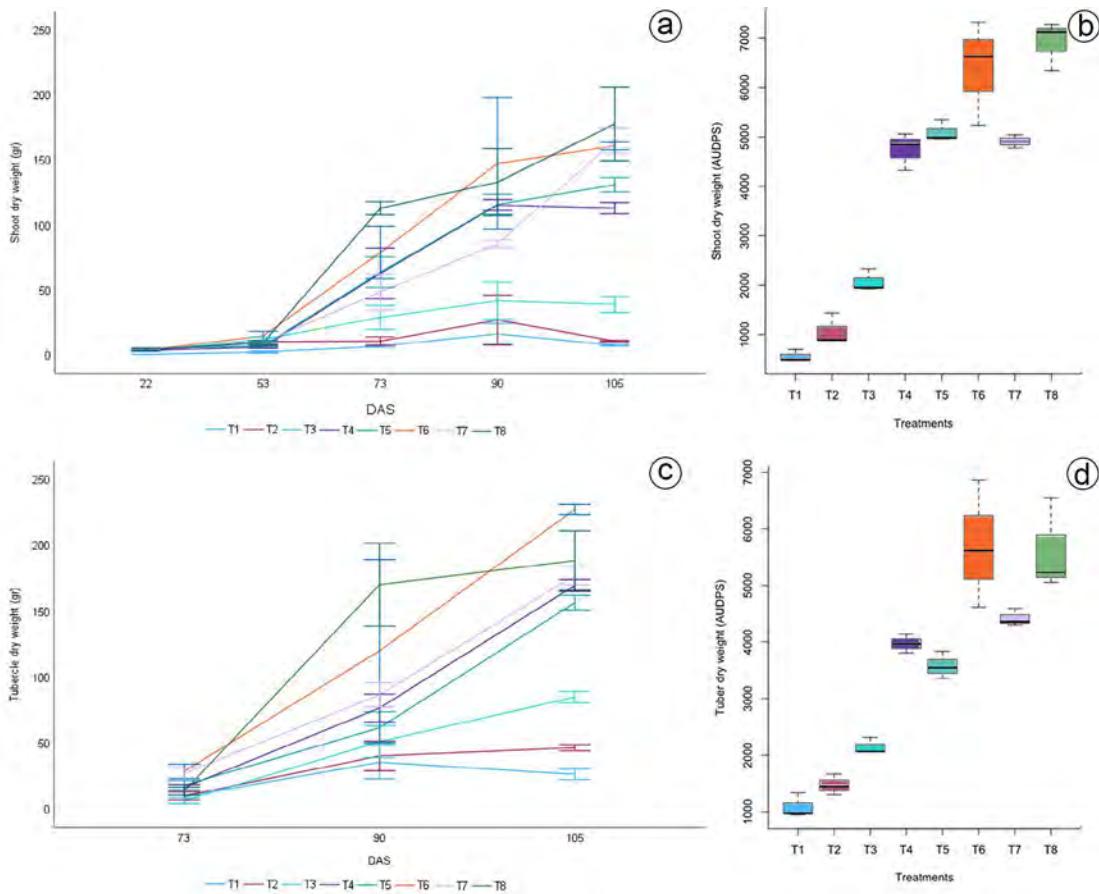


Figure 2. Dry weight (DW) of a) shoot and c) tuber. Boxplot for AUDPS values of b) shoot and d) tuber.

Error bars correspond to standard deviation ± 1 .

T1: 1.000 kg ha⁻¹ of chicken manure (CM); T2: 2.000 kg ha⁻¹ CM; T3: 6.000 kg ha⁻¹ CM; T4: mineral + 1.000 kg ha⁻¹ CM; T5: mineral + 4.000 kg ha⁻¹ CM; T6: mineral + 6.000 kg ha⁻¹ CM; T7: 15 kg ha⁻¹ of DAP, 10.16 kg ha⁻¹ of KCl and 5 kg ha⁻¹ of urea; T8: 321 kg ha⁻¹ of 10-30-10.

are related to the area values of AUDPS (Figure 2b) which confirms the best response of these treatments in the evaluated period.

The DW accumulation was faster in the period of 50 to 100 DAS corresponding to the periods of tuber formation and development; at the end of the season, the tubers accounted for 90 % of the total dry weight (Figure 2c).

For all treatments, the accumulation of DW in the tubers began after 58 DAS, with 65 % of the total DW. The organic treatment at 6 t of organic (T3), reached 88 g plant⁻¹ of DW for tubers, while; the combination of mineral and organic fertilization at 6 t ha⁻¹(T6) reached 230 g plant⁻¹ of DW in tubers, being the highest in all treatments; the mineral and conventional treatments were close to 190 g plant⁻¹.

The stabilization and subsequent fall of the growth curves represent the processes of cessation of biomass accumulation and translocation of nutrients to the sink organs. The results coincide with those of Soto Gárces *et al.* (2018) modeled by SUBSTOR. Similarly, *S. tuberosum* group *phureja* redistributes the nutrients through the translocation of these towards the storage organs, this was why at the end of the cycle a decrease occurs in the amount of biomass.

There were no significant differences (p-values <0.05) in the number of main stems until 112 DAS (Table 2), where the conventional treatment presented the highest number of main stems per plant; followed by mineral organic treatment of 4 t ha⁻¹. On the other hand, the treatments with the lowest number of stems were organic with 1, 4, and 6 t ha⁻¹ and the organic mineral of 1 t ha⁻¹ (Table 2).

Table 2. Effect of different nutrition sources on the number of main stems in potato plants.

Treatment	Days after sowing					
	39	57	67	80	92	112
Organic 1 t ha ⁻¹	3.00 a	2.66 a	2.33 a	3.00 a	3.33 a	2.00 b
Organic 4 t ha ⁻¹	2.33 a	2.66 a	2.33 a	3.00 a	3.00 a	2.00 b
Organic 6 t ha ⁻¹	3.00 a	3.33 a	3.33 a	2.66 a	3.33 a	2.00 b
Organic-mineral 1 t ha ⁻¹	4.00 a	3.00 a	3.66 a	2.66 a	3.66 a	2.00 b
Organic-mineral 4 t ha ⁻¹	3.66 a	3.66 a	3.33 a	3.33 a	3.33 a	3.00 a
Organic-mineral 6 t ha ⁻¹	3.33 a	2.66 a	3.66 a	3.66 a	3.00 a	3.00 a
Mineral	2.66 a	3.00 a	3.33 a	3.33 a	3.33 a	3.00 a
Conventional	3.33 a	2.66 a	2.00 a	3.66 a	3.66 a	3.50 a
p-value	0.4492	0.7747	0.1833	0.9201	0.9633	0.0010

Treatments with a different letter are significantly different (p <0.05) accorded to Tukey's honest significant difference (HSD) test.

One of the most relevant factors affecting the variable number of main stems per plant is plant density. The plant from seed tuber is formed by a set of aerial and underground stems and each stem grows and behaves as an individual plant. In this case, each of the treatments had the same number of plants, without significant differences. Therefore, observed differences can be attributed to the effects of the treatments, and not related to the competition between stems and source-sink relations.

Significant statistical differences (p-values >0.05) among treatments were found for stem length (Table 3). However, the differences depended on the sampling date. The application of chemical fertilizer and organic fertilizer did not present significant statistical differences, compared to the application of organic fertilizer alone.

It was found that the longest stem length was obtained by the organic mineral treatment of 4 t ha⁻¹; followed by mineral treatment and organic mineral treatment of 6 t ha⁻¹ with 78, 76 and 75 cm, respectively. Opposite the result of organic manure only, presented the worst results in stem length, being the organic treatment 1 t ha⁻¹ with a value of 22.2 cm (Table 3).

The stem length variable was a very sensitive variable to evaluate, the behavior of each type of fertilizer. A decisive factor that can influence the better effect of chemical fertilization with organic fertilizers is by increasing organic matter and the cationic interchange capacity, especially Mg and P (Martínez-Alcántara *et al.* 2016). Similar results in the affection of stem length could be observed in *S. tuberosum* in plants stressed by drought (Chang *et al.* 2018).

Organic mineral fertilization produced similar yields compared to mineral and conventional ones (Figure 3a). However, within the organic-mineral treatment a clear tendency to increase yield with the chicken manure rate was observed, treatments established with 1, 4 and 6 t ha⁻¹ of organic manure per hectare presented the lowest yields with values of 1.68 to 4.46 t ha⁻¹. This agrees with Muñoz & Lucero (2008) who evaluated the effect of organic fertilization in 'Criolla' potato and found that the best relation was 2.200 kg ha⁻¹ of chicken manure and 150 kg of 13-26-6 per ha. Zamora *et al.* (2008) reported 32 t/ha with organic fertilizers (goat manure).

Table 3. Effect of different nutrition sources on the length (cm) of main stems in potato plants.

Treatment	Days after sowing					
	39	57	67	80	92	112
Organic 1 t ha ⁻¹	7.93 c	10.50 c	17.33 abc	18.20 bc	20.33 b	22.20 b
Organic 4 t ha ⁻¹	11.23 abc	16.10 abc	15.66 bc	14.60 c	23.33 b	30.40 b
Organic 6 t ha ⁻¹	12.40 abc	16.26 abc	12.33 c	22.66 abc	27.66 b	31.20 b
Organic-mineral 1 t ha ⁻¹	9.10 bc	10.50 c	22.33 ab	24.00 abc	60.00 a	73.60 a
Organic-mineral 4 t ha ⁻¹	13.10 ab	14.16 bc	22.33 ab	32.66 abc	64.03 a	78.10 a
Organic-mineral 6 t ha ⁻¹	13.66 ab	21.00 a	27.00 a	44.66 a	67.16 a	75.35 a
Mineral	15.16 a	21.36 a	26.00 a	40.66 ab	68.63 a	76.00 a
Conventional	12.66 abc	18.00 ab	26.33 a	43.00 ab	61.66 a	68.50 a
p-value	0.0021	0.0001	0.0005	0.0033	<0.0001	<0.0001

Treatments with a different letter are significantly different ($p < 0.05$) according to Tukey's honest significant difference (HSD) test.

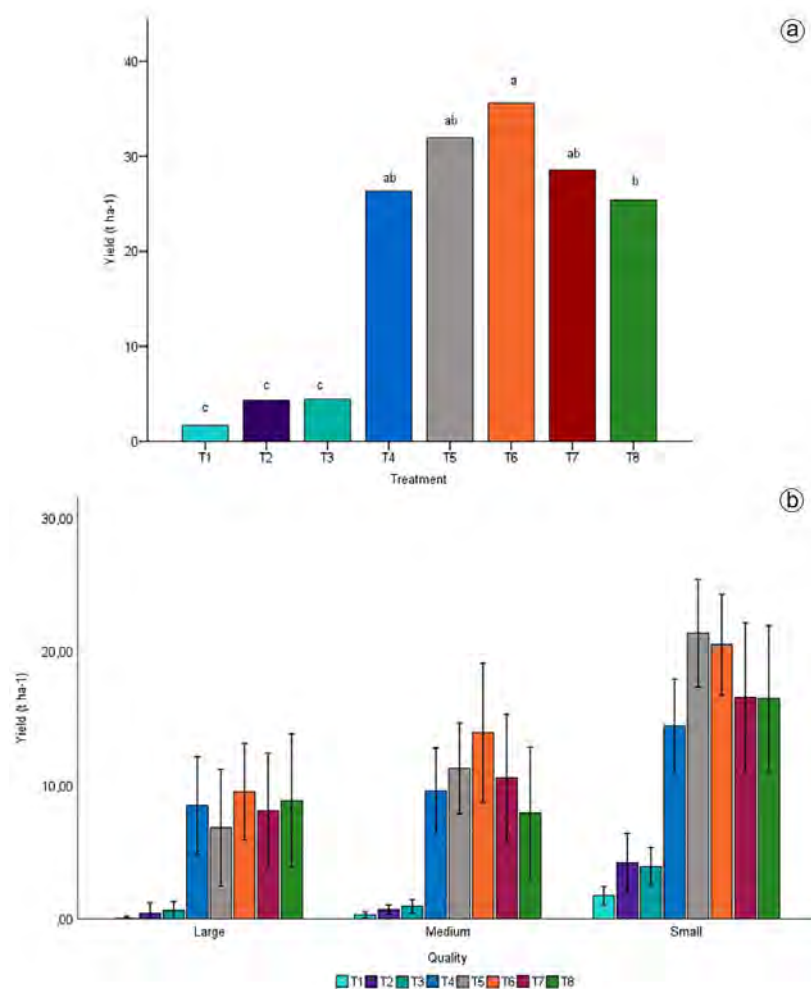


Figure 3. a) Potato yield (t ha⁻¹), plants harvested at 120 days after sowing (DAS); b) Yield in Tons per hectare for qualities in each treatment, large (4-6 cm), medium (2-4 cm) and small (<2 cm).

Columns with different letters were statistically different ($p < 0.05$) according to Tukey's honest significant difference (HSD) test.

T1: 1.000 kg ha⁻¹ of chicken manure (CM); T2: 2.000 kg ha⁻¹ CM; T3: 6.000 kg ha⁻¹ CM; T4: mineral + 1.000 kg ha⁻¹ CM; T5: mineral + 4.000 kg ha⁻¹ CM; T6: mineral + 6.000 kg ha⁻¹ CM; T7: 15 kg ha⁻¹ of DAP, 10.16 kg ha⁻¹ of KCl and 5 kg ha⁻¹ of urea; T8: 321 kg ha⁻¹ of 10-30-10.

In all treatments the predominant size was small (Figure 3b). Treatments with only organic manure showed the lowest values in the production of large and medium quality. On the other hand, the organic mineral treatments with 1 t of organic manure and the conventional treatment showed the highest production of large quality.

The effect of the combination of chemical and organic fertilizers is based on the improvement of the physicochemical properties of the soil and the gradual nutrient release by mineralization, favoring tuber quality and crop yield (Barrera B., 2004). Thus, organic fertilizer is an ideal companion for chemical fertilizers. In this regard Romero-Lima *et al.* (2000), in Mexico, found that when chicken manure was applied in potato crop soil, the external nutritional requirements were lower, higher quality tubers were obtained and yields were increased with the applications of organic mineral treatments.

The supply of nutrients at the right time has a marked influence on the number of tubers and their quality. 'Criolla' potato cultivation is a highly demanding crop for K, whose critical phase of absorption is very short; therefore, there must be good availability of this element for the plant to easily absorb it (Barrera B., 2004). Therefore, good availability of this nutrient is decisive for obtaining a high yield.

This agrees with the results obtained in the field, where the treatments with greater length of stem (Table 3) and higher yields (Figure 3a) are those of organic mineral fertilization with a contribution of 1, 4 and 6 t ha⁻¹ of organic chicken manure, respectively.

Organic manure was not enough to allow the best response in all variables, other hand interactions with mineral nutrients, enhance the response of all variables and yield a response. However conventional treatment had the better response in the main variable for producers, yield.

Acknowledgment. The authors would like to thank Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales for allowing the use of the campus for conducting this study. **Conflicts of Interest:** The manuscript was prepared and revised by all authors, who declare the absence of any conflict which can put the validity of the presented results at risk. **Authors contribution.** Project administration by Jorge Alvarado and Miguel Ramírez. Writing review and editing by Hans Chaparro. Conceptualization, supervision, and writing by Fernando Peña.

REFERENCES







- BARRERA B., L.L. 2004. La fertilidad de los suelos de clima frío y la fertilización de cultivos. En: Silva Mojica, F. Fertilidad de suelos, diagnóstico y Control. SCCS, Bogotá. p.419-462.
- CHANG, D.C.; JIN, Y.I.; NAM, J.H.; CHEON, C.G.; CHO, J.H.; KIM, S.J.; YU, H.-S. 2018. Early drought effect on canopy development and tuber growth of potato cultivars with different maturities. *Field Crops Research*. 215:156-162. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.10.008>
- FONDO NACIONAL DEL FOMENTO DE LA PAPA, FNFP. 2017. Informe de gestión 2017. Fondo Nacional del Fomento de la Papa. 210p. Disponible desde Internet en: <https://www.google.com/url?sa=t&rcct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiOtZPo2938AhXnSTABHbWQBa0QFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Ffedepa.pa.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2022%2F02%2FI NFORME-DE-GESTION-VIGENCIA-2017.pdf&usg=AOvVaw1itvDPFmpdZHJvIr5nqHue>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FAO. 2023. FAOSTAT. Disponible desde Internet en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- FOYER, H.C.; PAUL, J.M. 2001. Source-Sink Relationships. *eLS*. <https://doi.org/10.1038/ngp.els.0001304>
- KAFLE, K.; SHRIWASTAV, C.P.; MARASINI, M. 2019. Influence of integrated nutrient management practices on soil properties and yield of potato (*Solanum tuberosum L.*) in an Inceptisol of Khajura, Banke. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*. 7(3):365-369.
- KUNDU, C.K.; BERA, P.S.; GIRI, A.; DAS, S.; DATTA, M.K.; BANDOPADHYAY, P. 2019. Effect of different doses of nitrogen and potassium on growth and yield of potato (*Solanum tuberosum L.*) under New Alluvial Zone of West Bengal. *Current Journal Applied Science and Technology*. 36(2):1-5. <https://doi.org/10.9734/cjast/2019/v36i230220>
- LIMON-ORTEGA, A.; GOVAERTS, B.; SAYRE, K.D. 2008. Straw management, crop rotation, and nitrogen source effect on wheat grain yield and nitrogen use efficiency. *European Journal of Agronomy*. 29(1):21-28. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.008>
- MALLORY, E.B.; PORTER, G.A. 2007. Potato yield stability under contrasting soil management strategies. *Agronomy Journal*. 99(2):501-510. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0105>
- MARTÍNEZ-ALCÁNTARA, B.; MARTÍNEZ-CUENCA, M.R.; BERMEJO, A.; LEGAZ, F.; QUIÑONES, A. 2016. Liquid organic fertilizers for sustainable agriculture: nutrient uptake of organic versus mineral fertilizers in citrus trees. *PLoS One*. 11(10):e0161619. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161619>
- MEENA, B.P.; KUMAR, A.; LAL, B.; MEENA, R.L.; SHIRALE, A.O.; DOTANIYA, M.L.; KUMAR, K.; SINHA, N.K.; MEENA, S.N.; RAM, A.; GAUTAM, P. 2019. Sustainability of popcorn-potato cropping system improves due to organic manure application and its effect

- on soil health. *Potato Research*. 62:253-279.
<https://doi.org/10.1007/s11540-018-9410-3>
12. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, MADR. 2019. Cadena de la papa, indicadores e instrumentos. (Bogota, Colombia). 18p.
 13. MUÑOZ, L.A.; LUCERO, A.M. 2008. Efecto de la fertilización orgánica en el cultivo de papa criolla *Solanum phureja*. *Agronomía Colombiana*. 26(2):340-346.
 14. ROMERO-LIMA, M. DEL R.; TRINIDAD-SANTOS, A.; GARCÍA-ESPINOSA, R.; FERRERA-CERRATO, R. 2000. Producción de papa y biomasa microbiana en suelo con abonos orgánicos y minerales. *Agrociencia*. 34(3):261-269.
 15. ROZO RODRÍGUEZ, D.; RAMÍREZ, L.N. 2011. La agroindustria de la papa criolla en Colombia. Situación actual y retos para su desarrollo. *Gestión y Sociedad*. 4(2):17-30.
 16. SEMINARIO-CUNYA, J.; VILLANUEVA-GUEVARA, R.; VALDEZ-YOPLA, M. 2018. The yield of early yellow potato cultivars (*Solanum tuberosum L.*) of the Phureja group. *Agronomía Mesoamericana*. 29(3).
<https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.32623>
 17. SIFUENTES IBARRA, E.; OJEDA BUSTAMANTE, W.; MENDOZA PÉREZ, C.; MACÍAS CERVANTES, J.; RÚELAS ISLAS, J.D.R.; INZUNZA IBARRA, M.A. 2013. Nutrición del cultivo de papa (*Solanum tuberosum L.*) considerando variabilidad climática en el "Valle del Fuerte", Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 4(4):585-597.
 18. SIMKO, I.; PIEPHO, H.P. 2012. The area under the disease progress stairs: calculation, advantage, and application. *Phytopathology*. 102(4):381-389.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-11-0216>
 19. SOTO GÁRCES, A.M.; COTES TORRES, J.M.; RODRÍGUEZ CAICEDO, D. 2018. Modelo de simulación del crecimiento y desarrollo de la papa criolla. *Ciencia en Desarrollo*. 9(1):9-31.
<https://doi.org/10.19053/01217488.v9.n1.2018.7008>
 20. ZAMORA, F.; TUA, D.; TORRES, D. 2008. Evaluación de cinco fuentes orgánicas sobre el desarrollo vegetativo y rendimiento del cultivo de papa. *Agronomía Tropical*. 58(3):233-243.



Espectroscopía visible y del infrarrojo cercano para el análisis de nutrientes en tejido vegetal de caña de azúcar para producción de panela

Visible and near infrared spectroscopy for the analysis of nutrients in sugarcane plant tissue for panela production

Deisy Bibiana Camargo-Hernández^{1*} ; Diana Marcela Parra-Forero¹ ; Viviana Marcela Varon-Ramírez¹ ; Juan Carlos Lesmes-Suárez¹ ; Ayda Fernanda Barona-Rodríguez¹ ; Claudia Ariza-Nieto¹ 

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia, Centro de Investigación Tibaitatá. Mosquera - Cundinamarca, Colombia; e-mail: dcamargo@agrosavia.co; dparra@agrosavia.co; vvaron@agrosavia.co; jlesmes@agrosavia.co; abarona@agrosavia.co; cariza@agrosavia.co

*autor de correspondencia: dcamargo@agrosavia.co

Cómo citar: Camargo-Hernández, D.B.; Parra-Forero, D.M.; Varon-Ramírez, V.M.; Lesmes-Suárez, J.C.; Barona-Rodríguez, A.F.; Ariza-Nieto, C. 2023. Espectroscopía visible y del infrarrojo cercano para el análisis de nutrientes en tejido vegetal de caña de azúcar para producción de panela. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2062. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2062>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: agosto 2 de 2021

Aceptado: enero 16 de 2023

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

La espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) es una tecnología rápida, multiparamétrica, amigable con el ambiente, de bajo costo y gran exactitud, para el análisis de diversos componentes en alimentos, en suelo y en agricultura. El objetivo del presente estudio fue construir modelos de calibración NIRS, para la predicción de nutrientes en tejido vegetal de caña de azúcar, para producción de panela, cultivada en la región de la Hoya del río Suárez. Un total de 416 muestras de tejido fueron escaneadas en el segmento espectral Vis-NIR. El análisis quimiométrico, se realizó con el software WinISI V4.10, aplicando la regresión de mínimos cuadrados parciales modificados, junto a una validación cruzada. Se evaluaron cuatro modelos con diferentes tratamientos matemáticos y el rendimiento de las calibraciones, se hizo por medio de la validación externa, analizando las medidas de bondad de ajuste, como el coeficiente de determinación de la predicción, el error estándar de la predicción ajustado por el sesgo y la desviación predictiva residual. Los resultados muestran que el modelo de calibración para N presentó el mayor poder predictivo. Para macronutrientes, las calibraciones, con mayor poder predictivo, fueron P y K y para micronutrientes, el modelo para B, mientras que para Cu presentó el más bajo poder predictivo. Se encontraron modelos adecuados para la predicción de los contenidos de N, Ca y P; para los demás nutrientes, se recomienda ampliar el conjunto de calibración.

Palabras clave: Análisis espectral; Análisis foliar; Propiedades del suelo; Nutrición vegetal; *Saccharum officinarum*.

ABSTRACT

Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) is a fast, multiparametric, environmentally friendly, low-cost, and highly accurate technology for the analysis of components in food, soil, and agriculture. The purpose of this study was to generate NIRS calibration models for the prediction of nutrients in plant tissue of sugarcane to panela production cultivated in the Hoya del Río Suárez region. A total of 416 tissue samples were scanned in Vis-NIR spectral segment. Chemometric analysis was performed with the WinISI V4.10 software applying modified partial least squares regression with cross-validation. Four models with different mathematical treatments were evaluated, and the performance of calibrations was made through external validation analyzing the goodness-of-fit measures as prediction determination coefficient, standard error of the bias-adjusted prediction, and residual predictive deviation. The results showed that the calibration model for N had the highest predictive power. For macronutrients, the calibrations with the best predictive power were for P and K, and micronutrients for B, while Cu presented the lowest predictive power. Adequate models were found for the prediction of N, Ca, and P. In the case of the other nutrients, it is recommended to expand the calibration set.

Keywords: Foliar analysis; Plant nutrition; Soil properties; Spectral analysis; *Saccharum officinarum*.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, la producción de panela es la segunda agroindustria en importancia social después del café (Contreras Pedraza *et al.* 2016). La caña de azúcar para producción de panela es sembrada en casi todo el territorio nacional, pero su producción se concentra en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Santander; en estos dos últimos, se encuentra la región productora conocida como la Hoya del río Suárez (HRS). En esta región, se presentan los mayores rendimientos de cultivo, a nivel nacional, con 100 t ha^{-1} (González Chavarro *et al.* 2018), donde actividades, como la preparación de suelo, la fertilización, el uso de variedades mejoradas y el sistema de corte, influyen en la obtención de estos altos rendimientos.

Para la elaboración de un plan integrado de fertilización del cultivo de caña, además de los análisis de suelo, se deben realizar análisis de composición química del tejido vegetal (Calheiros *et al.* 2018), partiendo del principio que la planta es un sistema dinámico y la demanda de nutrientes varía según su estado fenológico (Prananto *et al.* 2020). En Colombia, los cultivos de caña destinados a la industria azucarera adoptan tecnologías, que incluyen la realización de análisis foliares, los cuales, se realizan periódicamente, durante el ciclo del cultivo, para ajustar los planes de fertilización (Cenicaña, 2020); sin embargo, en zonas donde este cultivo es destinado para la producción de panela, no es común el uso de esta estrategia; no obstante, se conocen los requerimientos nutricionales de diferentes variedades en las diferentes etapas fenológicas para las condiciones agroclimáticas características de la HRS, gracias a varios estudios, como los de González Chavarro *et al.* (2018) y Volverás-Mambuscay *et al.* (2020).

Existen distintas formas de conocer el estado nutricional de los cultivos, siendo la más común, el análisis de nutrientes de los tejidos vegetales, por vía húmeda, los métodos, como la espectrometría de absorción atómica (AAS), la espectrometría de emisión óptica, con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) o la espectrometría de masas, con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) (Cacuango P. *et al.* 2016; Padilla-Cuevas *et al.* 2020); sin embargo, estos métodos presentan algunos inconvenientes, como altos costos para la adquisición y el mantenimiento de equipos, requieren tiempo para el pretratamiento de muestras, generan desechos contaminantes y necesitan mano de obra especializada para su aplicación (Jiménez Heinert *et al.* 2020). Como alternativa, en los últimos años se viene utilizando la espectroscopía de reflectancia difusa en el segmento visible e infrarrojo cercano, para el análisis de una gran diversidad de características químicas y físicas, asociadas a la calidad de los alimentos, el suelo y los productos agrícolas en general (Nocita *et al.* 2015; Ge *et al.* 2019; Galvez-Sola *et al.* 2015; Menesatti *et al.* 2010; Rodrigues *et al.* 2020; Prananto *et al.* 2021).

La tecnología de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS, por sus siglas en inglés), se basa en la absorción electromagnética de un haz de luz, comprendido en el rango de longitudes de onda, que va desde los 400 a los 2.500 nm. La energía emitida a la muestra hace que los enlaces entre C-H, O-H y N-H, componentes principales de la estructura básica de las sustancias orgánicas, vibren de una

forma característica (Givens & Deaville, 1999) permitiendo que el espectrómetro capture la energía absorbida en longitudes de onda específicas (Cen & He, 2007). En el caso de sustancias inorgánicas, la energía absorbida se puede detectar por su asociación con estructuras orgánicas en forma de óxidos, quelatos o cuando presentan enlaces con hidrógeno, lo que permite su determinación, mediante la construcción de modelos de calibración (Clark *et al.* 1987; Cozzolino & Moron, 2004; González-Martín *et al.* 2007).

Para generar un modelo de calibración NIRS, la información espectral se relaciona, mediante algoritmos matemáticos con la información del método de referencia, a través de la aplicación de modelos estadísticos, como la regresión múltiple, el análisis por componentes principales y mínimos cuadrados parciales (PLS, por sus siglas en inglés); luego, se realiza una validación cruzada en el conjunto de calibración, para seleccionar el número óptimo de factores y evitar el sobreajuste y, finalmente, se comprueba la precisión y la exactitud del modelo, mediante un proceso de validación externa, con un conjunto de datos independiente. NIRS es una técnica rápida, no destructiva, ni contaminante y de gran exactitud, siempre que se sigan los procedimientos adecuados para su implementación.

Para el cultivo de caña de azúcar, la tecnología NIRS ha sido implementada por varios autores, entre los que sobresalen Sanseechan *et al.* (2018), quienes desarrollaron un modelo de calibración usando regresión PLS para estimar la densidad sólida de la caña y obtuvieron un coeficiente de determinación de la calibración (R^2)= 0,65; coeficiente de determinación de la predicción (r^2)= 0,67; error estándar de la calibración (SEC)= $23,69 \text{ kg m}^{-3}$; error estándar de la predicción (SEP)= $22,17 \text{ kg m}^{-3}$; sesgo= $-1,076 \text{ kg m}^{-3}$ y error estándar relativo de la predicción (RSEP)= 2,004 %. En otro estudio, Kuswurjanto & Triantarti (2019), evaluaron la aplicación de NIRS para la determinación de % Brix y % Pol, en jugo de caña de azúcar, reportando: r^2 de 0,988 y 0,986, SEP de 0,333 y 0,283 y la desviación predictiva residual (RPD) de 5,441 y 6,125, respectivamente. En jugo de caña, también se ha determinado, con este método, el contenido de algunos nutrientes, como el K, Na, Mg y la relación Na:K, obteniendo una raíz del error cuadrático medio de la predicción (RMSEP) de 27,30; 10,69; 0,57 y 0,03 $\text{mg } 100 \text{ mL}^{-1}$ y un r^2 de 0,78; 0,89; 0,93 y 0,74, respectivamente (Steidle Neto *et al.* 2017).

Adicionalmente, Abdel-Rahman *et al.* (2010) correlacionaron diferentes índices de vegetación con el contenido de N en hojas de caña, aplicando derivadas de primer orden, mediante un espectrorradiómetro de campo, reportando r^2 , entre 0,74 y 0,76 y RMSEP, de 0,084 a 0,09 % N. De la misma manera, Miphokasap *et al.* (2012), en un estudio similar, concluyeron que el modelo generado por la técnica de regresión lineal múltiple (SMLR) con la primera derivada y las longitudes de onda 410, 426, 720, 754 y 1216 nm, arrojó un r^2 de 0,86 y RMSEP de 0,03 % N.

Por otro lado, Adnan *et al.* (2022) evaluaron el rendimiento de la digestibilidad de la biomasa en caña de azúcar para seleccionar un germoplasma óptimo para la producción de biocombustibles,

donde la ecuación con la mayor capacidad predictiva fue la hexosa fermentable, reportando valores de R^2 , de 0,98, RPD de 6,62 y RMSEP de 4.19 kg t^{-1} .

Este estudio asumió, como objetivo, desarrollar modelos de calibración NIRS para predecir el contenido de los macronutrientes N, P, K, Ca, Mg y S y los micronutrientes (Fe, Cu, Mn, Zn y B), en tejido vegetal de caña para la producción de panel, en la región de la HRS.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio. Los municipios que conformaron la zona de estudio fueron: Chitaraque, Togüí, San José de Pare y Santana, en el departamento de Boyacá y Chipatá, Güepsa, San Benito, Suaita y Vélez, en el departamento de Santander, los cuales, pertenecen a la subregión geográfica de la HRS. Esta área, se ubica sobre la región montañosa de la cordillera oriental, con alturas entre

los 1.250 y 2.200 m s.n.m., un clima de tipo bosque seco tropical y monzón tropical, según la clasificación Köppen, caracterizado por temperaturas medias entre 18 y 24 °C, con variaciones entre el día y la noche de 10 y 15 °C, un rango de precipitación de 1.000 a 2.000 mm, en un régimen bimodal, siendo los meses más lluviosos abril, mayo, octubre y noviembre (Departamento de Santander & Universidad Industrial de Santander, 2011; Ramírez Durán *et al.* 2014; IDEAM, 2014).

Metodología para la toma y análisis de muestras. Fueron recolectadas 416 muestras de caña en el área de estudio (Figura 1). Se tomaron 78 muestras de la planta completa, 83 de hojas, 105 de yagua, 75 de cogollo y 75 de tallo, con el fin de obtener un conjunto de calibración, que represente las características del cultivo, para las condiciones generales, de toda el área de estudio.

La preparación de las muestras incluyó un proceso de secado en una estufa con aire forzado a 65 °C, por 48 horas o hasta obtener peso

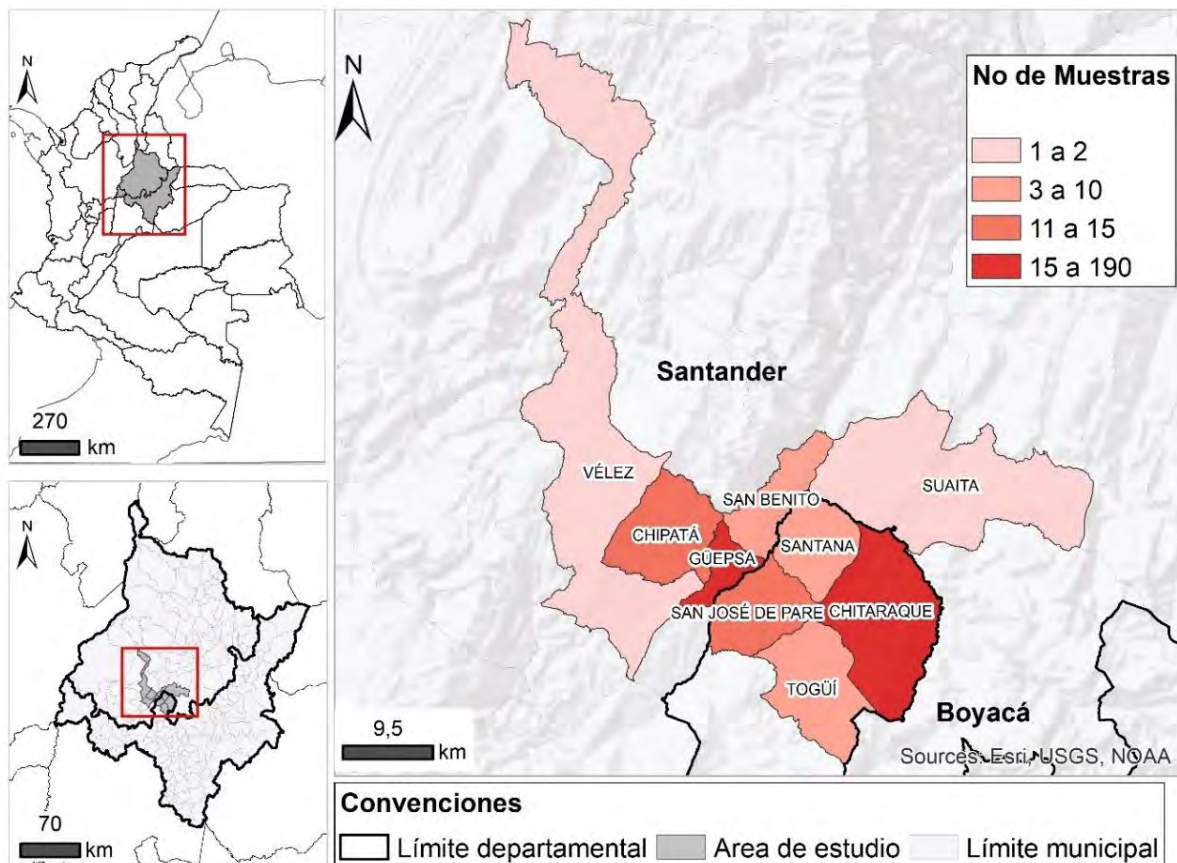


Figura 1. Ubicación de los municipios donde se realizó el muestreo de tejido vegetal de plantas de caña de azúcar para panela.

constante; fueron molidas en un molino de martillo y tamizadas en una criba de 1 mm, de acuerdo con la recomendación de Ikoyi & Younge (2020), quienes demostraron que moler y secar las muestras mejora las estadísticas de calibración para la mayoría de los nutrientes. Los métodos de referencia empleados para determinar las variables evaluadas en laboratorio fueron: para N (%), por método Oficial AOAC 960.52 Kjeldahl/Volumetría; para determinación de los nutrientes Ca, P, K, Mg, S ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}\text{MS}$), Fe, Cu, Mn, Zn y B

($\text{mg kg}^{-1}\text{MS}$), se usó la técnica de ICP-OES en visión axial, en un equipo iCAP 6500 DUO, utilizando la línea de análisis 283.5 nm y un nebulizador concéntrico K-Type de Thermo Scientific.

Medidas de espectroscopía. Posterior al secado y molienda de las muestras, se escanearon en el espectrómetro VIS/NIR (NIRS DS2500), en el modo de reflectancia difusa en el segmento espectral, comprendido entre los 400 a 2.500 nm, con resolución

espectral de 0,5 nm. Las muestras fueron depositadas en una copa circular de 60 mm de diámetro y se registraron siete espectros por cada una de las muestras, usando el software ISIScan V4.8.0.1. El espectro de cada muestra correspondió al promedio de 32 lecturas sucesivas, obteniendo la absorbancia expresada, como resultado del log (1/R), donde R corresponde a la reflectancia.

Calibración y validación de ecuaciones. Los modelos de calibración, se desarrollaron utilizando el software WinISI V4.10.0.15326 de Foss y Infrasoft International, USA. Las muestras fueron divididas aleatoriamente en dos grupos; uno, con el 80 % del conjunto de datos, el cual, fue usado para la calibración de la ecuación de predicción y otro, con el 20 % del conjunto de datos para la validación externa del modelo, similar a los trabajos realizados por Ulissi *et al.* (2011) y Ancin Murguzur *et al.* (2019).

Previo al desarrollo del modelo de calibración, a los datos espectrales se les aplicó pretratamientos matemáticos, para corregir la línea base y la dispersión de la luz, mediante los métodos estándar de variación normal y de tendencia (SVN y Detrend, por sus siglas en inglés) (Arana *et al.* 2005), analizadas por el método de componentes principales (PCA), con el fin de disminuir el ruido y reducir el número de variables latentes. Este proceso, se realizó para dos segmentos espectrales: 1) visible más infrarrojo cercano de 400 a 2.500 nm (Visible+NIR) y 2) infrarrojo, cercano de 1.100 a 2.500 nm (NIR), considerando que se reportan importantes aportes de información en las bandas que comprenden la región visible del espectro (Rodríguez *et al.* 2020). Las muestras fueron clasificadas, de acuerdo con la distancia de Mahalanobis (H), donde, aquellas con valores de H superiores a 3,0, se consideraron atípicos y se descartaron (Shenk & Westrherhaus, 1991).

Tabla 1. Rango de macro y micronutrientes en las muestras analizadas para cada parte de la planta de caña de azúcar, para la producción de panela.

Variable	Parte de la planta				
	Planta completa	Hoja	Yagua	Cogollo	Tallo
n	78	83	105	75	75
N (g 100g ⁻¹ MS)	0,28 - 1,61	0,57 - 2,08	0,27 - 1,6	0,61 - 1,53	0,14 - 0,80
Ca (g 100g ⁻¹ MS)	0,08 - 0,60	0,06 - 0,60	0,11 - 0,41	0,15 - 0,41	0,02 - 0,18
P (g 100g ⁻¹ MS)	0,04 - 0,28	0,07 - 0,25	0,05 - 0,21	0,14 - 0,33	0,06 - 0,13
K (g 100g ⁻¹ MS)	0,56 - 3,00	0,18 - 2,31	0,21 - 2,94	1,00 - 4,69	0,02 - 1,10
Mg (g 100g ⁻¹ MS)	0,03 - 0,15	0,03 - 0,12	0,03 - 0,12	0,05 - 0,18	0,03 - 0,11
S (g 100g ⁻¹ MS)		0,09 - 0,23	0,10 - 0,59	0,12 - 0,37	0,03 - 0,27
Fe (mg kg ⁻¹ MS)		34,66 - 173,67	22,85 - 231,53	7,04 - 96,12	7,52 - 162,29
Cu (mg kg ⁻¹ MS)		1,97 - 5,29	0,39 - 4,12	1,34 - 4,64	0,03 - 4,00
Mn (mg kg ⁻¹ MS)		44,82 - 182,59	54,04 - 328,35	60,79 - 199,82	8,67 - 101,01
Zn (mg kg ⁻¹ MS)		6,36 - 28,29	3,98 - 37,08	17,10 - 59,88	3,75 - 59,68
B (mg kg ⁻¹ MS)		1,87 - 20,98	1,87 - 17,48	2,68 - 9,00	0,54 - 3,59

MS: Materia seca, n: Número de muestras.

Para calibrar el modelo, se usó el método de regresión de mínimos cuadrados parciales modificados (MPLS), para todas las variables estudiadas. Posteriormente, se realizó la validación cruzada para seleccionar el número óptimo de factores y evitar el sobreajuste del modelo y, adicionalmente, para evaluar el poder predictivo de las ecuaciones seleccionadas, se realizó un proceso de validación externa, usando un grupo de muestras independiente al conjunto de calibración. En la calibración de cada componente, se utilizaron los dos segmentos Visible+NIR y NIR y en cada segmento, se evaluaron cuatro tratamientos matemáticos: 1.4.4.1, 1.8.8.1, 2.4.4.1, 2.8.8.1, donde el primer dígito corresponde al orden de la derivada, el segundo dígito es el segmento de derivación, el tercero y cuarto corresponde al suavizado de la señal (Ozaki *et al.* 2007).

Para evaluar la bondad de ajuste del modelo, se usó el SEC, el R², el error estándar de validación cruzada (SECV), el coeficiente de determinación de la validación cruzada (R²vc) y RPD, que relaciona la desviación estándar de los datos de referencia y el SECV. Teniendo en cuenta los parámetros anteriores, se seleccionaron las mejores ecuaciones, a partir de los valores más altos de R²vc y RPD, junto con los valores más bajos de SECV, según Williams (2001).

La validación externa fue evaluada por medio del error estándar de la predicción, ajustado por el sesgo (SEPC), el sesgo (diferencia entre los valores predichos de NIR y los valores determinados por la química de referencia), el r² y RPD (DE/SEPC). Las ecuaciones NIRS generadas con RPD inferiores a 1,9 son consideradas como

no adecuadas para su aplicación, entre 2 y 2,9; solo se recomienda para fines de evaluación y con RPD superiores a 3, que pueden ser usadas para control de calidad (Williams, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de nutrientes en caña de azúcar por método de referencia química. El rango de los valores de macro y micronutrientes de las 416 muestras de caña de azúcar analizadas por el método de referencia, se muestran en la tabla 1. Se encontró una amplia gama de valores para todas las variables de estudio, debido al muestreo diferenciado de las partes de la planta, bajo diferentes ubicaciones, lo cual, permite construir y obtener ecuaciones con un mejor poder de predicción.

La planta completa de caña de azúcar presenta contenidos de N de $0,6 \pm 0,26$ g 100 g⁻¹MS, Ca de $0,25 \pm 0,11$ g 100 g⁻¹MS, P de $0,11 \pm 0,04$ g 100 g⁻¹MS, K de $1,3 \pm 0,53$ g 100 g⁻¹MS y Mg de $0,06 \pm 0,02$ g 100 g⁻¹MS. Las hojas presentan mayores contenidos de N, Ca y B y menores concentraciones de S y Zn, es necesario resaltar que en esta parte de la planta el Ca y B presentan concentraciones con mayor variabilidad, mientras que para el caso de la yagua el S, Fe y Mn son los nutrientes que presentan mayores contenidos y variabilidad. Por otro lado, para el cogollo, se presentaron mayores contenidos de P, K y Zn, así como menores concentraciones de Fe. La parte de la planta con menores concentraciones de N, Ca, P, K, Mn y B es el tallo. Todas las partes de la planta de caña de azúcar analizadas por separado presentaron contenidos similares de Mg y Cu.

El rango de N en este trabajo fue similar a lo reportado por Bastidas *et al.* (2010), quienes indicaron concentraciones de proteína cruda (PC), entre 1,13 y 9,11 % ($0,18$ a $1,46$ g 100 g⁻¹MS de N), al evaluar diferentes variedades y tiempos de cosecha. Igualmente, en el estudio realizado por López *et al.* (2003) reportaron contenidos similares de PC, de 4,62 % ($0,73$ g 100 g⁻¹MS de N), en el cogollo; 1,93 % ($0,31$ g 100 g⁻¹MS de N), en la planta competa y 0,81 % ($0,13$ g 100 g⁻¹MS de N), en el tallo.

Los contenidos de Ca y P en la planta completa de este estudio fueron similares a los obtenidos por Bastidas *et al.* (2010), al evaluar diferentes variedades y tiempos de cosecha, reportando valores para Ca, de $0,18$ a $0,64$ g 100 g⁻¹MS y P, de $0,02$ a $0,21$ g 100 g⁻¹MS. Igualmente, las concentraciones de P son congruentes con el estudio de Chen *et al.* (2002), quienes reporta un rango de $0,055$ a $0,345$ g 100 g⁻¹MS, en hojas de caña de azúcar.

El contenido de Mg en el tallo encontrado en este estudio presentó rangos inferiores a los reportados por Salgado-García *et al.* (2008), quienes encontraron valores entre $0,09$ y $0,23$ g 100 g⁻¹MS, para cultivos de caña de azúcar, en suelos del orden molisol, vertisol y algunos entisoles, en México. De igual manera, los contenidos de Mg y K en hojas fueron inferiores a lo reportado por Da Silva (2009), quien realizó análisis foliar de cultivos de caña, en Brasil, encontrando contenidos de Mg, de $0,1$ a $0,3$ g 100 g⁻¹MS y K, de 1 a $1,6$ g 100 g⁻¹MS.

Los elementos menores encontrados en las hojas fueron similares a los valores reportados por Muchovej *et al.* (2005), quienes encontraron contenidos de Fe, de $45,6$ y $35,2$ mg kg^{-1} ; Cu, de 5 y 6 mg kg^{-1} ; Mn, de 105 y $32,4$ mg kg^{-1} y Zn, de $16,5$ y $18,9$ mg kg^{-1} , para tejido foliar en cultivos de caña de azúcar, con periodos de desarrollo vegetativo de 4 y 10 meses, respectivamente.

Calibración y validación de ecuaciones NIRS para nutrientes en caña de azúcar. La estadística descriptiva de los conjuntos de datos para la calibración y validación obtenidos de los análisis de macro y micronutrientes para tejido vegetal de caña de azúcar para panela, se muestran en la tabla 2. En todos los casos, la desviación estándar del conjunto de muestras fue menor a la media aritmética y el rango de datos utilizado para la validación externa, no extrapoló los valores mínimos y máximos del rango de datos, usados para la calibración.

A partir del conjunto de muestras de calibración, se seleccionó el mejor tratamiento matemático para cada variable analizada y se evaluaron los segmentos espectrales Visible+NIR y NIR.

Las medidas de bondad de ajuste de los modelos de calibración de nitrógeno, macro y micronutrientes, se muestran en la tabla 3. Para la mayoría de los análisis, el rendimiento de los modelos fue mejor para los tratamientos matemáticos, que contenían la primera derivada; para el Ca, P, Mg, Fe y B, se seleccionó el tratamiento matemático 1.4.4.1 y para el N, K, Mn y Zn, el tratamiento 1.8.8.1. Por otro lado, para el S y Cu se ajustó mejor el tratamiento matemático con la segunda derivada 2.8.8.1.

En la etapa de calibración y de validación cruzada, el N, Ca, S y B mostraron resultados similares para los dos segmentos espectrales (Visible + NIR y NIR), pues presentaron valores para SECV iguales y para R²_{vc} y RPD, similares. Para los nutrientes P, K, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn, se observaron resultados con diferencias leves entre los dos segmentos espectrales, con valores similares de R²_{vc} y de RPD.

Los productos de origen orgánico interaccionan de manera distinta a la radiación electromagnética, debido a su naturaleza (Singh *et al.* 2022), por lo que no es posible comparar los resultados obtenidos en este estudio con otras especies; sin embargo, Cozzolino & Moron (2004) demostraron la eficiencia del uso de la espectroscopía visible y NIRS, para la predicción de nutrientes en especies de leguminosas.

La evaluación estadística en la etapa de calibración y de validación cruzada permitió identificar que el uso de los segmentos espectrales Visible+NIR y NIR presentan resultados similares en la construcción de ecuaciones de calibración para las variables composicionales. Dado que las curvas de calibración bien correlacionadas no significan resultados altamente predictivos necesarios durante el análisis de rutina, se llevó a cabo la validación externa, utilizando un conjunto de 83 muestras, independientes de aquellas empleadas en la calibración. La precisión y la exactitud de la predicción, se evaluó mediante el cálculo de los métodos estadísticos SEPc, sesgo, r² y RPD, que se muestran en la tabla 4.

Tabla 2. Estadística descriptiva de los macro y micronutrientes para las muestras de los conjuntos de calibración y de validación en caña de azúcar, para la producción de panela.

Variable	Calibración						Validación				
	N	Media	DE	Min	Max	SEL	n	Media	DE	Min	Max
N (g 100g ⁻¹ MS)	315	0,71	0,40	0,14	2,08	0,002	79	0,77	0,41	0,15	1,70
Ca (g 100g ⁻¹ MS)	326	0,21	0,11	0,02	0,60	0,004	83	0,21	0,11	0,04	0,47
P (g 100g ⁻¹ MS)	332	0,14	0,07	0,04	0,33	0,001	82	0,13	0,06	0,05	0,29
K (g 100g ⁻¹ MS)	333	1,38	0,89	0,01	4,69	0,013	83	1,29	0,79	0,03	4,39
Mg (g 100g ⁻¹ MS)	309	0,07	0,03	0,03	0,18	0,001	77	0,07	0,02	0,03	0,15
S (g 100g ⁻¹ MS)	270	0,20	0,10	0,03	0,59	0,003	68	0,20	0,10	0,03	0,48
Fe (mg kg ⁻¹ MS)	270	65,14	41,72	7,04	231,53	15,914	68	61,15	35,37	10,94	163,31
Cu (mg kg ⁻¹ MS)	264	2,33	1,01	0,03	5,29	0,060	67	2,38	1,17	0,23	5,17
Mn (mg kg ⁻¹ MS)	270	116,29	65,08	8,67	328,35	1,401	68	102,93	52,37	17,52	237,57
Zn (mg kg ⁻¹ MS)	270	20,17	12,67	3,75	59,88	0,670	67	18,02	12,45	5,17	57,50
B (mg kg ⁻¹ MS)	270	5,01	3,73	0,54	20,98	0,150	68	5,43	3,80	0,67	17,00

MS: Materia seca, n: Número de muestras, DE: Desviación estándar, Min: Mínimo, Max: Máximo, SEL: Error estándar de laboratorio.

Tabla 3. Parámetros estadísticos de las ecuaciones evaluadas para la predicción de nutrientes en caña de azúcar, para la producción de panela.

Variable	Tratamiento matemático	Segmento	PLS	n	DE	Calibración			Validación cruzada		
						SEC	R ²	RPD	SECV	R ² vc	RPD
N (g 100g ⁻¹ MS)	1.8.8.1	Visible+NIR	14	292	0,39	0,05	0,98	7,18	0,06	0,97	6,11
		NIR	13	300	0,39	0,06	0,98	7,12	0,06	0,97	6,14
Ca (g 100g ⁻¹ MS)	1.4.4.1	Visible+NIR	13	310	0,10	0,05	0,81	2,32	0,05	0,76	2,04
		NIR	15	308	0,10	0,04	0,83	2,44	0,05	0,77	2,09
P (g 100g ⁻¹ MS)	1.4.4.1	Visible+NIR	15	315	0,06	0,02	0,90	3,19	0,03	0,85	2,55
		NIR	15	314	0,06	0,02	0,92	3,44	0,02	0,87	2,73
K (g 100g ⁻¹ MS)	1.8.8.1	Visible+NIR	13	317	0,85	0,32	0,86	2,69	0,37	0,81	2,31
		NIR	11	314	0,82	0,35	0,82	2,33	0,39	0,78	2,12
Mg (g 100g ⁻¹ MS)	1.4.4.1	Visible+NIR	12	284	0,03	0,01	0,77	2,09	0,01	0,71	1,84
		NIR	14	285	0,03	0,01	0,83	2,40	0,01	0,73	1,94
S (g 100g ⁻¹ MS)	2.8.8.1	Visible+NIR	10	253	0,10	0,03	0,91	3,31	0,04	0,84	2,54
		NIR	9	247	0,10	0,03	0,90	3,12	0,04	0,83	2,47
Fe (mg kg ⁻¹ MS)	1.4.4.1	Visible+NIR	9	252	36,90	17,52	0,77	2,11	19,05	0,73	1,94
		NIR	5	240	35,72	18,03	0,75	1,98	19,26	0,71	1,85
Cu (mg kg ⁻¹ MS)	2.8.8.1	Visible+NIR	4	231	0,95	0,60	0,61	1,59	0,63	0,57	1,52
		NIR	5	231	0,97	0,63	0,57	1,53	0,68	0,51	1,43
Mn (mg kg ⁻¹ MS)	1.8.8.1	Visible+NIR	11	250	60,89	20,23	0,89	3,01	23,46	0,85	2,60
		NIR	12	250	61,02	20,35	0,89	3,00	24,04	0,84	2,54
Zn (mg kg ⁻¹ MS)	1.8.8.1	Visible+NIR	11	247	11,42	4,41	0,85	2,59	5,18	0,79	2,20
		NIR	10	243	11,46	4,58	0,84	2,50	4,86	0,82	2,36
B (mg kg ⁻¹ MS)	1.4.4.1	Visible+NIR	14	253	2,92	0,80	0,92	3,64	0,94	0,90	3,09
		NIR	11	245	2,85	0,84	0,91	3,40	0,94	0,89	3,03

MS: Materia seca, NIR: Infrarrojo cercano, PLS: Número de términos empleados en la regresión, n: Número de muestras, DE: Desviación estándar, SEC: Error estándar de calibración, R²: Coeficiente de determinación de la calibración, SECV: Error estándar de validación cruzada, R²vc: Coeficiente de determinación en la validación cruzada, RPD: Relación del desempeño de la desviación.

Tabla 4. Parámetros estadísticos de la fase de validación externa utilizando las calibraciones seleccionadas para la predicción de nutrientes en caña de azúcar, para la producción de panela.

Variable	Tratamiento matemático	Segmento	PLS	n	DE	Sesgo	SEP	SEPC	r ²	RPD
N (g 100g ⁻¹ MS)	1.8.8.1	Visible+NIR	14	79	0,40	0,01	0,07	0,07	0,97	5,74
		NIR	13	79	0,40	0,01	0,07	0,07	0,98	6,03
Ca (g 100g ⁻¹ MS)	1.4.4.1	Visible+NIR	13	83	0,10	0,00	0,06	0,06	0,73	1,72
		NIR	15	83	0,10	0,01	0,06	0,06	0,72	1,61
P (g 100g ⁻¹ MS)	1.4.4.1	Visible+NIR	15	82	0,05	0,00	0,03	0,03	0,78	1,93
		NIR	15	82	0,05	0,00	0,03	0,03	0,73	1,68
K (g 100g ⁻¹ MS)	1.8.8.1	Visible+NIR	13	83	0,72	0,00	0,36	0,37	0,79	1,97
		NIR	11	83	0,70	0,01	0,40	0,40	0,75	1,75
Mg (g 100g ⁻¹ MS)	1.4.4.1	Visible+NIR	12	77	0,03	0,00	0,02	0,02	0,59	1,56
		NIR	14	77	0,03	0,01	0,02	0,02	0,64	1,82
S (g 100g ⁻¹ MS)	2.8.8.1	Visible+NIR	10	68	0,09	0,00	0,05	0,05	0,76	1,88
		NIR	9	68	0,09	0,00	0,05	0,05	0,75	1,86
Fe (mg kg ⁻¹ MS)	1.4.4.1	Visible+NIR	9	68	31,25	0,58	20,64	20,78	0,67	1,50
		NIR	5	68	29,16	1,16	20,87	20,99	0,65	1,39
Cu (mg kg ⁻¹ MS)	2.8.8.1	Visible+NIR	4	67	0,90	0,11	0,97	0,97	0,36	0,92
		NIR	5	67	0,86	0,21	0,84	0,83	0,51	1,04
Mn (mg kg ⁻¹ MS)	1.8.8.1	Visible+NIR	11	68	54,10	-4,61	26,77	26,56	0,77	2,04
		NIR	12	68	56,66	-5,08	27,56	27,28	0,76	2,08
Zn (mg kg ⁻¹ MS)	1.8.8.1	Visible+NIR	11	67	9,97	0,90	5,87	5,84	0,78	1,71
		NIR	10	67	9,50	0,88	5,95	5,92	0,78	1,60
B (mg kg ⁻¹ MS)	1.4.4.1	Visible+NIR	14	68	3,49	-0,03	1,36	1,37	0,87	2,54
		NIR	11	68	3,43	0,06	1,32	1,33	0,88	2,59

MS: Materia seca, NIR: Infrarrojo cercano, PLS: Número de términos empleados en la regresión, n: Número de muestras, DE: Desviación estándar, SEP: Error estándar de predicción, SEPC: Error estándar de la predicción ajustado por el sesgo, r²: Coeficiente de determinación de la predicción, RPD: Relación del desempeño de la desviación.

Para el N, se seleccionó, como mejor modelo el desarrollado, a partir del segmento espectral NIR, usando el tratamiento matemático 1.8.8.1, ya que presenta un mayor RPD y r², correspondiente a una correlación alta con el analito; no obstante, los modelos de predicción con los dos segmentos espectrales presentaron un valor igual de SEPC, por lo que ambos segmentos espectrales pueden ser utilizados para la predicción del analito, con una precisión y exactitud semejante.

Con relación al Ca, P y Fe, se eligieron los modelos desarrollados a partir del segmento espectral Visible+NIR, usando el tratamiento matemático 1.4.4.1, debido a que los modelos exhibieron un mayor RPD y r², indicando una correlación media con el analito, aunque, para Ca y P, los modelos de predicción con los dos segmentos espectrales presentaron un valor igual de SEPC. Chen *et al.* (2002) desarrollaron modelos de predicción para P en hojas de caña de azúcar con alta

precisión, reportando un r²= 0,99, SEP= 0,01 g kg⁻¹ y RPD= 0,49; estos valores fueron obtenidos después de un proceso de eliminación de puntos del segmento espectral innecesarios implementando la Regresión de incertidumbre de Martens, en combinación con PLS.

En cuanto a la predicción de los contenidos de K y Zn, se obtuvo un desempeño mayor para el modelo desarrollado, a partir del segmento espectral Visible+NIR, usando el tratamiento matemático 1.8.8.1, teniendo en cuenta que los modelos presentaron un mayor RPD y r² y un menor SEPC.

El uso del segmento NIR presentó mejores resultados para los modelos de predicción del Mg y Cu. Para el Mg, se usó el tratamiento matemático 1.4.4.1, dando un mayor RPD y r². Para el Cu, se empleó el tratamiento matemático 2.8.8.1, presentando un mayor RPD y r²

y menor SEPC; no obstante, el valor r^2 corresponde a una correlación baja con el analito, indicando baja precisión del modelo.

Para los nutrientes de S, Mn y B, se observó que los modelos desarrollados a partir de los dos segmentos espectrales analizados en este estudio pueden ser utilizados para la predicción del analito, pues presentaron valores similares para RPD y r^2 .

De los resultados obtenidos en este estudio, se puede concluir, que se encontraron modelos adecuados para la predicción de los contenidos de N, Ca y P, a través de la firma espectral de tejido vegetal en plantas de caña para la producción de panela, identificándose el potencial de la herramienta NIRS, como una alternativa ágil y amigable con el medio ambiente. De esta forma, esta tecnología permite elaborar o ajustar planes de fertilización, a través de la identificación de deficiencias nutricionales en los cultivos.

Dado el potencial identificado para este estudio, se recomienda ampliar el conjunto de calibración con material vegetal de otras regiones productoras del país, como Antioquia, Cundinamarca y Nariño. Estos departamentos contribuyen significativamente a la producción de panela del país, pero poseen condiciones agroclimáticas diferentes a la HRS y, por lo tanto, el desarrollo vegetativo y la respuesta de los cultivos puede ser diferente.

Agradecimientos. A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, por su colaboración y disposición para la ejecución de la propuesta de investigación. Conflictos de intereses: El artículo fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. Contribución autores: Deisy Bibiana Camargo Hernández y Diana Marcela Parra Forero realizaron la curaduría y análisis formal de los datos para la escritura del borrador del manuscrito. Viviana Marcela Varón Ramírez, Juan Carlos Lesmes Suárez y Ayda Fernanda Barona Rodríguez contribuyeron con la investigación en campo y manejo de recursos. Claudia Ariza Nieto lideró la contextualización y metodología del manuscrito. Todos los autores participaron en la redacción, revisión, edición del manuscrito y aprueban la versión final. Financiación: Este estudio fue financiado con recursos públicos asignados a Agrosavia, mediante el proyecto “ID 1001230 Ajuste de tecnologías para el manejo de suelos, transporte aéreo de caña y extracción de jugo de caña para la industria panelera”.

REFERENCIAS

1. ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; VAN DEN BERG, M. 2010. Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 12:S52-S57. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.003>
2. ADNAN, M.; SHEN, Y.; MA, F.; WANG, M.; JIANG, F.; HU, Q.; MAO, L.; LU, P.; CHEN, X.; HE, G.; KHAN, M.T.; DENG, Z.; CHEN, B.; ZHANG, M.; HUANG, J. 2022. A quick and precise online near-infrared spectroscopy assay for high-throughput screening biomass digestibility in large scale sugarcane germplasm. *Industrial Crops and Products*. 189:115814. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115814>
3. ANCIN MURGUZUR, F.J.; BISON, M.; SMIS, A.; BÖHNER, H.; STRUYF, E.; MEIRE, P.; BRÅTHEN, K.A. 2019. Towards a global arctic-alpine model for Near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) predictions of foliar nitrogen, phosphorus and carbon content. *Scientific Reports*. 9(1):1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44558-9>
4. ARANA, I.; JARÉN, C.; ARAZURI, S. 2005. Maturity, variety and origin determination in white grapes (*Vitis vinifera* L.) using near infrared reflectance technology. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 13(6):349-357. <https://doi.org/10.1255/jnirs.566>
5. BASTIDAS, L.; REA, R.; DE SOUSA, O.; VALLE, A.; VENTURA, J. 2010. Calidad forrajera de cinco variedades de caña de azúcar en Santa Cruz de Bucaral, Estado Falcón, Venezuela. *Revista de Estudios Transdisciplinarios*. 2(2):63-75.
6. CACUANGO P., L.; ALVARADO O., S.; JIBAJA A., Y. 2016. Determinación de macro y micronutrientes catiónicos en tejidos vegetales de banano, palma y rosas, por espectroscopía de emisión por acoplamiento de plasma inductivo y detección óptica (ICP-OES). *InfoANALÍTICA*. 4(1):33-45. <https://doi.org/10.26807/ia.v4i1.13>
7. CALHEIROS, L.C.S.; FREIRE, F.J.; FILHO, G.M.; OLIVEIRA, E.C.A.; MOURA, A.B.; COSTA, J.V.T.; CRUZ, F.J.R.; SANTOS, Á.S.; REZENDE, J.S. 2018. Assessment of nutrient balance in sugarcane using DRIS and CND methods. *Journal of Agricultural Science*. 10(9):164. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n9p164>
8. CEN, H.; HE, Y. 2007. Theory and application of near infrared Reflectance spectroscopy in determination of food quality. *Trends in Food Science & Technology*. 18(2):72-83. <http://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.09.003>
9. CENICAÑA. 2020. Análisis de Tejido Foliar- Servicio de análisis de laboratorio. Disponible desde Internet en: <https://www.cenicana.org/servicio-de-analisis-de-tejido-foia-r-para-recomendaciones-de-fertilizacion-2/>
10. CHEN, M.; GLAZ, B.; GILBERT, R.A.; DAROUB, S.H.; BARTON, F.E.; WAN, Y. 2002. Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of phosphorus in sugarcane leaves. *Agronomy Journal*. 94(6):1324-1331. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.1324>
11. CLARK, D.H.; MAYLAND, H.F.; LAMB, R.C. 1987. mineral






- analysis of forages with near infrared reflectance spectroscopy. *Agronomy Journal*. 79(3):485-490.
<https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900030016x>
12. CONTRERAS PEDRAZA, C.A.; RAMIREZ, J.; FONSECA, S.E. 2016. Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sector Agropecuario Colombiano. Cadena agroindustrial de la panela. Pectia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colciencias. Colombia. 33p. Disponible desde Internet en:
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/1392>
 13. COZZOLINO, D.; MORON, A. 2004. Exploring the use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to predict trace minerals in legumes. *Animal Feed Science and Technology*. 111(1-4):161-173.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2003.08.001>
 14. DA SILVA, F.C. 2009. Manual de análisis química de solos, plantas e fertilizantes. 2nd ed. Embrapa. Brasília, Brasil. 624p.
 15. DEPARTAMENTO DE SANTANDER; UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. 2011. Santander 2030. Diagnostico dimensión biofísico ambiental territorial de Santander. Tomo 1. Colombia. 250p.
 16. GALVEZ-SOLA, L.; GARCÍA-SÁNCHEZ, F.; PÉREZ-PÉREZ, J.G.; GIMENO, V.; NAVARRO, J.M.; MORAL, R.; MARTÍNEZ-NICOLÁS, J.J.; NIEVES, M. 2015. Rapid estimation of nutritional elements on citrus leaves by near infrared reflectance spectroscopy. *Frontiers in Plant Science*. 6:571.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00571>
 17. GE, Y.; ATEFI, A.; ZHANG, H.; MIAO, C.; RAMAMURTHY, R.K.; SIGMON, B.; YANG, J.; SCHNABLE, J.C. 2019. High-throughput analysis of leaf physiological and chemical traits with VIS-NIR-SWIR spectroscopy: A case study with a maize diversity panel. *Plant Methods*. 15(1):66.
<https://doi.org/10.1186/s13007-019-0450-8>
 18. GIVENS, D.I.; DEAVILLE, E.R. 1999. The current and future role of near infrared reflectance spectroscopy in animal nutrition: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*. 50(7):1131-1145.
<https://doi.org/10.1071/AR98014>
 19. GONZÁLEZ CHAVARRO, F.; CABEZAS GUTIÉRREZ, M.; RAMÍREZ-GÓMEZ, M.; RAMÍREZ DURÁN, J. 2018. Curvas de absorción de macronutrientes en tres variedades de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) para panela, en la Hoya del Río Suárez. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 21(2):395-404.
<https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.995>
 20. GONZÁLEZ-MARTÍN, I.; HERNÁNDEZ-HIERRO, J.M.; GONZÁLEZ-CABRERA, J.M. 2007. Use of NIRS technology with a remote reflectance fibre-optic probe for predicting mineral composition (Ca, K, P, Fe, Mn, Na, Zn), protein and moisture in alfalfa. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 387:2199-2205.
<https://doi.org/10.1007/s00216-006-1039-4>
 21. IKOYI, A.Y.; YOUNGE, B.A. 2020. Influence of forage particle size and residual moisture on near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) calibration accuracy for macro-mineral determination. *Animal Feed Science and Technology*. 270:114674.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114674>
 22. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. 2014. Clasificación climática de Köppen periodo 1981-2010. Disponible desde Internet en:
http://www.ideam.gov.co/galeria-de-mapas/-/document_library_display/4VnjNLZDi78B/view/599272
 23. JIMÉNEZ HEINERT, M.; GRIJALVA ENDARA, A.; PONCE SOLÓRZANO, H. 2020. Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES). *Recimundo*. 4(4):4-12.
[https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.4-12](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.4-12)
 24. KUSWURJANTO, R.; TRIANTARTI. 2019. Study on application of near infrared (NIR) spectroscopy for sugar cane juice analysis to replace conventional analysis methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 355:012059.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012059>
 25. LÓPEZ, I.; ARANDA, E.M.; MENDOZA, J.A.; RAMOS, G.D. 2003. Evaluación nutricional de ocho variedades de caña de azúcar con potencial forrajero. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 37(4):381-386.
 26. MENESATTI, P.; ANTONUCCI, F.; PALLOTTINO, F.; ROCCUZZO, G.; ALLEGRA, M.; STAGNO, F.; INTRIGLIOLO, F. 2010. Estimation of plant nutritional status by Vis-NIR spectrophotometric analysis on orange leaves [*Citrus sinensis* (L) Osbeck cv Tarocco]. *Biosystems Engineering*. 105(4):448-454.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.01.003>
 27. MIPHOKASAP, P.; HONDA, K.; VAIPHASA, C.; SOURIS, M.; NAGAI, M. 2012. Estimating canopy nitrogen concentration in sugarcane using field imaging spectroscopy. *Remote Sensing*. 4(6):1651-1670.
<https://doi.org/10.3390/rs4061651>
 28. MUCHOVEJ, R.M.; NEWMAN, P.R.; LUO, Y. 2005. Sugarcane leaf nutrient concentrations: With or without

- midrib tissue. *Journal of Plant Nutrition*. 28(7):1271-1286. <https://doi.org/10.1081/PLN-200063303>
29. NOCITA, M.; STEVENS, A.; VAN WESEMAEL, B.; AITKENHEAD, M.; BACHMANN, M.; BARTHÈS, B.; DOR, E.B.; BROWN, D.J.; CLAIROTTE, M.; CSORBA, A.; DARDENNE, P.; DEMATTÈ, J.A.M.; GENOT, V.; GUERRERO, C.; KNADEL, M.; MONTANARELLA, L.; NOON, C.; RAMIREZ-LOPEZ, L.; ROBERTSON, J.; SAKAI, H.; SORIANO-DISLA, J.M.; SHEPHERD, K.D.; STENBERG, B.; TOWETT, E.K.; VARGAS, R.; WETTERLIND, J. 2015. Chapter four-Soil spectroscopy: An alternative to wet chemistry for soil monitoring. *Advances in Agronomy*. 132:139-159. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.02.002>
 30. OZAKI, Y.; MCCLURE, W.F.; CHRISTY, A.A. 2007. *Near-Infrared Spectroscopy in food science and technology*. Wiley Interscience. Hoboken, New Jersey, USA. 405p. <https://doi.org/10.1002/0470047704>
 31. PADILLA-CUEVAS, J.; YEE-MADEIRA, H.T.; MERINO-GARCÍA, A.; HIDALGO, C.; ETCHEVERS, J.D. 2020. Análisis de los elementos minerales esenciales y tóxicos en tejidos vegetales. *Agrociencia*. 54(3):413-434. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v54i3.1916>
 32. PRANANTO, J.A.; MINASNY, B.; WEAVER, T. 2020. Chapter one - Near infrared (NIR) spectroscopy as a rapid and cost-effective method for nutrient analysis of plant leaf tissues. En: Sparks, D.L. (ed.). *Advances in agronomy*. 1st edition, volume. 164. Academic Press. p.1-49. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.06.001>
 33. PRANANTO, J.A.; MINASNY, B.; WEAVER, T. 2021. Rapid and cost-effective nutrient content analysis of cotton leaves using near-infrared spectroscopy (NIRS). *PeerJ*. 9:e11042. <https://doi.org/10.7717/peerj.11042>
 34. RAMÍREZ DURÁN, J.; INSUASTY BURBANO, O.; VIVEROS VALENS, C.A. 2014. Comportamiento agroindustrial de diez variedades de caña de azúcar para producción de panela en Santander, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 15(2):183. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num2_art:358
 35. RODRIGUES, M.; NANNI, M.R.; CEZAR, E.; DOS SANTOS, G.L.A.A.; REIS, A.S.; DE OLIVEIRA, K.M.; DE OLIVEIRA, R.B. 2020. Vis-NIR spectroscopy: from leaf dry mass production estimate to the prediction of macro- and micronutrients in soybean crops. *Journal of Applied Remote Sensing*. 14(4):044505. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.044505>
 36. SALGADO-GARCÍA, S.; PALMA-LÓPEZ, D.J.; ZAVALA-CRUZ, J.; LAGUNES-ESPINOZA, L.DEL C.; CASTELÁN-ESTRADA, M.; ORTIZ-GARCÍA, C. F.; JUÁREZ-LÓPEZ, J.F.; RINCÓN-RAMÍREZ, J.; HERNÁNDEZ-NATAREN, E. 2008. Programa sustentable de fertilización para el ingenio Pujiltilic, Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*. 26(4):361-373.
 37. SANSECHAN, P.; PANDUANGNATE, L.; SAENGPRACHATANARUG, K.; WONGPICHET, S.; TAIRA, E.; POSOM, J. 2018. A portable near infrared spectrometer as a non-destructive tool for rapid screening of solid density stalk in a sugarcane breeding program. *Sensing and Bio-Sensing Research*. 20:34-40. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2018.07.001>
 38. SHENK, J.S.; WESTRERHAUS, M.O. 1991. Population definition, sample selection, and calibration procedures for near-infrared reflectance spectroscopy. *Crop Science*. 31:469-474. <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100020049x>
 39. SINGH, L.; MUTANGA, O.; MAFONGOYA, P.; PEERBHAY, K.; CROUS, J. 2022. Hyperspectral remote sensing for foliar nutrient detection in forestry: A near-infrared perspective. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 25:100676. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100676>
 40. STEIDLE NETO, A.J.; TOLEDO, J.V.; ZOLNIER, S.; LOPES, D.C.; PIRES, C.V.; DA SILVA, T.G.F. 2017. Prediction of mineral contents in sugarcane cultivated under saline conditions based on stalk scanning by Vis/NIR spectral reflectance. *Biosystems Engineering*. 156:17-26. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.003>
 41. ULISSI, V.; ANTONUCCI, F.; BENINCASA, P.; FARNESELLI, M.; TOSTI, G.; GUIDUCCI, M.; TEI, F.; COSTA, C.; PALLOTTINO, F.; PARI, L.; MENESATTI, P. 2011. Nitrogen concentration estimation in tomato leaves by VIS-NIR nondestructive spectroscopy. *Sensors*. 11(6):6411-6424. <https://doi.org/10.3390/s110606411>
 42. VOLVERÁS-MAMBUSCAY, B.; GONZÁLEZ-CHAVARRO, C.F.; HUERTAS, B.; KOPP-SANABRIA, E.; RAMÍREZ-DURÁN, J. 2020. Effect of the organic and mineral fertilizer on the performance of sugarcane yield in Nariño, Colombia. *Agronomy Mesoamerican*. 31(3):547-565. <https://doi.org/10.15517/AM.V31I3.37334>
 43. WILLIAMS, P. 2014. The RPD Statistic: A tutorial note. *NIR News*. 25(1):22-26. <https://doi.org/10.1255/nirn.1419>

44. WILLIAMS, P.C. 2001. Implementation of Near- Infrared Technology. En: Williams, P.C.; Norris, K. Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. 2nd edition. American Association of Cereal Chemists, Inc. Saint. Paul, Minesota, USA. p.146-169.

Calcium foliar fertilization and its effect on quality and shelf life in andean blackberry fruits (*Rubus glaucus* Benth.)

Fertilización foliar con calcio y su efecto sobre calidad y vida útil en frutos de mora (*Rubus glaucus* Benth.)

William Andrés Cardona^{1*}; María Cristina García-Muñoz²; Blanca Lucía Botina-Azain³; Clara Viviana Franco-Flórez⁴; Pablo Edgar Jiménez-Ortega⁵

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, Centro de investigación Tibaitatá. Mosquera - Cundinamarca, Colombia; e-mail: wcardona@agrosavia.co; mcgarcia@agrosavia.co; bbotina@agrosavia.co; cfranco@agrosavia.co; pjimenez@agrosavia.co
*corresponding author: wcardona@agrosavia.co

How to cite: Cardona, W.A.; García-Muñoz, M.C.; Botina-Azain, B.L.; Franco-Flórez, C.V.; Jiménez-Ortega, P.E. 2023. Calcium foliar fertilization and its effect on quality and shelf life in andean blackberry fruits (*Rubus glaucus* Benth.). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2083. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2083>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

Received: September 8, 2021 **Accepted:** April 10, 2023 **Edited by:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

ABSTRACT

Calcium is the third most crucial nutrient for andean blackberry; however, its absorption is limited in acid soils, and its low mobility in the plant decreases its effects on fruits. Therefore, the effect of foliar fertilizers with calcium on andean blackberry fruits was estimated. In three locations, experiments were established with five calcium sources (Ca chelate, CaB nitrate, Ca oxide, CaB and CaBZn gluconate) and a control without calcium, applied in three phenological stages and recording: weight, diameters, firmness, color, juice, pulp, pH, soluble solids, acidity, dehydration, and damage. Soil and tissue analysis was performed to identify the relationship between the plant's nutritional conditions and its fertilization response. For the statistical analysis were used mixed models, tests of means, and principal components. Foliar fertilization with chelate, nitrate, and calcium oxide in andean blackberry crops with thorns, in production, with pruning management, and in the phenological stages of flower bud, fruit set, and red fruit, is a viable alternative to improve firmness, weight, and diameter of the fruits. In contrast, the chemical and color parameters in andean blackberry fruits depend on the edaphoclimatic conditions of each zone. This fertilization should be considered as a complement in soils without acidity problems and with balanced cationic saturations.

Keywords: Dehydration; Fruit firmness; Fruit quality; Plant nutrition; Storage.

RESUMEN

El calcio es el tercer nutriente más importante para la mora; sin embargo, su absorción se ve limitada en suelos ácidos y su baja movilidad en planta disminuye su efecto en frutos. Por tanto, se estimó el efecto de fertilizantes foliares con calcio en frutos de mora. En tres localidades, se establecieron experimentos con cinco recursos de Ca (quelato de Ca, nitrato de CaB, óxido de Ca, KCaB y gluconato de CaBZn) y un control sin calcio, aplicados en tres etapas fenológicas y registrándose: peso, diámetros, firmeza, color, jugo, pulpa, pH, sólidos solubles, acidez, deshidratación y daños. Se realizó análisis de suelo y tejido, para identificar la relación entre las condiciones nutricionales de la planta y su respuesta a la fertilización. Para el análisis estadístico, se utilizaron modelos mixtos, pruebas de medias y componentes principales. La fertilización foliar con quelato, nitrato y óxido de calcio en cultivos de mora andina con espinas, en producción, con manejo de podas y en las etapas fenológicas de botón floral, cuajado y fruto rojo, es una alternativa viable para mejorar la firmeza, peso y diámetro de los frutos. En contraste, los parámetros químicos y de color en frutos de mora andina dependen de las condiciones edafoclimáticas propias de cada zona. Esta fertilización, se debe considerar como complemento en suelos sin problemas de acidez y con saturaciones catiónicas equilibradas.

Palabras clave: Deshidratación; Firmeza del fruto; Calidad del fruto; Nutrición vegetal; Almacenamiento.

INTRODUCTION

Andean blackberry is one of the most economically valuable fruits in Colombia, Ecuador, and Costa Rica. During 2019, Colombia's area harvested, and production was 16,669 ha and 169,751 t (Agronet, 2021). The departments of Cundinamarca and Santander cover 45% of the area planted with andean blackberry, with Cundinamarca being the department with the largest area and national production with 26% and 34%, respectively. However, andean blackberry fruits are highly perishable in postharvest. The foliar application of low mobility nutrients such as calcium could improve the cell wall structure and the tissue resistance to avoid their damage in postharvest and enhance their physicochemical properties (Paniagua *et al.* 2013; Aghdam *et al.* 2012).

Calcium is the third most crucial macronutrient in the andean blackberry crop, after nitrogen and potassium. Its insufficient levels are related to high aluminum saturation in the soil displacing potassium, calcium, and magnesium and reducing their availability (Cardona & Bolaños-Benavides, 2019). Adequate plant's nutrition is reflected in the fruit's productivity and quality, then, inadequate management of the edaphic fertilization causes antagonism between nutrients, for example, NH_4^+ , K^+ , and Mg^{+2} affect the plant entrance of Ca^{+2} , which as a secondary nutrient is the most influential in fruit yield and quality (Cardona & Bolaños-Benavides, 2019). The calcium application by the edaphic route in the andean blackberry crop in Colombia is made through different types of limes incorporated into the soil. Its absorption in the plant is done in an early stage of development.

Due to the structural conformation of the andean blackberry fruit, calcium plays a fundamental role oriented to the strengthening and improvement of disorders in the morphological, physical, and chemical characteristics since imbalance causes physiological alterations and shortens the shelf life (Gao *et al.* 2019). In this sense, firmness is one of the essential quality properties when determining a visually striking and healthy fruit. Using calcium in fruits allows strengthening the integrity of the tissues during the conservation time. It influences membrane permeability by activating specific enzymes since it is accumulated in the middle lamella and interacts with pectic acid to form calcium pectate, redistributing the cells in a more uniform conformation, increasing firmness, and giving resistance to the fruit against pathogens (Spann & Schumann, 2010). The high calcium absorption reduces the respiration rate, ethylene production, and the incidence of physiological disorders in fruits (Tyagi *et al.* 2017). Singh *et al.* (2007) found that the application of CaCl_2 and boron reduced albinism, gray mold, and firmness in strawberries.

The most relevant phenological stages of the andean blackberry crop for the application of calcium foliar, considering the accumulation of dry matter of the fruit, which reaches its maximum peak in the state of red fruit (Franco & Giraldo C., 2001), are:

Flower bud: a propitious moment for the association of calcium with the structures.

Fruit set: increases sugars, antioxidant capacity, and acquires color.
Development or red fruit: It acquires physiological maturity.

The national market for andean blackberry has different demand segments, namely: the industry of drinks and pulps; hotels, restaurants, coffee shops; and markets fresh. Likewise, the short shelf life of the andean blackberry due to its sugary nature, as well as the rapid dehydration of the fruit cause it ferments quickly, adding urgency to the andean blackberry sales by farmers; therefore, the improvement and study of the physical and chemical properties of andean blackberry fruits take on relevant importance (SIOC, 2021).

Based on the high demand for calcium presented by the andean blackberry plant and its low availability in soils, the purpose of this research was to evaluate the effect of calcium foliar applications in pre-harvest in three localities on physicochemical parameters and the shelf life for andean blackberry fruits.

MATERIALS AND METHODS

Selection of study sites. This research was carried out in the department of Cundinamarca, which represents 26 % of the andean blackberry production registered in Colombia during 2021. San Bernardo, Sylvania, and El Colegio's municipalities concentrate 8.1 % of production within this department. According to the General Study of Soils and Land Zoning of the department of Cundinamarca, soils are located within a mapping unit with Inceptisols and Andisols developed from mantles of ash volcanic on gravigenic clastic deposits. They are found in mountainous landscapes, of moderately broken relief, with slopes between 12 and 25% (IGAC, 2000). The farms had slopes greater than 15 %.

Crop selection. Andean blackberry crops with thorns (*Rubus glaucus* Benth.) were selected in the productive stage, previously doing pruning to promote flowering and have a uniform size of the plants.

Crop management. It was carried out mechanical weed management, sanitary pruning, and applications with NPK fertilizers in doses between 150 to 250 g/plant every two to three months. The only calcium application was with dolomite or agricultural lime at the transplantation time.

In this study, three factors were considered:

Moments of calcium foliar application. The applications were made when more than 50 % of the plants were in the respective phenological state according to each application (flower bud, fruit set, and red fruit for the first, second, and third calcium application, respectively).

Localities – Municipalities. Laurel alto – San Bernardo crops, located at 4°08'59" N and 74°23'22" W, at an altitude of 2,023 m, with 36 months, espalier system in vine system, and plant spacing of 2.5 m x 1.5 m. Agua Bonita – Sylvania crops, located at 4°25'47" N and 74°20'07" W, at an altitude of 2,172 m, with 24 months,

espalier system in single wire and plant spacing of 3 m x 3 m. El Carmelo – El Colegio crops, located at 4°32'08" N and 74°23'28" W, at an altitude of 2,106 m, with 24 months, espalier system in vine system, and plant spacing of 3 m x 2 m.

Applied products. Selection of five source and a untreated control: Treatment 1 (3 g l⁻¹ Chelate-Ca composed of 7 % N + 12 % CaO + chelate EDTA); Treatment 2 (5 g l⁻¹ Nitrate-CaB composed of 15.45 % N + 25.5 % CaO + 0.3 % B); Treatment 3 (5 cm³ Oxide-Ca composed of 21.4 % CaO); Treatment 4 (2 cm³ KCaB composed of 3.55 % K₂O + 5.6 % CaO + 1 % B); Treatment 5 (2 cm³ Gluconate-CaBZn composed of 14 % CaO + 3 % B + 3 % Zn + 7 % OC + chelate gluconate); and Treatment 6 (without-Ca). In all treatments, 0.5 cm³ l⁻¹ of a pH and hardness regulator was used with a concentration of 25 % organic carbon (OC) + 1 cm³ l⁻¹ of adherent with 1.5 % N + 3 % P₂O₅ + 19 % OC. The treatments were applied with a manual sprayer on both sides of the plant.

These factors were evaluated under a design of three completely randomized blocks, for a total of 18 experimental units (E.U.) in each location and ten plants / E.U.

Harvest. It was carried out two weeks after each application in every E.U. Two samples of 500 g of fruits were collected in a maturity stage four (MS4) under NTC 4106 (Icontec, 1997) and in PET (Polyethylene terephthalate) packaging for the individual evaluation of physicochemical parameters and shelf life.

Record of climatic variables. Information was downloaded from IDEAM pluviometric stations, installed at a linear distance <6 km from each location. The registration period was 2019, emphasizing the monthly accumulated precipitation between July and November (installation of experiments). Likewise, were recorded maximum and minimum temperatures. Between July and November, the lowest precipitation records were presented with 33.2, 32.9, and 28 % of the total annual precipitation for the municipalities of Sylvania with 796 mm, San Bernardo with 1,007 mm, and El Colegio with 1,350 mm, respectively. The low precipitation made it possible to reduce the loss of foliar fertilizers by "washing". Considering the isothermal condition of Colombia, average values of the maximum temperature of 25 °C and minimum of 15 °C were recorded, which are considered adequate for the andean blackberry cultivation (Castro-Retana & Cerdas-Araya, 2005).

The following parameters were recorded as response variables in each location:

Sample size. In each sampling and measuring physical parameters, five fruits/E.U. were harvested, and for chemicals, the juice was collected from a sample composed of 15 fruits/E.U.

Weight (g), using a Mettler PE 300 digital Scale (Ohio, USA) analytical balance **Polar and equatorial diameter** (mm) with a Mitutoyo digital 8 in Vernier caliper, reference 3416 (Mitutoyo, São Paulo, Brazil).

Color parameters were determined L, a*, and b* with a Konica Minolta CR-400 colorimeter (Minolta Camera Company, Osaka, Japan).

Fruit firmness (kg). It was determined by Chatillon TCD 200 texturometer (John Chatillon & Sons, Inc., NY, USA) applying compression tests at a point in the equatorial zone of the fruit with a 15 mm diameter plate plunger, and the force applied in a 20 kg x 0.01 kg cell at a constant speed of 60 mm/min until the fruit breaks.

Juice and pulp content (%). By manually macerating the samples of the fruits of each E.U., the juice was extracted, filtered (pulp content), and weighed (juice and pulp) on a Mettler PE 300 digital Scale analytical balance (Ohio, USA). Using this juice were determined pH, total soluble solids, and titratable acidity.

Total soluble solids (TSS), pH, and titratable acidity (TA). pH was determined with a Hanna Edge pH meter (Hanna instruments HI11310 scale 0-13 (Nuşfalău, Romania). TSS was determined with a Hanna HI96801 precision digital refractometer, 0-85 % (Hanna Instruments, Woonsocket, RI, USA). Titratable acidity was determined by potentiometric titration with sodium hydroxide (0.1 N) until reaching pH 8.2 (Monroy-Cárdenas *et al.* 2019).

Shelf life. The fruits were distributed in 500 g PET packages, weighed, and stored between 5 and 7 °C. For nine days, they were inspected and weighed twice per week to determine the weight loss due to dehydration, microbiological damage and/or other damages. If contaminated fruits were found, they were removed, and the remaining fruits were recorded and weighed.

Soil and plant tissue analysis. 1 kg of soil was taken in each location before establishing the experiments to determine nutrient concentrations, cation exchange capacity, Al, Na, pH, and electrical conductivity. To analyze the nutrients in plant tissue, a month after the last application 50 leaves/treatment samples were taken in each location, the analysis procedures were done under ISO/IEC 17025.

Statistical analysis. Generalized linear mixed models were used to estimate fixed effects and interactions and compare factor levels by Student's t statistics test. A p-value of 5 % was used concerning the control to select a reasonable model for each variable. Verification of the fit of each model and normality was evaluated using Pearson's residual distribution. The statistical analysis of the concentration of nutrients in plant tissue was performed by Dunnett's test (P ≤ 0.05) and principal component analysis (PCA). Analyzes were performed using SAS 9.4.

RESULTS AND DISCUSSION

Firmness. Triple interaction was found between evaluated factors, where the 1st application of chelate (T1) in El Carmelo and the 2nd application in Agua Bonita reduced fruits firmness. In contrast, the 3rd application in Laurel Alto produced an increase (Table 1). The use of compounds such as chelates can improve fruits' Ca⁺² fixation (Gárate & Bonilla, 2000). Di Miro *et al.* (2005) did not find variations in the fruit firmness of peach trees through calcium chelate foliar applications.

Table 1. Effect calcium foliar fertilization on firmness, weight, and diameters in andean blackberry fruits.

Location	Parameter	Application	Treatment (source)	Estimation*	Mean values/ Application**
El Colegio (El Carmelo)	Firmness (kgf)	1 st (flower bud)	T1 (Chelate-Ca)	- 0.30	1st : 6.3 – 7.7 2nd : 5.7 – 7.9 3rd : 4.8 – 8.5 1st and 2nd : 20.0 – 22.4 3rd : 19.7 – 23.0 1st : 26.4 – 28.4 2nd : 25.0 – 29.0 3rd : 22.5 – 28.5
		2 nd (fruit set)	T5 (Gluconate-CaBZn)	+ 0.25	
	Weight (g)	1 st and 2 nd	T2 (Nitrate-CaB)	+ 22% and + 20%	
		3 rd (red fruit)	T2 (Nitrate-CaB)	+ 77%	
		3 rd (red fruit)	T1 and T3	+ 43% and + 45%	
		3 rd (red fruit)	T4 (KCaB)	+ 28%	
	Equatorial diameter (mm)	1 st and 2 nd	T2 (Nitrate-CaB)	+ 7%	
		3 rd (red fruit)	T2 (Nitrate-CaB)	+ 16.5%	
		1 st (flower bud)	T5 (Gluconate-CaBZn)	+ 6%	
		3 rd (red fruit)	T1, T3 and T4	+ 8% and +11%	
	Polar diameter (mm)	2 nd and 3 rd	T2 (Nitrate-CaB)	+ 15% and +26%	
		3 rd (red fruit)	T1 (Chelate-Ca)	+ 16%	
		3 rd (red fruit)	T3 (Oxide-Ca)	+ 21%	
	Silvania (Agua Bonita)	Firmness (kgf)	1 st (flower bud)	T5 (Gluconate-CaBZn)	
2 nd (fruit set)			T1 and T5	- 0.26	
2 nd and 3 rd			T2 (Nitrate-CaB)	- 0.32 and -0.19	
2 nd (fruit set)			T3 (Oxide-Ca)	- 0.19	
Weight (g)		1 st (flower bud)	T1 and T3	- 33% and -41%	
		2 nd (fruit set)	T3 (Oxide-Ca)	+ 28%	
		2 nd (fruit set)	T5 (Gluconate-CaBZn)	+ 24%	
Equatorial diameter (mm)		1 st (flower bud)	T1 and T3	- 7% and -13%	
		2 nd and 3 rd	T3 (Oxide-Ca)	+ 8% and + 7%	
		2 nd (fruit set)	T5 (Gluconate-CaBZn)	+ 7%	
Polar diameter (mm)		1 st (flower bud)	T1 (Chelate-Ca)	- 19%	
		1 st (flower bud)	T3 (Oxide-Ca)	- 23%	
San Bernardo (Laurel alto)	Firmness (kgf)	3 rd (red fruit)	T1 (Chelate-Ca)	+ 0.22	
	Weight (g)	1 st and 2 nd	T2 (Nitrate-CaB)	- 22% and - 28%	
		2 nd (fruit set)	T1 (Chelate-Ca)	- 25%	
		2 nd (fruit set)	T3 (Oxide-Ca)	- 20%	
	Equatorial diameter (mm)	1 st (flower bud)	T2 (Nitrate-CaB)	- 6%	
		2 nd (fruit set)	T2 (Nitrate-CaB)	- 6%	
	Polar diameter (mm)	1 st (flower bud)	T1 (Chelate-Ca)	- 12%	
1 st (flower bud)		T2 (Nitrate-CaB)	- 18%		

*: increase or decrease with respect to the control fruits that did not receive fertilization (T6). **: Mean values obtained in each application.

Regarding the effect of gluconate (T5), the 1st application in Agua Bonita and the 2nd application in El Carmelo increased firmness (Figure 1). The firmness values recorded in this research are like those found by Aghdam *et al.* (2012), who determined a linear relationship between calcium applications and fruit firmness.

The greater firmness can be explained by the accumulation of Ca between the cell wall and the middle lamella, which contributes to the restructuring of the integrity of both structures (Romero-Gomezcaña *et al.* 2006).

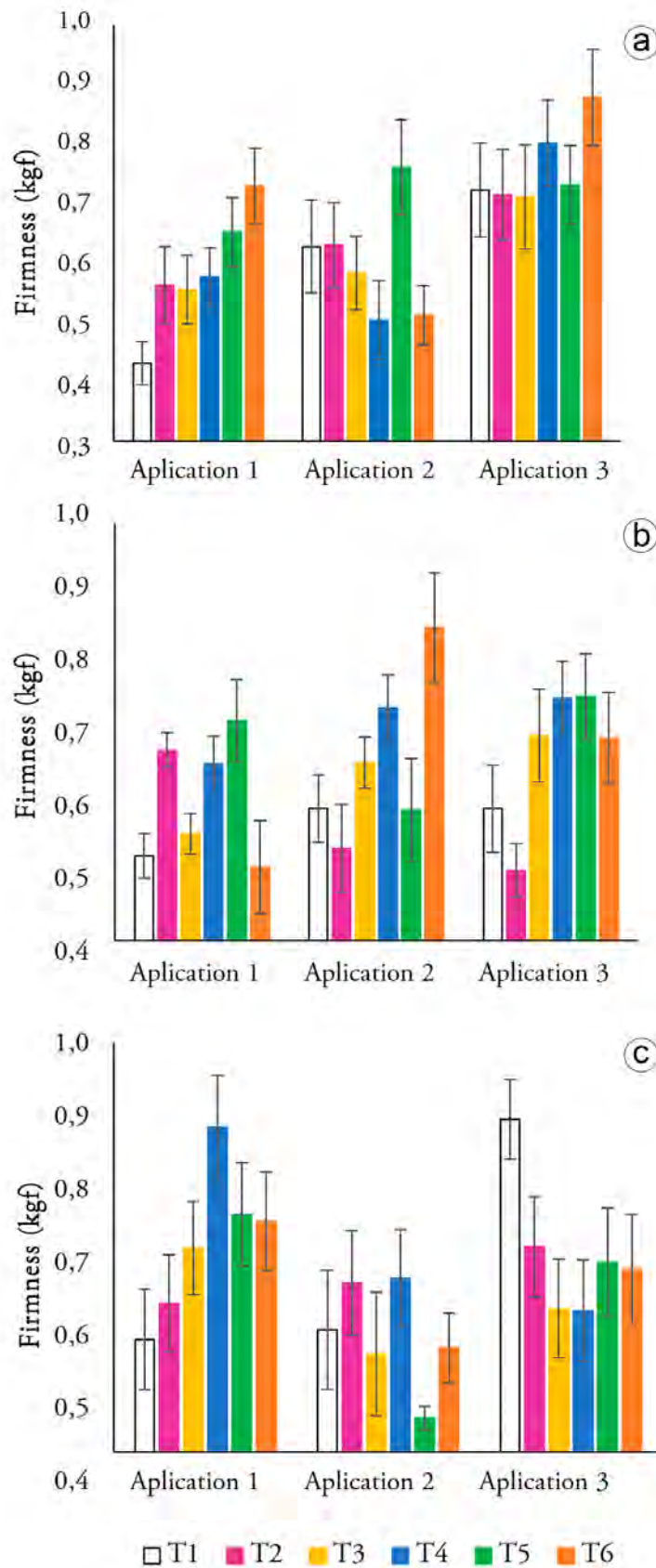


Figure 1. Effect of foliar applications of calcium on the firmness of andean blackberry fruits in the localities: a) El Carmelo; b) Agua bonita; c) Laurel alto. Values are averages (n = 15) ± standard error. T1: Chelate-Ca; T2: Nitrate-CaB; T3: Oxide-Ca; T4: KCaB; T5: Gluconate-CaBZn and T6: Without-Ca.

In general, the applications of chelate (T1) and nitrate (T2) in El Carmelo and Laurel Alto increased the firmness over time, while the oxide (T3) allowed an increase in El Carmelo and Agua Bonita (Figure 1). These three calcium salts would be fulfilling the function of firming agents, increasing the cell wall strength, as occurs in fruits and vegetables (Rincón-Pérez & Martínez-Quintero, 2015). The calcium contributions through the application periodically of fertilizer sources produce fruits with high firmness, allowing a greater manipulation and enduring longer transportation to new markets (Monroy-Cárdenas *et al.* 2019).

Fruit weight. The nitrate (T2) applications in El Carmelo allowed increases (Table 1). Likewise, the 3rd application of chelate (T1), oxide (T3), and KCaB (T4) produced increases ($P \leq 0.05$) (Table 1). In contrast, Di Miro *et al.* (2005) found that calcium chelate foliar applications did not produce variations in the fresh weight of peach fruits. The 1st application of T1 and T3 in Agua Bonita produced decreases ($P \leq 0.05$) (Table 1). Contrary to the 2nd application of oxide (T3) and gluconate (T5) that allowed increases ($P \leq 0.05$) (Table 1). Concerning Laurel alto, the 1st application with T2 showed a decrease ($P \leq 0.05$) (Table 1). Likewise, the 2nd application of T1, T2, and T3 caused reductions ($P \leq 0.05$) (Table 1). Yfran *et al.* (2017) did not find significant differences between the different foliar fertilization treatments with potassium, calcium, and boron (K+Ca+B) on the weight of 'Nova' mandarin fruits. In contrast, Cooman *et al.* (2005) mention that fruits gain greater weight by adding calcium.

Equatorial diameter. Applications of nitrate (T2) in El Carmelo allowed increases ($P \leq 0.05$) (Table 1). The 3rd application of chelate (T1), oxide (T3), and KCaB (T4) caused increases ($P \leq 0.05$) (Table 1). The increase in fruit length because of Ca foliar applications may be due to their functions in cell division, elongation, and permeability of cell membranes (Carpita & McCann, 2000). The 1st application of T3 in Agua Bonita caused reductions ($P \leq 0.05$), while the 2nd and 3rd application of T3 allowed increases ($P \leq 0.05$) (Table 1). The 1st and 2nd applications of T2 in Laurel alto caused decreases ($P \leq 0.05$) (Table 1). Yfran *et al.* (2017) did not find significant differences between different foliar fertilization treatments with K+Ca+B on the equatorial diameter of 'Nova' mandarin fruits.

Polar diameter. The 2nd and 3rd applications of nitrate (T2) in El Carmelo increased ($P \leq 0.05$) polar diameter (Table 1). After the 3rd application of chelate (T1) and oxide (T3), an increase was found ($P \leq 0.05$); in contrast to Agua Bonita, the 1st application of T1 y T3 produced decreases (Table 1). Carra *et al.* (2017) did not find a relationship between applied calcium and the diameter of pear fruits. For Laurel alto, the 1st application of T1 and T2 produced decreases ($P \leq 0.05$) (Table 1). The 2nd application of calcium sources decreased ($P \leq 0.05$) this parameter between 11 % and 18 %. Ayala Sánchez *et al.* (2013) recorded polar and equatorial diameter values of 27.29 ± 2.87 and 18.81 ± 1.63 mm; respectively, for andean blackberry fruits in MS4 and from crops located in Ibagué (Tolima, Colombia).

Parameter L. The 1st and 3rd applications of oxide (T3) and gluconate (T5) in El Carmelo decreased ($P \leq 0.05$) the luminosity (Table 2). The 2nd application of T5 increased it, while in Agua Bonita decreased it ($P \leq 0.05$) (Table 2). The 2nd and 3rd applications of nitrate (T2) in Agua Bonita and El Carmelo decreased ($P \leq 0.05$) this parameter (Table 2). In this regard, Romero-Gomezcaña *et al.* (2006) found that the application of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ produced mango fruits with a lower value of L. Likewise, the last two applications of chelate (T1) and KCaB (T4) reduced ($P \leq 0.05$) the luminosity (Table 2). In contrast, Di Miro *et al.* (2005) found that calcium chelate applications allowed higher L values in peach. Regarding Agua Bonita, fruits that received applications of T3 registered reductions (Table 2). About Laurel alto, the 1st and 2nd applications of T1 and T3 decreased ($P \leq 0.05$) the luminosity (Table 2).

Parameter a*. El Carmelo fruits that received the 2nd and 3rd applications of chelate (T1), nitrate (T2), and KCaB (T4) showed reductions (Table 2). Likewise, the 1st application of gluconate (T5) produced reductions, while in Agua Bonita, there was an increase (Table 2). However, with the 2nd application of T5 in Agua Bonita, this parameter was reduced ($P \leq 0.05$) (Table 2). On the other hand, the applications of T1 in Agua Bonita produced decreases ($P \leq 0.05$) (Table 2). The 1st and 3rd applications of T2 reduced this parameter ($P \leq 0.05$), and through the 2nd and 3rd applications of oxide (T3) and KCaB (T4), there were decreases ($P \leq 0.05$) (Table 2). In Laurel alto, the 2nd application of T1 and the 3rd of T2 caused decreases ($P \leq 0.05$) (Table 2).

Parameter b*. In the locality of El Carmelo, the 2nd application of gluconate (T5) allowed an increase ($P \leq 0.05$) (Table 2). In contrast, fruits that received the 2nd and 3rd applications of nitrate (T2) in El Carmelo and Agua Bonita showed decreases ($P \leq 0.05$) (Table 2). Likewise, with the 3rd application of oxide (T3), there were reductions ($P \leq 0.05$) in both localities (Table 2). The 2nd application of chelate (T1) and KCaB (T4) in Agua Bonita and El Carmelo decreased this parameter ($P \leq 0.05$) (Table 2). The 1st and 3rd applications of T3 in Laurel alto caused a reduction ($P \leq 0.05$) (Table 2). Calcium oxide applications allowed obtaining fruits with reddish to purple colorations of greater intensity, with more significant accumulation of pigments and anthocyanins, as stated by Fischer *et al.* (2018).

Juice. The 1st application of chelate (T1) in El Carmelo caused an increase ($P \leq 0.05$) (Table 2), in contrast to the first two applications of nitrate (T2) and oxide (T3) that led to reductions ($P \leq 0.05$) (Table 2). The 2nd application of KCaB (T4) also caused a decrease ($P \leq 0.05$) (Table 2). Concerning Agua Bonita, there was an increase ($P \leq 0.05$) through the 2nd application of T1 and T3 (Table 2). In Laurel alto, the 2nd application of nitrate (T2), oxide (T3), and KCaB (T4) caused increases ($P \leq 0.05$) (Table 2). Yfran *et al.* (2017) did not find significant differences by fertilization with K+Ca+B on mandarin juice; results like those found in this research.

Pulp. The first two applications of nitrate (T2) in El Carmelo increased it ($P \leq 0.05$) (Table 2). In contrast, the 1st application of chelate (T1) produced a decrease ($P \leq 0.05$) (Table 2). Regarding

Table 2. Effect calcium foliar fertilization on color parameters, juice, pulp, and chemical parameters in andean blackberry fruits.

Location	Parameter	Application	Treatment (source)	Estimation*	Mean values/ application**
El Colegio (El Carmelo)	L (units)	2 nd (fruit set)	T5 (Gluconate-CaBZn)	+ 4.2	1 st and 2 nd : 23 – 32 3 rd : 20 – 25
		1 st and 3 rd	T3 and T5	- 5 and - 6	
		2 nd and 3 rd	T1, T2, and T4	- 4 and - 5	
	a* (units)	2 nd and 3 rd	T1, T2, and T4	- 7 and - 9	1 st , 2 nd , and 3 rd : 16 – 29
		1 st and 3 rd	T5 (Gluconate-CaBZn)	- 5	
	b* (units)	2 nd (fruit set)	T5 (Gluconate-CaBZn)	+ 3	1 st and 3 rd : 3 – 8 2 nd : 6 – 16
		2 nd and 3 rd	T1, T2, and T4	- 3 and - 6	
		3 rd (red fruit)	T3 (Oxide-Ca)	- 6	
	Juice (%)	1 st (flower bud)	T1 (Chelate-Ca)	+ 9%	1 st : 27 – 47 2 nd : 20 – 37 3 rd : 31 – 37
		1 st and 2 nd	T2 and T3	- 9% and - 18%	
		2 nd (fruit set)	T4 (KCaB)	- 7,4%	
	Pulp (%)	1 st and 2 nd	T2 (Nitrate-CaB)	- 11.3% and - 8%	1 st : 43 – 59 2 nd and 3 rd : 53 – 65
1 st (flower bud)		T1 (Chelate-Ca)	- 18.7%		
TSS (%)	2 nd (fruit set)	T1 (Chelate-Ca)	- 1.2%	1 st and 2 nd : 5 – 7 3 rd : 7.0 – 7.6	
Acidity (%)	1 st (flower bud)	T1 and T4	- 0,8% and - 0,5%	1 st and 2 nd : 2.5 – 3.5 3 rd : 1.8 – 2.0	
Sylvania (Agua Bonita)	L (units)	1 st , 2 nd and 3 rd	T3 (Oxide-Ca)	- 2.9 and - 6.9	1 st and 3 rd : 19 – 24 2 nd : 23 – 32
		2 nd (fruit set)	T1, T4, and T5	- 6 and - 8	
		2 nd and 3 rd	T2 (Nitrate-CaB)	- 3 and - 4	
	a* (units)	1 st , 2 nd , and 3 rd	T1 (Chelate-Ca)	- 4.5 and -5.8	1 st : 10 – 21 2 nd : 19 – 26 3 rd : 16 – 22
		1 st and 3 rd	T2 (Nitrate-CaB)	- 6	
		2 nd and 3 rd	T3 and T4	- 4 and - 8	
		1 st and 2 nd	T5 (Gluconate-CaBZn)	+ 5 and - 5	
	b* (units)	2 nd (fruit set)	T1, T4, and T5	- 7.2 and - 9.5	1 st and 3 rd : 3 – 8 2 nd : 6 – 16
		2 nd and 3 rd	T2 (Nitrate-CaB)	- 4.9 and - 2.8	
		2 nd and 3 rd	T3 (Oxide-Ca)	- 7.2 and - 3.2	
	Juice (%)	2 nd (fruit set)	T1 and T3	+ 10.1 and + 9.9	1 st : 30 – 42 2 nd and 3 rd : 25 – 35
	Pulp (%)	2 nd (fruit set)	T1 and T3	- 6.9 and - 9.5	1 st , 2 nd , and 3 rd : 52 – 68
TSS (%)	2 nd (fruit set)	T4 (KCaB)	+ 1.2%	1 st , 2 nd , and 3 rd : 6.1 – 7.6	
Acidity (%)	2 nd (fruit set)	T2 and T4	+0.7% and +0.6%	1 st and 2 nd : 3.0 – 4.1 3 rd : 1.7 – 2.0	

Continuación tabla 2.

Location	Parameter	Application	Treatment (source)	Estimation*	Mean values/ application**
San Bernardo (Laurel alto)	L (units)	1 st (flower bud)	T1, T2, and T3	- 4 and - 4.9	1 st : 20 – 25
		2 nd (fruit set)	T1 and T3	- 2.9 and - 4.1	2 nd and 3 rd : 22 – 28
	a* (units)	2 nd (fruit set)	T1 (Chelate-Ca)	- 5.2	1 st : 14 – 18
		3 rd (red fruit)	T2 (Nitrate-CaB)	- 4.0	2 nd and 3 rd : 21 – 30
	b* (units)	1 st (flower bud)	T3 (Oxide-Ca)	- 3.1	1 st : 5 – 8
		2 nd (fruit set)	T1 and T3	- 3.6 and - 3.0	2 nd and 3 rd : 8 – 13
	Juice (%)	2 nd (fruit set)	T2, T3, and T4	+9.9% and +18.1	1 st : 36 – 41 2 nd : 29 – 47 3 rd : 33 – 37
	Pulp (%)	2 nd (fruit set)	T1, T2, T3, and T4	- 8% and -13%	1 st : 48 – 53 2 nd : 49 – 62 3 rd : 61 – 63
	Acidity (%)	1 st (flower bud)	T2 and T3	+1.4% and +1.2%	1 st : 1.8 – 3.3 2 nd : 3.0 – 3.5 3 rd : 1.6 – 1.9

*: increase or decrease with respect to the control fruits that did not receive fertilization (T6). **: Mean values obtained in each application

Agua Bonita, the 2nd application of chelate (T1) and oxide (T3) produced reductions ($P \leq 0.05$) (Table 2). In Laurel alto, the 2nd application of chelate (T1), nitrate (T2), oxide (T3), and KCaB (T4) produced reductions ($P \leq 0.05$) (Table 2).

TSS. El Carmelo fruits showed a decrease ($P \leq 0.05$) with the 2nd application of chelate (T1) (Table 2), which reported shallow values in the applications (6.1 to 6.7 °Brix). In Agua Bonita, there was an increase ($P \leq 0.05$) with the 2nd application of KCaB (T4) (Table 2). In Laurel alto, there were no significant differences. During the 1st application, TSS values were presented between 6.7 and 7.7 °Brix, and values between 7.5 and 8.3 °Brix for the 2nd and 3rd applications. TSS variations obtained in other locations can be attributed to the edaphoclimatic characteristics of each production site (temperature, relative humidity, solar radiation, cultivation practices, degree of soil fertility, among others), which affect the ability of plants to synthesize and translocate photoassimilates to fruits (Ali *et al.* 2011; Monroy-Cárdenas *et al.* 2019). Romero-Gomezcaña *et al.* (2006) by $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ foliar application found a significant increase of TSS mango. Yfran *et al.* (2017) found no differences between fertilization treatments with K+Ca+B in TSS mandarin. In the present investigation, the calcium chelate applications in El Carmelo produced the lowest TSS values in andean blackberry fruits, results like those reported by Di Miro *et al.* (2005) in peach fruits.

pH. Calcium applications in El Carmelo and Agua Bonita had no significant effect. In both localities, values between 2.4 and 3.0 units were presented. In the Laurel alto locality, the 1st application of nitrate (T2), oxide (T3), and gluconate (T5) produced reductions

($P \leq 0.05$) of 2.33, 2.30, and 0.47; respectively. The fruits recorded pH between 2.7 – 5.4, 2.8 – 2.9, and 2.5 – 2.7 units for the 1st, 2nd, and 3rd application. Andean blackberry fruits in MS4 present average 2.7 units (Ayala Sánchez *et al.* 2013).

Acidity. In locality El Carmelo, there were decreases ($P \leq 0.05$) with the 1st application of chelate (T1) and KCaB (T4) (Table 2). Calcium chelate applications decreased peach acidity (Di Miro *et al.* 2005). In locality Agua Bonita there were increases ($P \leq 0.05$) with the 2nd application of nitrate (T2) and KCaB (T4) (Table 2). Through the 1st application of nitrate (T2) and oxide (T3) in Laurel alto, there were increases ($P \leq 0.05$) (Table 2). Romero-Gomezcaña *et al.* (2006) by $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ applying found an increase in mango acidity. In general, 2.8 % and 3.2 % values have been reported for andean blackberry fruits in MS4 (Ayala Sánchez *et al.* 2013).

Fruit dehydration. The 1st application of chelate (T1) in El Colegio reduced ($P \leq 0.05$) dehydration between 4.3 % and 10.8 % on the 5th, 7th, and 9th storage days. This treatment allowed a decrease ($P \leq 0.05$) on day 7 of 3.6 % compared to the control evaluated on day 5 and a reduction ($P \leq 0.05$) on day 9 of 10.3 % compared to the control evaluated on day 7. The 1st application of nitrate (T2) reduced ($P \leq 0.05$) dehydration by 9.2 % and 8.9 % on days 7 and 9. This treatment allowed a decrease ($P \leq 0.05$) in dehydration on day 9 of 8.4 % compared to the control evaluated on day 7. The 1st application of oxide (T3) reduced ($P \leq 0.05$) dehydration by 3.7 %, 10.0 %, and 9.5 % on days 5, 7, and 9. This treatment allowed a decrease ($P \leq 0.05$) on day 9 of 8.9 % compared to the control on day 7. The 1st application of KCaB (T4) reduced ($P \leq 0.05$) dehydration by 7.3 % on days 7 and 9. Furthermore, this

treatment allowed a decrease ($P \leq 0.05$) on day 9 of 6.7 % compared to control on day 7. The 1st application of gluconate (T5) reduced ($P \leq 0.05$) dehydration by 3.2 %, 9.7 %, and 9.6 % on the 5th, 7th, and 9th storage days. Additionally, this treatment allowed a decrease ($P \leq 0.05$) on day 9 of 9.1 % compared to the control evaluated on day 7. The other applications did not generate a significant effect. In Agua Bonita, there were no significant differences, registering an average between 7.4 % to 9.3 % for the 1st application, 3.7 % to 4.8 % for the 2nd, and 3.6 % to 7.2 % for the 3rd. In this regard, Ayala Sánchez *et al.* (2013) in the samples evaluated of andean blackberry at 2 °C registered a progressive increase in weight loss due to transpiration; with 2 %, 3 %, 6 %, 8 %, and 9.6 % on the 2nd, 3rd, 4th, 5th, and 6th storage days; respectively. According to the authors, this high perishability is due to its high-water content, making it very susceptible and fragile to handling and the time that elapses after harvest. In Laurel alto, there were differences in fruits that received the 3rd application of T1, T2, and T3: T1 reduced ($P \leq 0.05$) dehydration by 4.0 % on day 7, T2 reduced it ($P \leq 0.05$) by 4.8 % and 5.1 % and T3 reduced it ($P \leq 0.05$) by 4.7 % and 4.5 % in the days 5 and 7, compared to the control. Romero-Gomezcaña *et al.* (2006) found that, after nine days, control fruits and those that received $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ presented similar weight losses.

Fruit damage. The 1st application of nitrate (T2) in El Colegio reduced ($P \leq 0.05$) the damage by 20 % on the 5th day concerning control fruits that presented 61 %. The 2nd application of chelate (T1), nitrate (T2), KCaB (T4), and gluconate (T5) allowed reductions ($P \leq 0.05$) on day 2 between 25.6 % and 42.0 % in relation to control fruits with 72.7 %. In contrast, the 3rd application of chelate (T1), oxide (T3), and gluconate (T5) generated increases

($P \leq 0.05$) in damage on the 5th day, with values between 27.4 % and 30.5 % for the control that registered 21.9 %. There were no significant differences for Agua Bonita; damage values were between 23 % to 47 % for the 2nd day, 26 % to 65 % for the 5th day and between 52 % to 88 % for the 7th day. Romero-Gomezcaña *et al.* (2006) found that, after nine days, control fruits and fruits that received $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ presented weight losses between 4.8 % to 5.9 %. In Laurel alto, an increase ($P \leq 0.05$) of 18.1 % of fruits damage that received T2 and evaluated on day 6 was presented after the 1st application, while the fruits that received T5 presented an increase ($P \leq 0.05$) of 27.3 % with respect to control fruits that registered damage of 41.5 %. After the 2nd application there were increases ($P \leq 0.05$) on the 2nd storage day in fruits that received T2, T3, and T5 with values between 47.1 % and 59.6 % to control fruits without damage. After the 3rd application, there were no significant differences. Di Miro *et al.* (2005) found that peach fruits from trees treated with calcium chelate had fewer fungal attacks after 11 storage days than control fruits.

Calcium is closely related to meristematic activity, influences the enzyme systems regulation, phytohormone activity, and increases tissue resistance to pathogens. It increases postharvest shelf life and nutritional quality (Paniagua *et al.* 2013; Aghdam *et al.* 2012).

Soil and plant tissue analysis. To identify the effect of calcium foliar fertilization in the nutrient contents of soil and plant, soil and plant tissue analyses were carried out in each locality. Table 3 shows variable fertility soils with low ECEC and contrasting aluminum and calcium contents. Regarding the concentration of macro and micronutrients in andean blackberry crops, there were no differences

Table 3. Analysis of soils cultivated with andean blackberry in the municipalities of Sylvania, San Bernardo, and El Colegio.

Parameter	Unity	Sylvania (Agua Bonita)	San Bernardo (Laurel alto)	El Colegio (El Carmelo)
pH	Dimensionless	5.03	5.43	5.04
Electric conductivity	dS m ⁻¹	0.21	0.22	-
Organic matter	g/100g	13.68	8.1	3.82
P	mg kg ⁻¹	6.98	32.21	41.32
S	mg kg ⁻¹	6.62	7.28	13.82
ECEC	cmol (+) kg ⁻¹	2.22	9.16	4.21
B	mg kg ⁻¹	0.21	0.24	0.62
Al	cmol (+) kg ⁻¹	1.03	1.03	-
Al	cmol (+) kg ⁻¹	0.83	0.82	0.56
Ca	cmol (+) kg ⁻¹	0.75	5.75	2.14
Mg	cmol (+) kg ⁻¹	0.22	1.73	0.44
K	cmol (+) kg ⁻¹	0.17	0.55	0.96
Na	cmol (+) kg ⁻¹	<0.05	<0.14	0.12
Fe	mg kg ⁻¹	254.33	168.77	30.25
Cu	mg kg ⁻¹	2.27	<1.00	0.51
Mn	mg kg ⁻¹	1.43	11.69	6.48
Zn	mg kg ⁻¹	1.67	4.34	3.14

according to Dunnett's test ($P \leq 0.05$), where crops from Laurel alto (San Bernardo) and Agua Bonita (Silvania) localities presented N and P high contents, K, Ca, S, Mn, and Zn normal contents; and magnesium and copper low contents (Da Silva *et al.* 2004). Using PCA, three components explained 73.6 % of the variability. In component 1, P and Mg were grouped and negatively related to micronutrients. In component 2, Ca and S were grouped and negatively related to foliar K. However, considering the antagonistic relationship between Ca with Mg and P and the high correlation presented in PC 1, Ca was reassigned to this component. Variable fertility (Table 3) coincides with the differential response of the calcium foliar applications between localities, presenting a greater effect in crops without acidity problems and adequate calcium saturation, and where foliar calcium fertilization is complementary and not supplementary. Regarding the relationships between Ca and Mg with potassium (data not shown), a cationic imbalance was found that did not favor the latter's availability, results that contrast with the low and adequate cationic relationships presented in Cundinamarca soils (Cardona & Bolaños-Benavides, 2019). The above makes it necessary for the andean blackberry producer to reinforce the supply of K by edaphic route to optimize the plant response to foliar fertilization. The soil organic matter content low of El Carmelo with respect to Laurel alto and Agua Bonita contents (Table 3) could increase the plant response to foliar fertilization (Jantalia & Halvorson, 2011). CaBZn gluconate applications allowed increases of 11.6 % in plant tissue Ca concentration of andean blackberry crop by Agua Bonita (1.54 %) and did not affect the Laurel alto macronutrient concentration. Calcium chelate applications increased the macronutrient foliar concentration (except K), highlighting a 22.1 % calcium increase from the crop in El Carmelo (0.95 %). Ca chelate applications in El Carmelo made it possible to obtain sufficiency levels like those of the other localities. The macro and micronutrient concentrations in andean blackberry crops did not present significant differences, like those reported by Cardona & Bolaños-Benavides (2019). In contrast, calcium applications in pomegranate, kiwi, and apple trees increased the concentration of this nutrient in leaves, compared to control trees (Davaranah *et al.* 2018; Koutinas *et al.* 2010), K decreased in apple trees (Danner *et al.* 2015) and did not generate significant effects on N, P, K, and Mg in grape and kiwi (Bonomelli & Ruiz, 2010; Koutinas *et al.* 2010).

Calcium foliar fertilization in the andean blackberry crops with thorns is a viable alternative to improve fruit firmness, weight, and diameters. In contrast, chemical and color parameters in andean blackberry fruits could depend on the edaphoclimatic conditions inherent in each zone, which weren't evaluated in the current research. This fertilization should be considered as a complement in soils without acidity problems and with balanced cationic saturations.

There are calcium sources with different levels of efficiency and effect at the local level and according to the nutritional status of the andean blackberry crop, and based on the results obtained in this research, the application in commercial doses of chelate, nitrate, and calcium oxide is recommended in crops in production with pruning management and in the phenological stages of flower bud, fruit set, and red fruit.

During storage, El Colegio and Laurel alto fruits which received calcium during flower bud and fruit set, showed less weight loss due to transpiration. Regarding the effect of calcium on the appearance of damage, there was a decrease in El Colegio, a null effect in Agua Bonita, and an increase in Laurel alto.

Conflicts of interest: The manuscript was prepared and reviewed with the participation of all the authors, who declare that no conflict of interest puts the validity of the results presented at risk.

Authors contribution: William Andrés Cardona, Blanca Lucía Botina Azain y Clara Viviana Franco Flórez curated and analyzed the data for writing the draft of the manuscript. Research and resource management in the field by William Andrés Cardona, María Cristina García Muñoz, Blanca Lucía Botina Azain y Pablo Edgar Jiménez Ortega. María Cristina García Muñoz led the contextualization and methodology of the work. All authors participated in writing, reviewing, and editing the manuscript. **Funding:** This study was funded by the Universidad de los Andes, the Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA and the Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia.

REFERENCES

1. AGHDAM, M.S.; HASSANPOURAGHDAM, M.B.; PALIYATH, G.; FARMANI, B. 2012. The language of calcium in postharvest life of fruits, vegetables, and flowers. *Scientia Horticulturae*. 144:102-115. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.07.007>
2. AGRONET. 2021. Mora. Evaluaciones agropecuarias municipales. Available from Internet in: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
3. ALI, L.; SVENSSON, B.; ALSANIUS, B.W.; OLSSON, M.E. 2011. Late season harvest and storage of Rubus berries- Major antioxidant and sugar levels. *Scientia Horticulturae*. 129(3):376-381. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.047>
4. AYALA SÁNCHEZ, S.L.; VALENZUELA-REAL, C.P.; BOHÓRQUEZ-PÉREZ, Y. 2013. Variables determinantes de la madurez comercial en la mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.). *Scientia Agroalimentaria* (Colombia). 1:39-44.
5. BONOMELLI, C.; RUIZ, R. 2010. Effects of foliar and soil calcium application on yield and quality of table grape cv. 'Thompson seedless'. *Journal of Plant Nutrition*. 33(3):299-314. <https://doi.org/10.1080/01904160903470364>
6. CARDONA, W.A.; BOLAÑOS-BENAVIDES, M.M. 2019. Manual de nutrición del cultivo de mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.) bajo un esquema de buenas prácticas en fertilización integrada. Ed. Agrosavia (Colombia). 92p. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual-18>
7. CARPITA, N.; MCCANN, M. 2000. The cell wall. In: Buchanan, B.; Gruissem, W.; Jones, R.L. (Eds.). *Biochemistry*








- and molecular biology of plants. 1 Ed. American Society of Plant Physiologists. p.52-108.
8. CARRA, B.; SPAGNOL, D.; SOZO DE ABREU, E.; PASA, M. DA S.; PEREIRA DA SILVA, C.; HELLWIG, C.G.; FACHINELLO, J.C. 2017. Prohexadione calcium reduces vegetative growth and increases fruit set of 'Smith' pear trees, in Southern Brazil. *Bragantia*. 76(3):360-371. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.298>
 9. CASTRO-RETANA, J.J.; CERDAS-ARAYA, M. DEL M. 2005. Mora (*Rubus* spp.) cultivo y manejo poscosecha. Ministerio de Agricultura y Ganadería; Universidad de Costa Rica; Consejo Nacional de Producción. 95p.
 10. COOMAN, A.; TORRES, C.; FISCHER, G. 2005. Determinación de las causas del rajado del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) bajo cubierta. II. Efecto de la oferta de calcio, boro y cobre. *Agronomía Colombiana*. 23(1):74-82.
 11. DA SILVA, L.S.; GATIBONI, L.C.; ANGHINONI, I.; DE SOUSA, R.O. 2004. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Sociedade Brasileira Da Ciência Do Solo. 376p.
 12. DANNER, M.A.; SCARIOTTO, S.; CITADIN, I.; PENSO, G.A.; CASSOL, L.C. 2015. Calcium sources applied to soil can replace leaf application in 'Fuji' apple tree. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 45(3):266-273. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v45i3a457>
 13. DAVARPANAH, S.; TEHRANIFAR, A.; ABADÍA, J.; VAL, J.; DAVARYNEJAD, G.; ARAN, M.; KHORASSANID, R. 2018. Foliar calcium fertilization reduces fruit cracking in pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani). *Scientia Horticulturae*. 230:86-91. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.11.023>
 14. DI MIRO, M.; COVATTA, F.; HOLOVESKI, S.; BOQUETE, J.; PICALLO, A. 2005. Aplicación de quelato de calcio durante el desarrollo del fruto de duraznero. *Revista Facultad de Agronomía UBA (Argentina)*. 25(1):1-6.
 15. FISCHER, G.; LÓPEZ-VALENCIA, D.; SÁNCHEZ-GÓMEZ, M.; ACUÑA-CAITA, J.F. 2018. Propiedades físico-químicas de siete variedades destacadas de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivadas en Cundinamarca (Colombia), durante su maduración. *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*. 19(1):147-162. https://doi.org/10.21930/rcta.vol19_num1_art:528
 16. FRANCO, G.; GIRALDO C., M.J. 2001. El cultivo de la mora. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Manizales, Colombia. 86p.
 17. GAO, Q.; XIONG, T.; LI, X.; CHEN, W.; ZHU, X. 2019. Calcium and calcium sensors in fruit development and ripening. *Scientia Horticulturae*. 253:412-421. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.069>
 18. GÁRATE, A.; BONILLA, I. 2000. Capítulo 8: Nutrición Mineral y Producción Vegetal In: Azcón-Bieto, J.; Talón, M. (eds). *Fundamentos de la Fisiología Vegetal*. Universidad de Barcelona; McGraw-Hill Interamericana. p.113-130.
 19. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 2000. Estudio General de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca 1:100.000. IGAC. Subdirección de Agrología. Bogotá. 457p.
 20. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC. 1997. Norma Técnica Colombiana NTC 4106. Frutas frescas. Mora de castilla. Especificaciones. ICONTEC. (Colombia). 17p.
 21. JANTALIA, C.P.; HALVORSON, A.D. 2011. Nitrogen fertilizer effects on irrigated conventional tillage corn yields and soil carbon and nitrogen pools. *Agronomy Journal*. 103: 871-878.
 22. KOUTINAS, N.; SOTIROPOULOS, T.; PETRIDIS, A.; ALMALIOTIS, D.; DELIGEORGIS, E.; THERIOS, I.; VOULGARAKIS, N. 2010. Effects of preharvest calcium foliar sprays on several fruit quality attributes and nutritional status of the kiwifruit cultivar Tsechelidis. *HortScience*. 45(6):984-987. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.6.984>
 23. MONROY-CÁRDENAS, D.M.; CARDONA, W.A.; GARCÍA MUÑOZ, M.G.; BOLAÑOS BENAVIDES, M.M. 2019. Relationship between variable doses of N, P, K and Ca and the physicochemical and proximal characteristics of andean blackberry (*Rubus glaucus* Benth.). *Scientia Horticulturae*. 256:108528. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.055>
 24. PANIAGUA, A.C.; EAST, A.R.; HINDMARSH, J.P.; HEYES, J.A. 2013. Moisture loss is the major cause of firmness change during postharvest storage of blueberry. *Postharvest Biology and Technology*. 79:13-19. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.12.016>
 25. RINCÓN-PÉREZ, A.; MARTÍNEZ-QUINTERO, E. 2015. Funciones del calcio en la calidad poscosecha de frutas y hortalizas: una revisión. *Revista Alimentos Hoy*. 24(34):13-25.
 26. ROMERO-GOMEZCAÑA, N.R.; SAUCEDO-VELOZ, C.; SÁNCHEZ-GARCÍA, P.; RODRÍGUEZ-ALCÁZAR, J.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, V.M.; RODRÍGUEZ-MENDOZA, M.N.; BÁEZ-SAÑUDO, R. 2006. Aplicación foliar de Ca(NO₃)₂: fisiología y calidad de frutos de mango 'Haden'. *Terra Latinoamericana (México)*. 24(4):521-527.
 27. SINGH, R.; SHARMA, R.R.; TYAGI, S.K. 2007. Pre-harvest foliar application of calcium and boron influences physiological disorders, fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.). *Scientia Horticulturae*. 112(2):215-220. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.019>

28. SISTEMA DE INFORMACIÓN DE GESTIÓN Y DESEMPEÑO DE ORGANIZACIONES DE CADENAS, SIOC. 2021. Cadena Productiva de la Mora. Available from Internet in: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Mora/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
29. SPANN, T.M.; SCHUMANN, A.W. 2010. Mineral nutrition contributes to plant disease and pest resistance: HS1181/HS1181, 7/2010". EDIS. 2010(4). <https://doi.org/10.32473/edis-hs1181-2010>
30. TYAGI, S.; SAHAY, S.; IMRAN, M.; RASHMI, K.; MAHESH, S.S. 2017. Pre-harvest factors influencing the postharvest quality of fruits: a review. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 23(4):1-12. <https://doi.org/10.9734/CJAST/2017/32909>
31. YFRAN, M. DE LAS M.; CHABBAL, M.D.; PÍCCOLI, A.B.; GIMÉNEZ, L.I.; RODRÍGUEZ, V.A.; MARTÍNEZ, G.C. 2017. Fertilización foliar con potasio, calcio y boro. incidencia sobre la nutrición y calidad de frutos en mandarina 'Nova'. *Cultivos Tropicales (Cuba)*. 38(4):22-29.



Integrated processing methodology to identify the spatial variability of accumulated infiltration for agricultural soil

Metodología de procesamiento integrado para identificar la variabilidad espacial de la infiltración acumulada en suelos agrícolas

Helber Milton Orjuela-Matta^{1*} ; Danny Wilson Sanjuanelo-Corredor¹ ; Jonathan Vásquez-Lizcano² 
Katherin Cubides-Posada¹ ; Julián Francisco Rodríguez-Tibaquirá¹ ; Juan Carlos Torres-Rodríguez¹ 
Heiner Alfonso Ramírez-Poveda¹ 

¹Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Programa de Ingeniería Agronómica. Bogotá D.C., Colombia; e-mail: horjuela@udca.edu.co; dsanjuanelo@udca.edu.co; kacupo04@gmail.com; julians527@hotmail.com; juan.catorres@udca.edu.co; heiramirez@udca.edu.co

²Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, Centro de Investigación Caribia. Santa Marta – Magdalena, Colombia. jvasquezl@agrosavia.co

*Corresponding author: horjuela@udca.edu.co

How to cite: Orjuela-Matta, H.M.; Sanjuanelo-Corredor, D.W.; Vásquez-Lizcano, J.; Cubides-Posada, K.; Rodríguez-Tibaquirá, J.F.; Torres-Rodríguez, J.C.; Ramírez-Poveda, H.A. 2023. Integrated processing methodology to identify the spatial variability of accumulated infiltration for agricultural soil. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2365. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2365>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

Received: July 27, 2022

Accepted: May 31, 2023

Edited by: Helber Adrián Arévalo Maldonado

ABSTRACT

The infiltration of water in the soil, and its variation in space, is essential to establish the irrigation schedule for crops and to evaluate the possible degrading effects on the soil. The objective was to develop an integrated processing methodology in Rstudio to identify the spatial variability of the accumulated infiltration, in two phases related to pea crops. Field sampling was carried out on a rectangular mesh with 48 points per moment, using double infiltrometer rings. The data were evaluated by means of geostatistical tools adjusted with programming code in Rstudio, defining the relationships between the magnitudes of the accumulated infiltration, for different test instants, without the need to make statistical adjustments to the normality of variables, discriminated over a period between 1 and 80 minutes. The results suggest the existence of spatial variability of the accumulated infiltration in the two evaluated phases, considering that most of the analyzed data were adjusted to multiple variance models, maintaining a degree of spatial dependence, and validating the effectiveness of the adjusted methodology developed and implemented. The spatial relationships were corroborated by means of contour maps, where the spatial variation of the accumulated infiltration between the two identified cultivation moments was observed. The reliability of

the interpolation by the Ordinary Kriging method was verified by generating variance maps, establishing the degree of homogeneity of the interpolation. The variability of infiltration confirms the validity of the adjusted methodology implemented.

Keywords: Accumulated infiltration; Geostatistics; Infiltrometer rings; Spatial dependence; Variogram.

RESUMEN

La infiltración del agua en el suelo y su variación espacial es fundamental para establecer la programación de riego en los cultivos y evaluar los posibles efectos degradativos en el suelo. El objetivo fue desarrollar una metodología de procesamiento integrado en Rstudio, para identificar la variabilidad espacial de la infiltración acumulada, en dos fases para un cultivo de arveja. El muestreo de campo se adelantó sobre una malla rectangular georreferenciada con 48 puntos, por cada momento, utilizando anillos infiltrómetros dobles. Los datos fueron evaluados por medio de herramientas geoestadísticas, ajustadas con código de programación en Rstudio, definiendo las relaciones entre las magnitudes de la infiltración acumulada, para diferentes instantes de prueba, sin la necesidad de realizar ajustes estadísticos de normalidad de variables, discriminados

en un periodo entre 1 y 80 minutos. Los resultados sugieren la existencia de variabilidad espacial de la infiltración acumulada en las dos fases evaluadas, considerando que, la mayoría de los datos analizados, se ajustaron a múltiples modelos de semivarianza, manteniendo grados de dependencia espacial, particularmente, respecto al máximo valor acumulado de infiltración, validando la eficacia de la metodología ajustada. Las relaciones espaciales fueron corroboradas con mapas de contorno, en donde se observó la variación espacial de la infiltración acumulada entre los momentos de cultivo identificados. La confiabilidad de la interpolación por el método Kriging ordinario, se verificó mediante la generación mapas de varianza, estableciendo el grado de homogeneidad de la interpolación. La variabilidad de la infiltración confirma la validez de la metodología ajustada implementada.

Palabras clave: Anillos infiltrómetros; Dependencia espacial; Geoestadística; Infiltración acumulada; Semivariograma.

INTRODUCTION

The need to satisfy a growing demand for food is substantially related to the management of water and soil resources, compared to the phenological behavior of crops, often ignoring the particularities of the terrain (Da Silva Martins *et al.* 2010). An efficient distribution of water, seen from the design and operation of an irrigation system, depends fundamentally on the infiltration capacity, considering also that there is the heterogeneity of the physical properties of soils, which generate zones of non-uniform and variable infiltration speed in space (Novak *et al.* 2000), affecting the efficiency of the irrigation water distribution rate (Machiwal *et al.* 2006), over an area, according to the development of agricultural work, within the period marked by each crop cycle. When these speeds promote rapid saturation of the soil pores, water flows are formed as surface runoff, with such intensity and duration that they can trigger degradation processes in the soil (Da Silva Martins *et al.* 2010). The infiltration capacity depends on the changes in the different physical properties of the soils, such as organic matter content, porosity, apparent density, and real density, where low humidity levels suggest high infiltration rates in the first moments in which the movement of water in the soil occurs, with decreasing modifications as the empty pores of the soil become saturated with water over time (Liu *et al.* 2011).

The spatial and temporal variation of infiltration in agricultural areas under irrigation or with irrigation potential has been evaluated by different researchers, as suggested by Jaynes & Hunsaker (1989), Camacho-Tamayo *et al.* (2013) y Cortes-D. *et al.* (2018), defining spatial changes in infiltration as a function of variations in soil moisture content (Guzmán-Rojo *et al.* 2019; Gebler *et al.* 2015), above all, due to changes in the soil matrix potential, a highly relevant variable in irrigation programming (Orjuela-Matta *et al.* 2011), and in general, by hydro-physical and physical-mechanical attributes, which lead to localized planning and management by the specific site (Cortés-D. *et al.* 2016; Medina *et al.* 2012), in agricultural soils with crop rotations and variable phenology.

One of the most usual techniques to evaluate infiltration, for irrigation purposes under the management methodology by a specific site, to identify regions with similar characteristics (Moshia *et al.* 2014), is Geostatistics, a tool that allows for determining Spatial-temporal distribution models (Varón-Ramírez *et al.* 2018; Alesso *et al.* 2020), and its relationship with physical, hydrodynamic and physical-mechanical parameters of the soil, evaluated on a georeferenced sampling grid or mesh (Rodríguez-Vásquez *et al.* 2008).

The objective of this study was to develop an integrated methodology for geostatistical processing in Rstudio from infiltration sheet data, obtained using double infiltrometer rings for different test periods, generated at two moments of the crop cycle, related to the germination and harvest season, from a pea crop, located in the Bogotá Savanna, Colombia.

MATERIALS AND METHODS

The research was developed in the rural area of the municipality of Tenjo (4°48' 14.9" N, 74°10'23.7" W), Cundinamarca, Colombia. The area has a warm and temperate climate, according to the Köppen-Geiger classification (Peel *et al.* 2007), and a Cold Humid climate, according to the Caldas-Lang model (IGAC, 2011). The average altitude of the region is estimated at 2.580 meters, with an average temperature of 12.5 °C, relative humidity between 74 and 86 %, and an average annual rainfall of 765 mm (Parracoronado *et al.* 2018). The predominant soil corresponds to the Inceptisol series, particularly *Fluventic Eutrodepts*, followed by *Typic Dystrudepts*, with thick loam and fine loam families, respectively, which present flat slopes, with a gradient ranging between 1 and 3 %, and texture class silty loam to loam (IGAC, 2011).

For data collection, infiltration tests were defined in two periods called Phase I and II, which are related to the germination phase (15 days after the sowing) and harvest phase (15 days before harvest) with a duration of 80 minutes per test, using double infiltrometer rings, with dimensions of 0.2 m and 0.4 m in internal and external diameter, respectively, and a height of 0.4 m, on a total of 48 points, distributed perpendicularly, on a rectangular mesh of 20 x 20 m (De Lima *et al.* 2015), until covering an area of 1.6 ha, on which a pea crop was arranged. This methodology starts from an existing geostatistical process but with modifications in the processing stages because it takes the data with integration to a unique tool (Rstudio) to calculate and develop contour maps for analyzing variables without making adjusting data to normal distribution. The purpose was to prove the degree of accuracy of the methodology through the process in the tool and validate the adjusted methodology developed for each variable. The validation included the generation of contour maps and variance maps to establish the distribution of the spatial variability, and the homogeneity of the spatial variance by analyzed variable.

The data obtained allowed evaluation of the accumulated infiltration, defined for different moments: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80 minutes, guaranteeing the Obtaining 15 infiltration sheet data per node and per phase, covering as a reference, two key stages within the crop cycle, these are germination and harvest.

First, the infiltration data were organized in a data matrix, making initial adjustments to empirical infiltration models such as Kostiaikov, Kostiaikov-Lewis, and Philip as it is mentioned by (Orjuela-Matta *et al.* 2012; Rodríguez-Vásquez *et al.* 2008; Fasinmirin *et al.* 2018). After that, it proceeded to organize the instantaneous values of infiltration per node corresponding to each period evaluated. These input data were organized in independent arrays, generating files for the development of geospatial analyses for each of the 15 data obtained in each of the study phases. For each data matrix associated with each instant of infiltration time, the spatial dependence was determined, based on what was defined in the theory of regionalized variables, initially constructing the experimental variograms, according to the following expression:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Where $\gamma(h)$, represents the experimental variogram, $z(x_i)$ is the value of the variable at site x , $z(x_i+h)$ is another sample value separated by a distance h , and N is the number of pairs separated by a distance h (Hossain Bhuiyan *et al.* 2016).

The experimental values was adjusted to a theoretical variance model, with the purpose of estimating the coefficients without defining a fit to a normal distribution with the de purpose of establishing the spatial variation of the data captured in the field: Nugget Effect (C_0), Sill (C_0+C), and Range (a). The Sill is a value of the variance that gives stability to the model, while the Range is the limit distance for which there is a constant correlation (Orjuela-Matta *et al.* 2012). In the cases in which the Nugget Effect occurs, this is an indicator of the discontinuity between the samples or spatial variability that has not been detected within the sampling process (Cucunubá-Melo *et al.* 2011).

The Rstudio and R tool were used to process de initial data but with a programming code, with which data previously processed in GIS tools (QGIS v. 2.18.28) is loaded using files with “.shp” (shape) extension, distinguishing the lot through polygons and the sampling sites as points. This part is essential because spatial modeling in Rstudio needs to define an “around area” to construct the interpolation process with the collecting data. This process is realized per each variable considered in the study.

After that, in Rstudio the collected data loaded as “shape files” are processed to generate the experimental variograms, defining a processing code to establish different parameters to generate theoretical variograms. The adjustment of the experimental variograms to the theoretical ones was developed by visual methods, for which the software tool used Rstudio v. 2022.07.1 (RStudio Team, 2022), which operates as an interface to the R v tool. 4.1.3 (R Core Team, 2021), offers the possibility of executing different theoretical variance models, allowing the manual modification of the parameters (*Range, nugget effect, and sill*), to ensure minimum interpolation variances, based on the results generated and identified in the experimental variograms. The R software tool,

especially the Rstudio interface, has 17 variance models in its library, which were fully tested with each of the 15 data samples for each node and study phase. As an example, the equation of the theoretical Gaussian variance model is presented, where the spatial dependence vanishes when the distance (range) tends to infinity (Cucunubá-Melo *et al.* 2011):

$$y(h) = C_0 + C \left(1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right)$$

With the degree of spatial dependence parameter (DSD), estimated from the relationship between the sill and the nugget effect ($C/(C_0+C)$), the dependence of the accumulated infiltration for each evaluated instant was established, classifying it as strong, when $DSD > 75\%$, moderate for DSD between 25% and 75% , and weak, if $DSD < 25\%$ (Cortés-D. *et al.* 2018). If the degree of spatial dependence is close to zero, it is said that the experimental variogram detects a nugget effect, evidencing randomness in the spatial distribution of the variable (Haghighi-Fashi *et al.* 2014).

After evaluating the degree of spatial dependence, and once the theoretical variogram with the best-adjusted fit per parameter was selected, with the R software through Rstudio, the Ordinary Kriging technique was implemented, with the purpose of generating the contour maps, for the 15 data arranged on each of the 48 georeferenced nodes, for each evaluation phase (moment). In addition, Kriging variance maps were generated for the same number of data, with the purpose of evaluating the reliability and degree of adjustment in the spatial interpolation.

RESULTS AND DISCUSSION

The maximum Euclidean sampling distance considered for the analysis of the variograms was 85 m, although, during the construction of the theoretical variograms, a range between 32.0 and 85.0 m was estimated for the increasing instants of infiltration (1 to 5 min), while for the period of infiltration recession (10 to 80 min), distances between 32.0 and 80.0 m were examined, in Phases I and II, verifying the degree of adjustment of the theoretical variograms to the experimental ones by means of the visual method, with the ease offered by the R software, of “running” specific lines of code, allowing the individual graphic visualization of the degree of adjustment by variable, the Gaussian being the predominant variogram model (Haghighi-Fashi *et al.* 2014), followed by the Bessel model. The Kriging interpolation model (Figure 1), by variable, was evaluated using the cross-validation coefficient (CVC) (Faraco *et al.* 2008), and also generated the variance of the interpolation (Figure 2), verifying the variogram with the highest degree of adjustment (Figure 3) for the elaboration of the contour maps of the accumulated infiltration (Figure 4).

The results suggest that the DSD is in a weak to moderate classification for the first 5 minutes of the infiltration test, in phase I (Table 1), while for the remaining 70 minutes, DSD (Grade of Spatial Dependence) is mostly preserved in the moderate to strong categories (Table 2). The foregoing suggests that the degree of spatial dependence of the hydro-physical parameter (i) increases,

to the extent that saturation of the soil pore space occurs, as a consequence of the increase in accumulated infiltration, in a specific

period, demonstrating a direct relationship between the time of the test and the degree of spatial dependence of the infiltration.

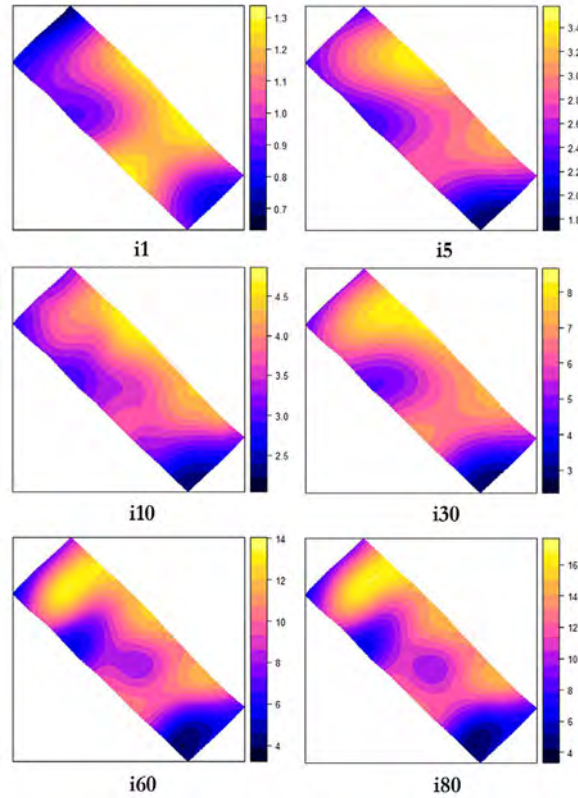


Figure 1. Contour maps generated through the Kriging Interpolation to phase I (germination phase of a pea crop in the Bogotá savanna) process and different times. i10 to i 80: refers to instants 10 to 80 min.

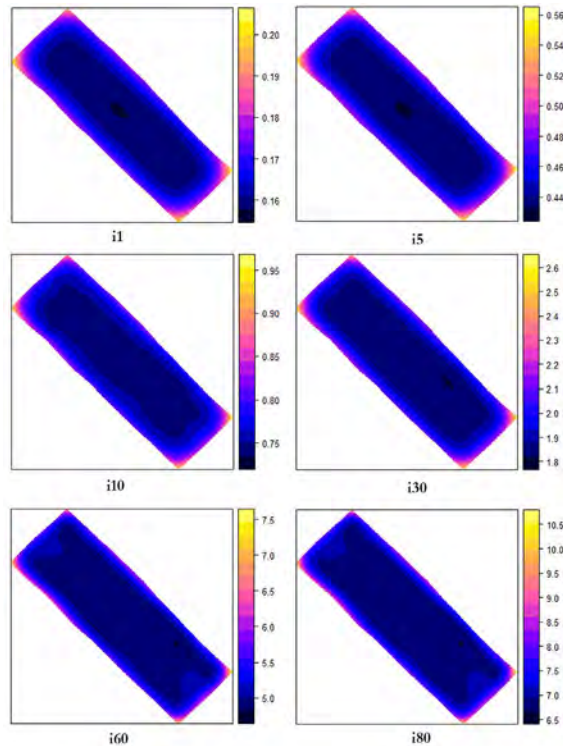


Figure 2. Variance generating starts with the Kriging Interpolations process in the phase I (germination phase of a pea crop in the Bogotá savanna). i10 to i 80: refers to instants 10 to 80 min.

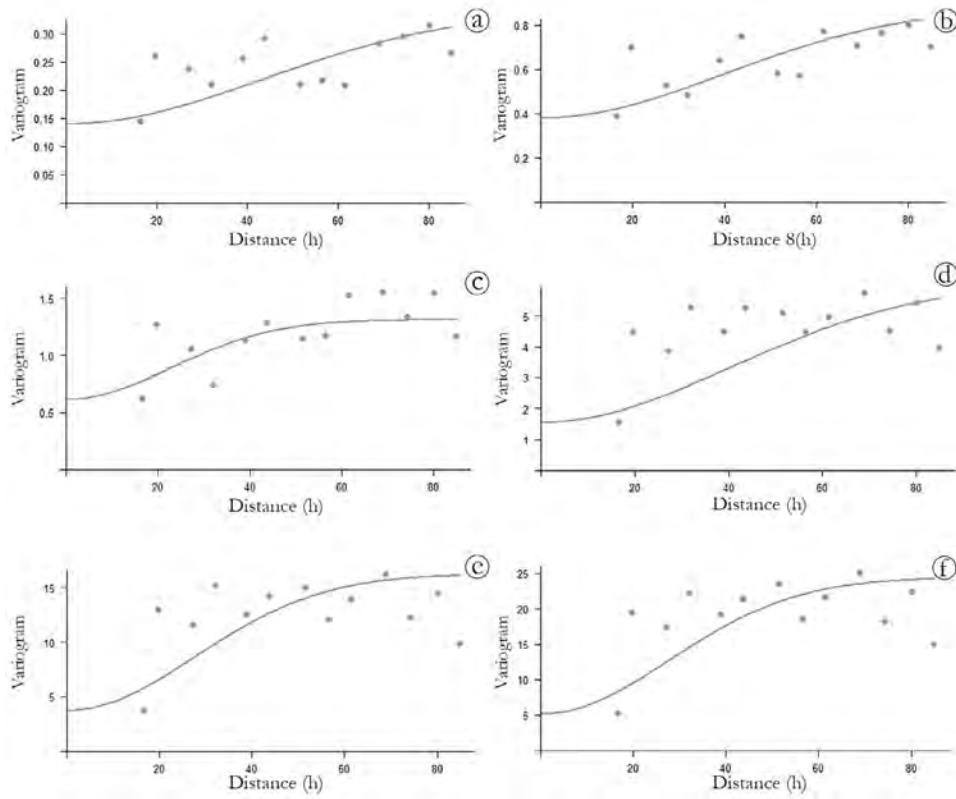


Figure 3. Theoretical variograms are adjusted as input data to generate contour maps. a) Bessel variogram for instant of 1 minute; b) Gaussian variogram for instant of 5 minutes; c) Gaussian variogram for instant of 10 minutes; d) Hole variogram for instant of 30 minutes; e) Hole variogram for instant of 60 minutes; f) Bessel variogram for instant of 80 minutes.

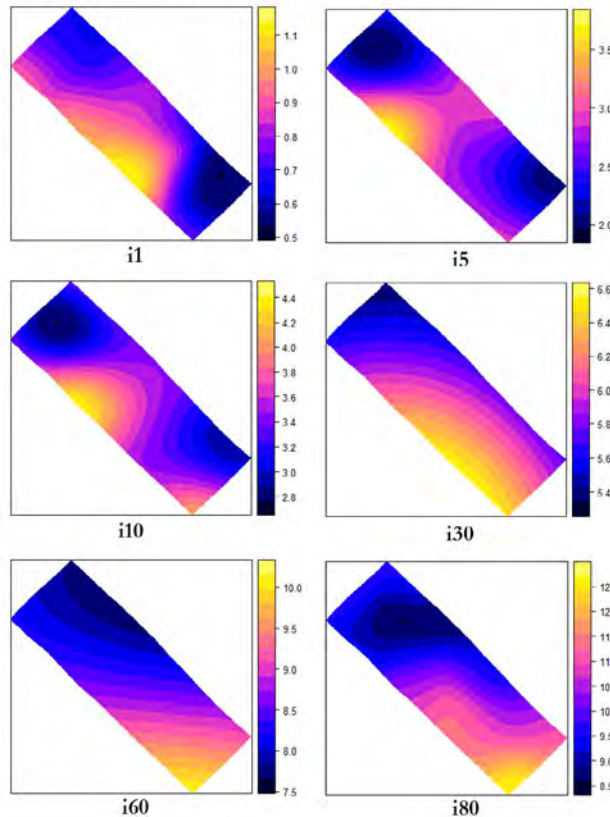


Figure 4. Contour maps generating of infiltration data for Kriging Interpolation before phase II (harvest of a pea crop in the Bogotá savanna). i10 to i 80: refers to instants 10 to 80 min.

Table 1. Selection of theoretical variogram models for the first five instants of infiltration in the phase I (germination phase of a pea crop in the Bogotá savanna).

Parameter	Model	Nugget (C0)	Sill (C0+C)	Range (m)	DSP C/(C0+C)	IKI
i1	Gau	0.140	0.200	61.0	0.30	*
	Gau	0.140	0.310	80.0	0.55	+
	Ste	0.140	0.260	85.0	0.46	+
	Exp	0.140	0.210	62.0	0.33	+
i2	Gau	0.280	0.370	80.0	0.24	+
	Exp	0.280	0.340	85.0	0.18	+
	Hol	0.280	0.420	44.0	0.33	+
	Bes	0.280	0.420	85.0	0.33	*
i3	Gau	0.250	0.410	57.0	0.39	+
	Bes	0.250	0.530	62.0	0.53	*
	Exp	0.250	0.590	80.0	0.58	+
	Mat	0.250	0.590	80.0	0.58	+
i4	Gau	0.340	0.400	32.0	0.15	*
	Exp	0.340	0.600	85.0	0.43	+
	Bes	0.340	0.630	69.0	0.46	+
	Hol	0.340	0.690	44.0	0.51	+
i5	Gau	0.380	0.500	56.0	0.24	*
	Exp	0.380	0.700	85.0	0.46	+
	Bes	0.380	0.760	62.0	0.50	+
	Hol	0.380	0.750	44.0	0.49	+

* Variance Homogeneity with Kriging Interpolation; + Variance Heterogeneity with Kriging Interpolation; DSP C/(C0+C): Degree of Spatial Dependence; Ste: Mater Stein Parameterization; Cir: Circular; Exp: Exponential; Bes: Bessel; Hol: Hole; Gau: Gaussian; IKI: Incidence in Kriging Interpolation; i1 to i5: accumulate infiltration to instants 1 to 5 min.

The Incidence in Kriging Interpolation (IKI) indicates the selection of the theoretical variograms with which the best degree of adjustment was achieved, with respect to the experimental variance models, corroborated information according to the degree of homogeneity or heterogeneity identified in the variance maps of the interpolation, generated in Rstudio (Figure 2).

The results of DSD at the end of the infiltration test in phase I indicate relative reliability of the fit of the data to the theoretical variograms, a necessary condition to reduce the uncertainty during the interpolation process, and the generation of contour maps.

The contour maps (Figures 1 and 4) confirm the existence of spatial variability of the accumulated infiltration on a plot cultivated with pea crop, determined mainly by the incidence of the size and distribution of the roots of the crop. (Imhoff *et al.* 2010).

In all the cases of Phase I, the lowest ranges of accumulated infiltration were concentrated in the first georeferenced nodes, while the highest

magnitudes of accumulated infiltration were observed towards the final nodes, showing a marked dependence, for each of the instants in which the hydro-physical parameter was evaluated, showing spatial heterogeneity.

The variance maps (Figure 2) indicate a relative homogeneity during the Kriging interpolation process, confirming that the selected theoretical variograms (Tables 1 and 2) were the ones that presented the best degree of adjustment to define the behavior of the accumulated infiltration, for each of the instants evaluated in Phase I. However, the trend of the variance was incremental, showing a direct relationship between the variation of the accumulated infiltration and the time of the test, suggesting that the soil was not in a condition close to saturation at the end of the 80-minute test. The adjusted processing methodology demonstrates these given that it is effective in evaluating the spatial variability of the infiltration parameters, with special relevance to the results of accumulated infiltration, but establishing the spatial variations of water movement in the soil as a function of the time of the test.

Table 2. Selection of variogram theoretical models for instants 5 to 80 min for the phase I (germination phase of a pea crop in the Bogotá savanna).

Parameter	Model	Nugget (C0)	Sill (C0+C)	Range (m)	DSP C/(C0+C)	IKI
i10	Gau	0.610	0.730	32.0	0.16	+
	Exp	0.610	1.140	52.0	0.46	+
	Bes	0.610	1.520	62.0	0.60	*
	Mat	0.610	1.330	74.0	0.54	+
i15	Gau	0.990	1.780	57.0	0.44	*
	Exp	0.990	2.060	74.0	0.52	+
	Bes	0.990	2.270	62.0	0.56	+
	Mat	0.990	2.400	80.0	0.59	+
i20	Gau	1.060	2.700	56.0	0.61	*
	Exp	1.060	3.200	62.0	0.67	+
	Bes	1.060	3.300	44.0	0.68	+
	Mat	1.060	3.200	61.0	0.67	+
i25	Gau	1.440	3.500	57.0	0.59	*
	Exp	1.440	3.900	62.0	0.63	+
	Bes	1.440	4.200	44.0	0.66	+
	Mat	1.440	3.900	52.0	0.63	+
i30	Gau	1.560	4.500	57.0	0.65	*
	Exp	1.560	5.000	62.0	0.69	+
	Bes	1.560	5.200	44.0	0.70	+
	Mat	1.560	5.100	52.0	0.69	+
i40	Gau	2.210	6.700	39.0	0.67	*
	Exp	2.210	7.900	44.0	0.72	+
	Bes	2.210	8.000	32.0	0.72	+
	Mat	2.210	7.400	62.0	0.70	+
i50	Gau	3.010	9.300	57.0	0.68	*
	Exp	3.010	11.900	52.0	0.75	+
	Bes	3.010	11.200	44.0	0.73	+
	Mat	3.010	10.900	62.0	0.72	+
i60	Gau	3.750	12.480	39.0	0.70	*
	Exp	3.750	15.000	52.0	0.75	+
	Bes	3.750	15.100	32.0	0.75	+
	Mat	3.750	15.000	52.0	0.75	+
i70	Gau	4.100	15.600	39.0	0.74	*
	Exp	4.100	15.200	57.0	0.73	+
	Bes	4.100	18.300	32.0	0.78	+
	Mat	4.100	17.400	44.0	0.76	+
i80	Gau	5.150	19.200	39.0	0.73	*
	Exp	5.150	21.300	44.0	0.76	+
	Bes	5.150	22.100	32.0	0.77	+
	Mat	5.150	21.600	62.0	0.76	+

* Variance Homogeneity with Kriging Interpolation; + Variance Heterogeneity with Kriging Interpolation; DSP C/(C0+C): Degree of Spatial Dependence; Ste: Mater Stein Parameterization; Cir: Circular; Exp: Exponential; Bes: Bessel; Hol: Hole; Gau: Gaussian; IKI: Incidence in Kriging Interpolation; i10 to i80: accumulate infiltration to instants 10 to 80 min.

For the increasing instants of accumulated infiltration (instants 1 to 5 min) of Phase II, it was determined that DSD is in a moderate range, while for the recession period (instants 10 to 80 min) of the hydrodynamic parameter (i), the degree of spatial dependence was estimated from moderate to weak.

It is important to note that in Phase II (harvest), the accumulated infiltration for instants 25, 40, and 50 min, showed a degree of spatial dependence close to zero, which suggests a nugget effect, and, therefore, spatial randomness of the hydro-physical parameter, therefore, the sampling distances at those moments were not sufficient to establish spatial variability. Again, the adjusted processing methodology demonstrates these given that it is effective in evaluating the spatial variability of the infiltration parameters, with special relevance to the results of accumulated infiltration, but in this case not with the same precision compared to phase I, which still de sampling was the development with the same distance between nodes.

When comparing the contour maps of Phases I and II (Figures 1 and 4), it can be seen that the magnitudes of accumulated infiltration are similar for moments 1 to 5 min. However, the magnitudes of accumulated infiltration for instants 10 to 80 min decreased significantly during Phase II. The identification of larger areas with lower infiltration ranges suggests the existence of natural densification processes in the soil throughout the crop cycle, demonstrated with the processing methodology developed. The differences between the accumulated infiltration of Phases I and II could be argued because before planting peas, in the study lot, the land preparation was carried out with agricultural machinery, together with cultural practices such as weed control, while, from the middle of the cycle to the harvest, the activities carried out to sustain the crop were minimal. Additionally, a higher moisture content stored in the soil decreases the empty spaces present in the porous medium, generating reductions in water movement (Rodríguez-Vásquez *et al.* 2008; Hummel *et al.* 2004; Guimarães *et al.* 2013), affecting the accumulated infiltration of Phase II.

The results obtained in both phases were used to analyze a simulation process for irrigation programming of a localized system (drip), with validation of the adjusted methodology of the data processing, with integration between irrigation programming and the contour maps allowing the generation of infiltration differentiated by sectors, discriminating variation in times and irrigation sheets, and considering the variations sectorized in the simulated application periods between the periods 1 to 10 minutes and 10 to 30 minutes, which are those corresponding to a daily scheduled irrigation application for pea cultivation, according to a proposed irrigation design.

Evaluating the spatial variability of soil infiltration through geostatistical techniques, compared to different moments and periods associated with variations in crop development with this adjusted methodology, offers the possibility of managing water resources at least in the design process, because it allows spatial irrigation programming, defining specific areas of sheets, and irrigation times.

With the proposed methodology was validated that the degree of spatial dependence of the accumulated infiltration, for each evaluated phase, is directly related to the time of the infiltration test, maintaining an incremental trend, which means that the spatial dependence is more evident to the extent that the soil pores are in a condition close to saturation, allowing adjustment of irrigation programming times by sectors, according to the simulation of the irrigation programming.

The proposed data processing strategy has the option of being replicated in parallel to show changes in soil properties, although it should be noted that the sampling spacings change significantly depending on the variable to be analyzed. The present methodology it could be integrated with irrigation programming at least to design process.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article. The project was developed with funding from Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U. D. C. A, between 2018 and 2020. **Authors contributions:** Helber Milton Orjuela-Matta applied geostatistical, mathematical, computational, or other formal techniques (software) to analyze or synthesize study data and the processing methodology. Danny Wilson Sanjuanelo Corredor formulated the overarching research goals and aims. Jonathan Vásquez Lizcano conducted the research and investigation process. Katherin Cubides Posada, Julián Francisco Rodríguez, Juan Carlos Torres, and Heiner Alfonso Ramírez Poveda provided the study materials, reagents, laboratory samples, instrumentation, computing resources, and other analysis tools.

REFERENCES

1. ALESSO, C.A.; CIPRIOTTI, P.A.; MASOLA, M.J.; CARRIZO, M.E.; IMHOFF, S.C.; ROCHA-MENESES, L.; ANTILLE, D.L. 2020. Spatial distribution of soil mechanical strength in an controlled traffic farming system as determined by cone index and geostatistical techniques. *Agronomy Research*. 18(S2):1115-1126. <https://doi.org/10.15159/AR.20.133>
2. CAMACHO-TAMAYO, J.H.; RUBIANO SANABRIA, Y.; SANTANA, L.M. 2013. Management units based on the physical properties of an Oxisol. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 13(4):767-785. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000061>
3. CORTÉS-D., D.L.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; GIRALDO, R. 2016. Spatial prediction of soil penetration resistance using functional geostatistics. *Scientia Agricola*. 73(5):455-461. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0113>
4. CORTES-D., D.L.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; GIRALDO, R. 2018. Spatial prediction of soil infiltration using functional geostatistics. *AUC Geographica*. 53(2):149-155. <https://doi.org/10.14712/23361980.2018.15>

5. CUCUNUBÁ-MELO, J.L.; ÁLVAREZ-HERRERA, J.G.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2011. Identification of agronomic management units based on physical attributes of soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 11(1):87-99.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162011000100008>
6. DA SILVA MARTINS, A.L.; GOMES DE MOURA, E.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2010. Spatial variability of infiltration and its relationship to some physical properties. *Ingeniería e Investigación*. 30(2):116-123.
7. DE LIMA, F.V.; DA SILVA SILVINO, G.; DE SOUZA MELO, R.S.; LIRA, E.C.; DE SOUZA RIBEIRO, T. 2015. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. *Revista Caatinga*. 28(4):53-63.
<https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n406rc>
8. FARACO, M.A.; URIBE-OPAZO, M.A.; ALVES DA SILVA, E.A.; JOHANN, J.A.; BORSSOI, J.A. 2008. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 32(2):463-476.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200001>
9. FASINMIRIN, J.T.; OLORUFEMI, I.E.; OGUNTUNDE, P.G.; REICHERT, J.M. 2018. Hydraulic conductivity and penetration resistance of a Tropical Rainforest Alfisol under different land uses in Akure, Southwestern Nigeria. *Journal of Experimental Agriculture International*. 27(6):1-12.
<https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/12690>
10. GEBLER, L.; GRECO, C.R.; VIEIRA, A.L.; DA R. KUSE, L. 2015. Spatial influence of physical and chemical parameters on management zone definition in apple orchards. *Engenharia Agrícola*. 35(6):1160-1171.
<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p1160-1171/2015>
11. GUIMARÃES, R.M.L.; BALL, B.C.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B.; DA SILVA, A. 2013. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. *Soil and Tillage Research*. 127:92-99.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.020>
12. GUZMÁN-ROJO, D.P.; BAUTISTA, E.; GONZÁLEZ-TRINIDAD, J.; BRONSON, K.F. 2019. Variability of furrow infiltration and estimated infiltration parameters in a macroporous soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 145(2).
13. HAGHIGHI-FASHI, F.; SHARIFI, F.; KAMALI, K. 2014. Modelling infiltration and geostatistical analysis of spatial variability of sorptivity and transmissivity in a flood spreading area. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 12(1):277-288.
<https://doi.org/10.5424/sjar/2014121-4659>
14. HOSSAIN BHUIYAN, M.A.; BODRUD-DOZA, M.; TOWFIQUL ISLAM, A.R.M.; RAKIB, M.A.; SAFIUR RAHMAN, M.; RAMANATHAN, A.L. 2016. Assessment of groundwater quality of Lakshimpur district of Bangladesh using water quality indices, geostatistical methods, and multivariate analysis. *Environmental Earth Sciences*. 75(12):1-23.
<https://doi.org/10.1007/s12665-016-5823-y>
15. HUMMEL, J.W.; AHMAD, I.S.; NEWMAN, S.C.; SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T. 2004. Simultaneous soil moisture and cone index measurement. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 47(3):607-618.
16. IMHOFF, S.; GHIBERTO, P.J.; GRIONI, A.; GAY, J.P. 2010. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine Flat Pampa. *Geoderma*. 158:268-274.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.005>
17. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI - IGAC. 2011. Levantamiento detallado de suelos en las áreas planas de los municipios de Cota, Tabio y Tenjo. Escala 1:10.000. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Bogotá, D.C.). 396p.
18. JAYNES, D.B.; HUNSAKER, D.J. 1989. Spatial and temporal variability of water content and infiltration on a flood irrigated field. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 32(4):1229-1238.
<https://doi.org/10.13031/2013.31139>
19. LIU, H.; LEI, T.W.; ZHAO, J.; YUAN, C.P.; FAN, Y.T.; QU, L.Q. 2011. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method. *Journal of Hydrology*. 396(1-2):24-32.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.028>
20. MACHIWAL, D.; JHA, M.K.; MAL, B.C. 2006. Modelling Infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering*. 95(4):569-582.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.08.007>
21. MEDINA, C.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; CORTÉS, C.A. 2012. Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. *Engenharia Agrícola*. 32(1):91-101.
<https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100010>

22. MOSHIA, M.E.; KHOSLA, R.; LONGCHAMPS, L.; REICH, R.; DAVIS, J.G.; WESTFALL, D.G. 2014. Precision manure management across site-specific management zones: Grain yield and economic analysis. *Agronomy Journal*. 106(6):2146-2156.
<https://doi.org/10.2134/agronj13.0400>
23. NOVAK, V.; ŠIMÁUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T. 2000. Infiltration of water into soil with cracks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 126(1):41-47.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:1\(41\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:1(41))
24. ORJUELA-MATTA, H.M.; RUBIANO-SANABRIA, Y.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2011. Spatial variability of hydrodynamic parameters in the native savanna of the Colombian Eastern plains. *Agronomía Colombiana*. 29(1):83-90.
25. ORJUELA-MATTA, H.M.; RUBIANO SANABRIA, Y.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2012. Spatial analysis of infiltration in an oxisol of the eastern plains of Colombia. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 72(3):404-410.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000300015>
26. PARRA-CORONADO, A.; FISCHER, G.; CAMACHO-TAMAYO, J. 2018. Post-harvest quality of pineapple guava [*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret] fruits produced in two locations at different altitudes in Cundinamarca, Colombia. *Agronomía Colombiana*. 36(1):68-78.
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v36n1.68577>
27. PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 11:1633-1644.
<https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
28. R CORE TEAM. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing (Vienna, Austria). Disponible desde internet en: <https://www.R-project.org/>
29. RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ, A.; ARISTIZÁBAL-CASTILLO, A.M.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2008. Spatial variability of Philip and Kostikov infiltration models in an andic soil. *Engenharia Agrícola*. 28(1):64-75.
30. RSTUDIO TEAM. 2022. Integrated Development for R. RStudio, Inc., (Boston, MA). Disponible desde Internet en: <http://www.rstudio.com/>
31. VARÓN-RAMÍREZ, V.M.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; GONZÁLEZ-NIVIA, J. 2018. Management zones determination based on physical properties of the soil. *Ciência e Agrotecnologia*. 42(3):248-260.
<https://doi.org/10.1590/1413-70542018423002318>

Validación de un modelo para la estimación del contenido de agua del suelo mediante espectroscopía en el infrarrojo cercano

Validation of a model for the estimation of soil water content by infrared spectroscopy

Andrea Katherín Carranza-Díaz¹; Jesús Hernán Camacho-Tamayo^{1*}; Yolanda Rubiano-Sanabria²

¹Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Ingeniería. Bogotá D.C., Colombia; e-mail: akcarranzad@unal.edu.co; jhcamachot@unal.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Ciencia Agrarias. Bogotá D.C., Colombia; e-mail: yrubianos@unal.edu.co

*autor de correspondencia: jhcamachot@unal.edu.co

Cómo citar: Carranza-Díaz, A.K.; Camacho-Tamayo, J.H.; Rubiano-Sanabria, Y. 2023. Validación de un modelo para la estimación del contenido de agua del suelo mediante espectroscopía en el infrarrojo cercano. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2329. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2329>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: junio 20 de 2022

Aceptado: junio 22 de 2023

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El monitoreo del contenido de humedad en el suelo es especialmente importante, ya que proporciona información relevante para tomar decisiones acertadas, en cuanto a riego, fertirriego y manejo del estrés hídrico. Este trabajo tiene como objetivo validar un modelo de estimación del contenido de agua en el suelo, mediante espectroscopía de reflectancia difusa en el rango del infrarrojo cercano. Los suelos evaluados provienen de los municipios de Puerto Gaitán (Meta), Espinal (Tolima) y Mosquera (Cundinamarca). En los dos primeros se establecieron redes rígidas, para seleccionar los puntos de muestreo y empleando dos profundidades en cada caso (0-10 y 10-30; 0-10 y 10-25 cm, respectivamente). Para el tercero, se describieron 77 calicatas y se tomaron muestras a 0-10 y 10-35 cm de profundidad. Posteriormente, se evaluó el contenido de humedad considerando 0, 15 y 30 % de humedad. Los datos obtenidos se analizaron con estadística descriptiva. Se empleó la validación cruzada y externa para cada modelo y se obtuvo un modelo general, a partir de los datos de los tres sitios. Los modelos obtenidos para cada sitio de muestreo y el modelo general tienen buena capacidad predictiva. Según los resultados, se afirma que la espectroscopía de reflectancia difusa NIR es una excelente opción para determinar el contenido de agua en el suelo. De igual manera, a partir del análisis de componentes principales, se identificó una diferenciación entre contenidos de agua de los suelos estudiados.

Palabras clave: Agricultura de precisión; Espectroscopia de reflectancia difusa; Infrarrojo cercano; Método de estimación; Suelo agrícola

ABSTRACT

Monitoring soil moisture content is especially important as it provides relevant information for making informed decisions regarding irrigation, fertigation, and water stress management. This study aims to validate a model for estimating soil water content using diffuse reflectance spectroscopy in the near-infrared range. The evaluated soils come from the municipalities of Puerto Gaitán (Meta), Espinal (Tolima), and Mosquera (Cundinamarca). In the first two municipalities, rigid networks were established to select sampling points, with two depths considered for each case (0-10 and 10-30 cm; 0-10 and 10-25 cm, respectively). For the third municipality, 77 soil pits were described, and samples were taken at depths of 0-10 and 10-35 cm. Subsequently, moisture content was evaluated at 0, 15, and 30 % moisture levels. The obtained data were analyzed using descriptive statistics. Cross-validation and external validation were applied to each model, and a general model was developed based on the data from all three sites. The obtained models for each sampling site and the general model demonstrated good predictive capacity. Based on the results, it is affirmed that near-infrared diffuse reflectance spectroscopy is an excellent option for determining soil water content. Similarly, principal component analysis identified differentiation between water contents of the studied soils.

Keywords: Agricultural soil; Diffuse reflectance spectroscopy; Estimation Model; Near infrared; Precision agriculture.

INTRODUCCIÓN

El contenido de agua del suelo (CAS) es una propiedad edáfica relacionada con múltiples procesos biofísicos asociados al crecimiento y al desarrollo de las plantas desde su germinación, adsorción de agua y nutrientes, procesos de transpiración y de evaporación, entre otros, por lo tanto, la determinación de la humedad en el suelo es uno de los principales componentes para tener en cuenta a la hora de implementar diferentes actividades de manejo integrado para la producción de cultivos, como por ejemplo, en el momento de realizar los cálculos para: i) determinar la cantidad y el costo de las láminas de riego; ii) la frecuencia de riego y iii) los requerimientos nutricionales para los sistemas de fertirriego (Anbazhagan *et al.* 2020).

Los métodos convencionales para la medición del CAS son costosos, debido al uso de insumos químicos y, en algunos casos, altamente contaminantes (Martínez Sepúlveda *et al.* 2021). También tiene como desventaja la necesidad de la destrucción de las muestras para la extracción del elemento a ser analizado, requieren de la perturbación del suelo, ya sea para la extracción de muestras a diferentes profundidades o para la instalación de sensores y a la vez estos métodos demandan mucho tiempo para su ejecución (Curto *et al.* 2016; Peng *et al.* 2020). Esto hace que la precisión de los datos disminuya, en especial, teniendo en cuenta que el suelo es un medio cambiante, tanto en el espacio como en el tiempo, debido a los factores de formación (Castillo-Valdez *et al.* 2021) y que requiere de una adecuada interpretación de sus características, para lograr un manejo eficiente del mismo (Peña Vanegas, 2020).

En lo que respecta a la ingeniería de irrigación, la medición del CAS cumple un papel fundamental para el seguimiento en el terreno de los sistemas de riego de los cultivos. La aplicación excesiva o deficiente de agua puede ocasionar alteraciones en el metabolismo de las plantas, siendo más crítico cuando se llega a niveles de estrés hídrico (Anbazhagan *et al.* 2020). Por esto, es necesario contar con una técnica rápida, precisa y de bajo costo, que permita monitorear, de manera eficiente, el suelo y que se pueda considerar como una herramienta para la toma de decisiones, a la hora de implementar estrategias de uso y manejo edáfico.

La espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIRS por sus siglas en idioma inglés), dado que no genera residuos; se puede considerar como una tecnología limpia, a la vanguardia del contexto actual de cambio climático y sostenibilidad, pues se adquiere una señal (huella espectral), que es única para cada muestra de suelo. Ante esto, diferentes autores, como Skoog *et al.* (2007), Stenberg *et al.* (2010) y Peng *et al.* (2020), afirman que la NIRS es una tecnología promisoría para el mapeo digital de suelos de alta resolución y la agricultura de precisión, que incluye la determinación del CAS, ya que a partir del espectro de una sola muestra es posible evaluar múltiples propiedades del suelo y así analizar un mayor número de muestras, en un corto período de tiempo y a menor costo por muestra (Marakkala Manage *et al.* 2018). Esta técnica se fundamenta en el análisis e interpretación de sobretonos y combinación de vibraciones generadas como respuesta a un estímulo de luz, en

el cual, se identifican diferentes bandas de adsorción producidas, principalmente, por los grupos funcionales -CH, -NH y -OH (Afara *et al.* 2021).

Existen diferentes trabajos que muestran la relación entre el contenido de humedad del suelo y la respuesta espectral de la muestra de suelo; por ejemplo, Darra *et al.* (2021) evidenciaron una relación inversamente proporcional entre el CAS y la respuesta espectral del suelo en el intervalo de VIS-NIR, atribuido, principalmente, a las respuestas espectrales de los minerales primarios y secundarios a diferentes concentraciones de humedad. Este fenómeno ha sido explicado por Zhan *et al.* (2007), quienes concluyeron que el CAS muestra un comportamiento inversamente proporcional a la respuesta espectral de las muestras de suelo en el rango visible e infrarrojo cercano, disminuyendo cuando el CAS aumenta. Otras alteraciones ligadas al CAS han sido expuestas por Nocita *et al.* (2015), quienes han identificado que, bajo condiciones de campo, la variación en el CAS puede enmascarar de manera variable la respuesta espectral de otros componentes del suelo, como es el caso de la materia orgánica, ocasionando una disminución en la precisión de predicción de los modelos de estimación del contenido de materia orgánica y del carbono orgánico del suelo, debido a que la curva espectral que se obtiene del suelo presenta comportamiento similar en suelos con alto contenido de materia orgánica o con altos contenidos de agua.

Específicamente en Colombia, se han desarrollado diferentes investigaciones empleando la espectroscopía como técnica de análisis de suelos; sin embargo, ninguno ha reportado la evaluación de la incidencia del CAS en suelos colombianos. A partir de lo expuesto anteriormente, la finalidad de esta investigación fue validar un modelo de estimación del contenido de agua del suelo, mediante espectroscopía de reflectancia difusa NIR.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de Estudio. Este trabajo se desarrolló empleando tres suelos diferentes, provenientes de los departamentos del Meta, Tolima y Cundinamarca, en Colombia, de los cuales, se extrajeron las muestras a la mitad de los dos primeros horizontes, para cada tipo de suelo. Los dos primeros, fueron extraídos previamente de dos centros de investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA: a) Centro de Investigación Carimagua, ubicado en el municipio de Puerto Gaitán (Meta) 4°34'01,6" N 71°19'58.0" O, a 170 m s.n.m. y b) Centro Agropecuario "La Granja", ubicado en la región del Espinal (Tolima) 4°10'17,6" N 74°55'44.4" O, a 312 m s.n.m. El tercero fue tomado del Centro Agropecuario Marengo, finca experimental de la Universidad Nacional de Colombia, en el municipio de Mosquera (Cundinamarca), 4°42'52,0" N 74°12'60,0" O, a 2.516 m s.n.m.

Para la toma de muestras en el Centro de Investigación Carimagua (C.I.C) y en el Centro Agropecuario "La Granja" (C.A.G.), cuya extensión es de 5.100 ha y 50 ha, respectivamente, se estableció un sistema de red rígida, teniendo en cuenta la información disponible de la zona de estudio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi

(IGAC) y AGROSAVIA, a partir de la cual, se seleccionaron 40 puntos, para el C.I.C. y 74 puntos, para el C.A.G., tomando las muestras a 10 y 30 cm y 10 y 25 cm de profundidad, respectivamente.

En cuanto al Centro Agropecuario Marengo (C.A.M.), que cuenta con un área de 94,6 ha, se realizaron 77 cajuelas georreferenciadas, por medio de un Sistema de Posicionamiento Global, en 16 de los 17 lotes, extensión equivalente a 72,8 ha, en total. En cada cajuela, las muestras fueron recolectadas a 10 y a 35 cm de profundidad.

Determinación de contenido de agua. Todas las muestras fueron secadas al aire durante 72 horas hasta alcanzar la humedad de equilibrio. Posteriormente, se procedió a su molienda y tamizaje, empleando una malla de 2 mm, para remover el material detrítico y homogenizar cada muestra (Zhan *et al.* 2007). En cada caso, se analizaron tres tratamientos consistentes CAS de 0, 15, 30 %, realizando un pre-secado a 60 °C, durante 48 horas, con el fin de homogenizar las muestras, a un contenido de agua cercano a 0 % (Nocita *et al.* 2015).

La determinación del peso de agua (ca_{apl}) a agregar por gramo de suelo, se realizó por medio de la ecuación 1. Después de aplicar ca_{apl} correspondiente, las muestras se dejaron en reposo en recipientes herméticos por 24 horas, permitiendo la distribución uniforme del agua; luego, se obtuvieron las curvas espectrales, por medio del espectrómetro FT-NIR modular NIRFlex N-500.

$$ca_{apl} = m_T \left(\frac{\omega_{a+1}}{\omega_{i+1}} - 1 \right) \quad \text{ecuación 1}$$

Donde, ca_{apl} es el peso total de agua a agregar a cada muestra (g); m_T , el peso total de cada muestra (g); ω_a el contenido de agua (%) al que se desea llegar en cada caso; ω_i el contenido de agua (%) inicial de cada muestra determinado previamente por el método de la estufa.

Después de la toma de espectros, se seleccionaron submuestras para cada sitio de muestreo, secadas a 105 °C, durante 24 horas; se calculó la humedad gravimétrica de cada una y se realizaron las pruebas convencionales (Alviz *et al.* 2014). El CAS fue determinado empleando la norma colombiana INVE-122-07 (INVIAS, 2012). Los resultados fueron analizados mediante estadística descriptiva y aplicando la prueba de Grubbs ($p < 0,05$).

Procesamiento y análisis de las curvas espectrales. La figura 1 muestra, de manera detallada, el diagrama de flujo del proceso realizado en la presente investigación, en el cual, el conjunto de calibración se conformó por el 75 % de las muestras que pasaron la prueba de Grubbs y el 25 % restante, se emplearon como el conjunto de validación. Todas las curvas espectrales fueron preprocesadas para reducir y corregir los efectos de dispersión y ruido, empleando la derivada de Savitzky – Golay (Wang *et al.* 2022), la SNV (Standard Normal Variation) y la Normalización (Wang *et al.* 2020).

La calibración de cada uno de los modelos se llevó a cabo, mediante la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR), teniendo en cuenta la ecuación descrita por Zossi & Sorol (2010). Para la linealización de los parámetros se utilizó el algoritmo iterativo no lineal de mínimos cuadrados parciales (NIPALS-Nonlinear Iterative Partial Least Squares). Luego, se realizó la validación de los tres modelos, a través de una validación cruzada y una validación externa. Por último, se generó un modelo, cuya base de entrada fue los datos de los suelos de los tres orígenes.

Posteriormente, se seleccionó el modelo con mejor ajuste, teniendo en cuenta: el error medio (ME), el coeficiente de determinación (R^2), la desviación estándar del error (SDE), la raíz del error medio cuadrático de la predicción (RMSE), el coeficiente de variación CV, bias y la desviación residual de la predicción RPD. De igual manera, los resultados de la validación de los modelos fueron empleados como criterio para determinar el número de factores PLSR, los cuales, se escogieron usando los resultados de la validación de los modelos, donde se consideró el coeficiente de determinación, para el conjunto de validación (R^2) y el error estándar, para el conjunto de validación (SEP).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Palmer & Williams (1974) exponen que la cuantificación del CAS empleando espectroscopía NIR, está basada en los sobretonos existentes de las bandas de absorción de agua a 1.450, 1.950 y 2.950 nm; sin embargo, el rango espectral del espectrofotómetro FT-NIR modular NIRFlex N-500 es de 800 – 2.500 nm, con medidas simultáneas para todos los anchos de las ondas, lo que solo permitió analizar las muestras en 1.450 y 1.950 nm.

A continuación, se muestra los espectros correspondientes a los tres tipos de suelos evaluados (Figura 2), en los cuales, el valor de reflectancia disminuye respecto al aumento del CAS, representado por los picos de grupos hidroxilo en cada suelo, comportamiento identificado por Neema *et al.* (1987), quienes identificaron que, cuando la película de agua cubre cada partícula del suelo, la relación entre la reflectancia y la humedad del suelo vuelve al límite higroscópico, es decir que, en ese punto, existe una directa relación entre el contenido de humedad del suelo y la capacidad de retención a capacidad de campo (Zhu, 1984).

También, se identifica una tendencia de suavizado de los picos característicos de estas curvas espectrales, comportamiento que concuerda con lo expuesto por Ogen *et al.* (2019), quienes afirman que el CAS distorsiona la forma espectral general y enmascara las principales absorciones espectrales del suelo. El contenido de humedad del suelo afecta el espectro al amplificar la absorción de agua a 1.400, 1.900 nm y en 2.300 - 2.500 nm y al disminuir el albedo general, a través de él (Twomey *et al.* 1986; Lobell & Asner, 2002; Ge *et al.* 2014).

Por otra parte, los resultados (Tabla 1) permiten identificar que el rango de reflectancia de los espectros con el mismo CAS es mayor, a medida que el contenido de agua aumenta (Weidong *et al.* 2002).

Esta tendencia, se origina por la afectación del albedo derivada de la humedad de las muestras, como lo mencionan autores, como Nocita *et al.* (2013). En suelos con mayor porcentaje de humedad se identifica un albedo cercano a 1,50, correspondiente al índice de refracción del suelo y otro de aproximadamente 1,33, asociado al

índice de refracción del agua, valores inferiores a los esperados para suelos con un bajo CAS, en los que las partículas están rodeadas de aire y su albedo es cercano a 1,00 (Bach & Mauser, 1994). Dicha disminución en el índice de refracción en las superficies suelo-agua-aire genera una menor dispersión de la luz incidente.

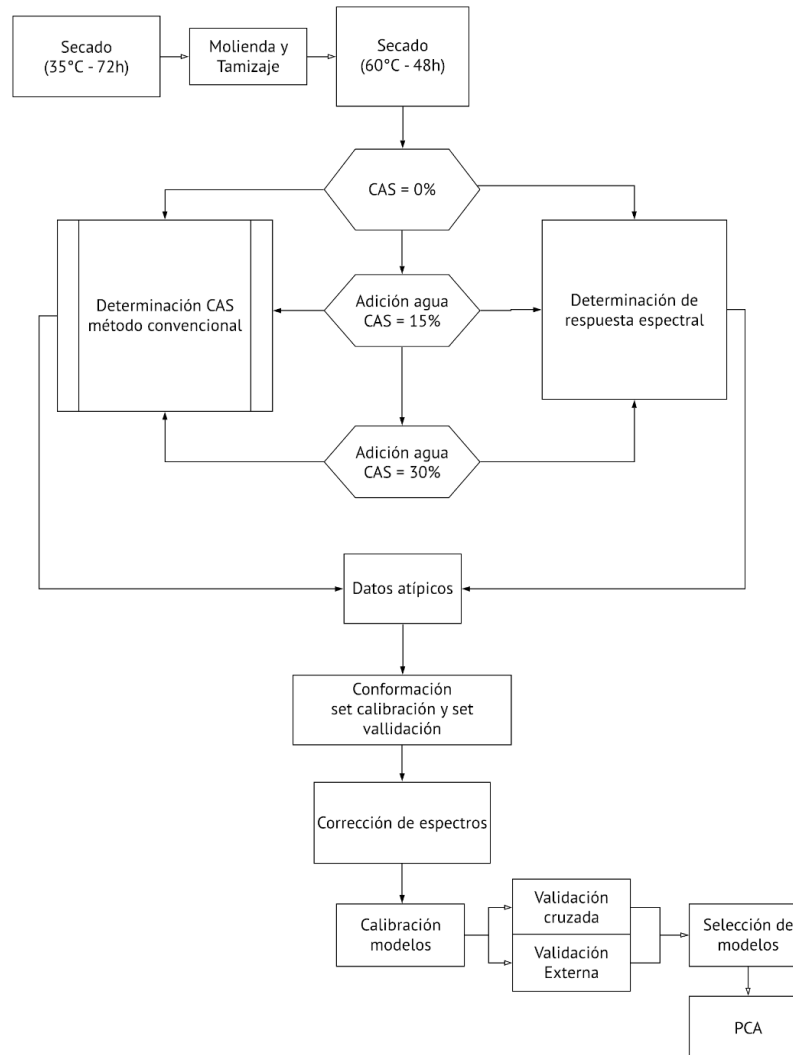


Figura 1. Proceso para la obtención de los modelos de predicción.

Tabla 1. Nivel de reflectancia para diferentes contenidos de agua del suelo en cada localidad.

Suelo	Contenido de Agua		
	0 %	15 %	30 %
Centro de Investigación Carimagua (C.I.C.)	0,17	0,34	0,29
Centro Agropecuario La Granja (C.A.G.)	0,23	0,27	0,28
Centro Agropecuario Marengo (C.A.M.)	0,18	0,31	0,31

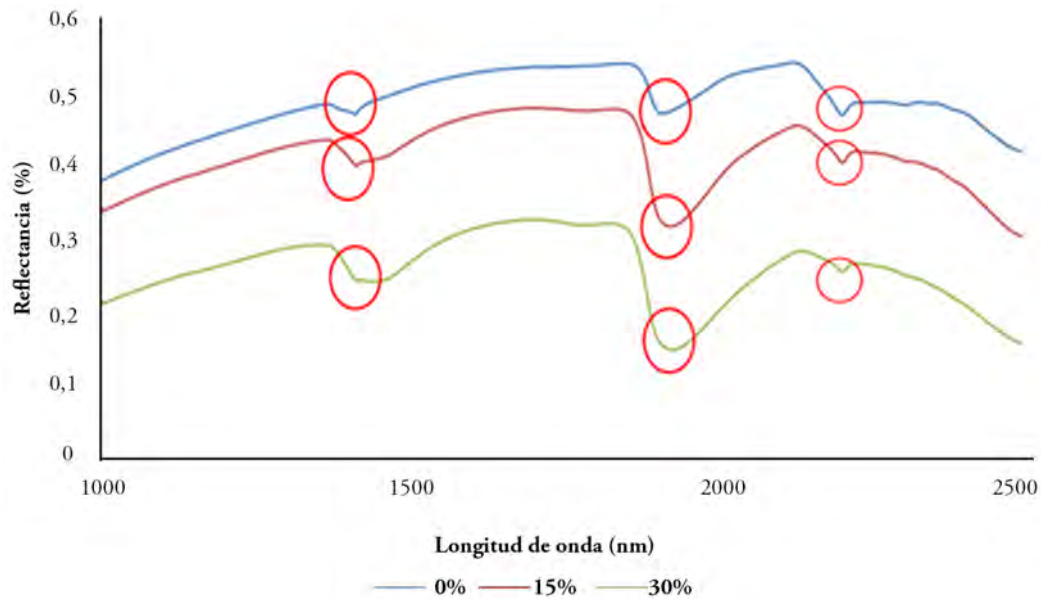


Figura 2. Curvas espectrales de los tres suelos a diferentes contenidos de agua.

En los tres tipos de suelos se evidencia una disminución de la reflectancia ligada al aumento del CAS; sin embargo, esta no es lineal e independiente de los tipos de suelo (Zhang *et al.* 2021). La variación es más pronunciada a 1.940 nm en los tres suelos y para las tres concentraciones de humedad; no obstante, a los 2.300 nm, este comportamiento se revierte (Weidong *et al.* 2002). Adicionalmente, una mayor proporción de la luz se propaga de manera más profunda en el suelo, gracias al reflejo adicional de la

energía dispersa en la interfaz agua-aire, ligada a la película de agua que rodea las partículas del suelo (Somers *et al.* 2010).

Calibración de modelos. La tabla 2 contiene los parámetros estadísticos que permitieron seleccionar el modelo de predicción y los valores de los coeficientes β obtenidos a partir de la ecuación 1, para cada uno de los suelos evaluados.

Tabla 2. Parámetros estadísticos para la calibración y validación de los modelos obtenidos para los tres tipos de suelo.

Parámetro estadístico	Centro Agropecuario Marengo			Centro Agropecuario la Granja			Centro de Investigación Carimagua		
	Calibración	Validación Cruzada	Validación Externa	Calibración	Validación Cruzada	Validación Externa	Calibración	Validación Cruzada	Validación Externa
R ²	0,97	0,96	0,95	0,85	0,84	0,81	0,97	0,96	0,95
RMSE	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,05	0,02	0,02	0,03
SE	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,05	0,02	0,02	0,03
Bias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SD	0,10	-	0,10	0,11	-	0,11	0,12	-	0,12
RPD	5,16	-	5,00	2,75	-	2,20	5,83	-	4,00

R²: R cuadrado; RMSE: error de raíz cuadrada media; SE: error estándar; SD: desviación estándar; RPD: desviación residual de predicción.

Específicamente, en el caso de los suelos provenientes del C.A.M y del C.I.C., los coeficientes de regresión de Pearson, para los modelos de calibración, validación cruzada y externa obtenidos, fueron de 0,97, 0,96 y 0,95, respectivamente, indicando una alta correlación, resultados consecuentes con los resultados reportados por autores, como Mouazen *et al.* (2006), quienes reportaron un R² de 0,98, Slaughter *et al.* (2001), con un R² de 0,89 y Somers *et al.* (2010), con un R² de 0,82. Por otra parte, los suelos originarios del C.A.G. mostraron coeficientes de regresión de Pearson más bajos que los reportados por la literatura, pero se consideran aceptables.

Respecto a los RMSE observados, el modelo del C.A.M. fue el más bajo con 0,02, valor inferior al reportado por Whiting *et al.* (2004), quienes obtuvieron un RMSE de calibración de 0,031, mientras que el modelo del C.I.C., cuenta con un RMSE de calibración similar al reportado por estos autores y el modelo del C.A.G., muestra los valores más altos (entre 0,04 y 0,05), para los suelos estudiados, superando los reportados en la literatura.

Considerando los criterios de predicción de RPD propuestos por Chang *et al.* (2001), para propiedades edáficas identificadas con

espectroscopía NIR, valores mayores a 2,0, permiten considerar la predicción del modelo como buena, si los valores se encuentran entre 1,4-2,0, su predicción es razonable y valores inferiores a 1,4, indican una predicción no confiable. Por lo tanto, los tres modelos cuentan con una predicción robusta al presentar valores mayores a 2,0, tanto para la calibración como para la validación externa (Tabla 2). Estos resultados se reafirman con los valores a 0,8 del coeficiente de determinación y valores del RMSE cercanos a cero.

Análisis de componentes principales. Para identificar las muestras con el mismo CAS, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) a los cuatro tipos de modelos generados para cada suelo. En el caso de los suelos del C.A.M., los CAS son diferenciables (Figura 3a) y después del ACP, se evidenció que los dos primeros componentes explican un 89 % de la varianza total del modelo. Específicamente, el componente principal 1, discrimina en un 68 % el total de las muestras para los tres contenidos de agua y el componente principal 2, tan solo diferencia las muestras en un 21 %.

Por otra parte, los suelos del C.A.G. (Figura 3b) muestran gran diferencia entre las muestras con un 0 % de CAS y los otros dos porcentajes, los cuales, se diferencian entre sí, en menor medida. Para estos suelos, los dos primeros componentes explican el 90 % de la variación total de estas muestras.

En este caso, el modelo con mejor diferenciación de los tres contenidos de agua es el de los suelos del C.I.C. (Figura 3c), en el cual, la variación de las muestras de suelos es explicada en un 96 %, por los dos principales componentes.

Por último, el modelo generado a partir de los datos de estos tres tipos de suelos presenta altos coeficientes de regresión y errores relativamente bajos, similares a los alcanzados por otros autores (Tabla 3). El RPD obtenido es mayor a 2,0, lo que indica que tiene una alta capacidad predictiva.

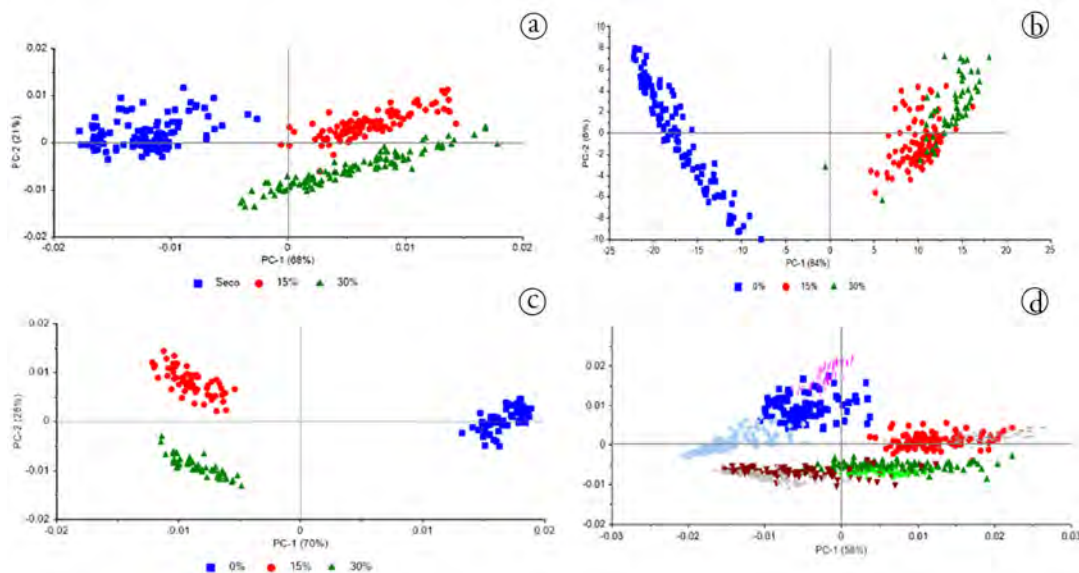


Figura 3. Análisis de componentes principales (ACP) para: a) Centro Agropecuario Marengo (C.A.M.); b) Centro Agropecuario La Granja (C.A.G); c) modelo de los suelos del Centro de Investigación Carimagua (C.I.C.) y d) modelo general derivado del conjunto de datos de los tres tipos de suelos.

Tabla 3. Parámetros estadísticos para la calibración y validación del modelo general, obtenido a partir del conjunto de datos de los tres tipos de suelo.

Parámetro estadístico	Calibración	Validación Cruzada	Validación Externa
R^2	0,87	0,88	0,90
RMSE	0,04	0,04	0,03
SE	0,04	0,04	0,03
Bias	0,00	0,00	0,00
SD	0,11	-	0,11
RPD	2,75	-	3,67

R^2 : R cuadrado; RMSE: error de raíz cuadrada media; SE: error estándar; SD: desviación estándar; RPD: desviación residual de predicción.

La varianza del conjunto de datos que generó el modelo conjunto (Figura 3d) puede ser explicada en un 58 %, por el componente principal 1 y en un 29 %, por el componente principal 2.

Gracias a los resultados obtenidos se puede afirmar que todos los modelos generados para predecir el contenido de agua de los suelos del C.A.M, C.I.C. y C.A.G. poseen una alta capacidad predictiva, a partir del conjunto de datos los tres tipos de suelos.

Los modelos de predicción generados muestran que, sin importar la clase del suelo, es posible generar y validar un modelo robusto para determinar el CAS, a partir de espectroscopía de reflectancia difusa NIR. Este potencial permite usar los resultados para la gestión asociadas al manejo de suelos y cultivos y, en particular, monitorear propiedades, así como condiciones de riego, permitiendo que la toma de decisiones asociadas a la cuantificación de riego.

Es necesario continuar retroalimentando las bases de datos de este tipo de modelos, para robustecerlos y aumentar su capacidad predictiva. Para esto, se puede considerar la toma de espectros *in situ* y comparar los resultados obtenidos, al trabajar con muestras inalteradas y alteradas y concluir cuáles son más adecuadas para el mejoramiento de los modelos.

Conflicto de intereses: El presente artículo es derivado de un documento de trabajo de grado, que lleva por título “Espectroscopía de reflectancia difusa – NIR para la determinación del contenido de agua en el suelo”. **Contribución de autores:** Andrea Katherín Carranza Díaz: estuvo a cargo de la conceptualización, desarrollo y validación de la investigación y realizó el borrador del documento. Jesús Hernán Camacho Tamayo y Yolanda Rubiano Sanabria: supervisaron y apoyaron el desarrollo de la investigación y revisaron la escritura del documento.

REFERENCIAS

- AFARA, I.O.; SHAIK, R.; NIPPOLEINEN, E.; QUERIDO, W.; TORNIAINEN, J.; SARIN, J.K.; KANDEL, S.; PLESHKO, N.; TÖYRÄS, J. 2021. Characterization of connective tissues using near-infrared spectroscopy and imaging. *Nature Protocols*. 16:1297-1329. <https://doi.org/10.1038/s41596-020-00468-z>
- ALVIZ, H.; FIGUEROA, J.; RUIZ, N. 2014. Efecto del secado en las fronteras del estado plástico de tres materiales arcillosos situados en la cuenca del arroyo grande de corozal (departamento de Sucre-Colombia). *Revista Colombiana de Materiales*. 5:124-129. <https://doi.org/10.17533/udea.rcm.19374>
- ANBAZHAGAN, P.; BITELLI, M.; PALLEPATI, R.R.; MAHAJAN, P. 2020. Comparison of soil water content estimation equations using ground penetrating radar. *Journal of Hydrology*. 588:125039. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125039>
- BACH, H.; MAUSER, W. 1994. Modelling and model verification of the spectral reflectance of soils under varying moisture conditions. *Proceedings of IGARSS '94 - 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 4:2354-2356. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1994.399735>
- CASTILLO-VALDEZ, X.; ETCHEVERS, J.D.; HIDALGO-MORENO, C.M.I.; AGUIRRE-GÓMEZ, A. 2021. Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*. 39:e698. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698>
- CHANG, C.W.; LAIRD, D.A.; MAUSBACH, M.J.; HURBURGH, C.R. 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy—principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal*. 65(2):480. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652480x>
- CURTO, L.; COVI, M.; GASSMANN, M.I.; CAMBARERI, M.A.; DELLA MAGGIORA, A.I. 2016. Calibración de datos observados de contenido de agua en el suelo con sensores capacitivos. *Meteorológica*. 41(2):49-63.
- DARRA, N.; PSOMIADIS, E.; KASIMATI, A.; ANASTAIU, A.; ANASTASIOU, E.; FOUNTAS, S. 2021. Remote and proximal sensing-derived spectral indices and biophysical variables for spatial variation determination in vineyards. *Agronomy*. 11(4):11040741. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040741>
- GE, Y.; MORGAN, C.L.S.; ACKERSON, J.P. 2014. VisNIR spectra of dried ground soils predict properties of soils scanned moist and intact. *Geoderma*. 221–222:61–69. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.011>
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS - INVIAS. 2012. Norma INV-E-122-07. Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo -agregado. 5p.
- LOBELL, D.; ASNER, G.P. 2002. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*. 66(3):722-727. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.7220>
- MARAKKALA MANAGE, L.P.; GREVE, M.H.; KNADEL, M.; MOLDRUP, P.; DE JONGE, L.W.; KATUWAL, S. 2018. Visible-near-infrared spectroscopy prediction of soil characteristics as affected by soil-water content. *Soil Science Society of America Journal*. 82(6):1333-1346. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.01.0052>
- MARTÍNEZ SEPÚLVEDA, J.A.; SÁNCHEZ-YÁÑEZ, J.M.; VOLKE-SEPÚLVEDA, T.; VALLEJO QUINTERO, V.E.; PÉREZ JUNCO, L.M.; DUARTE BAUTISTA, P.A.; UMBACÍA, M.; MÁRQUEZ-BENAVIDES,

- L.; VILLASEÑOR CAMACHO, J.; CASTAÑEDA GARCÍA, L.F.; REINALDO CASALLAS, M.R. 2021. *Remediación de suelos contaminados: fundamentos y casos de estudio*. Ediciones EAN. (Colombia). 190p. <https://doi.org/10.21158/9789587566116>
14. MOUAZEN, A.M.; KAROUI, R.; DE BAERDEMAEKER, J.; RAMON, H. 2006. Characterization of soil water content using measured visible and near infrared spectra. *Soil Science Society of America Journal*. 70(4):1295. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0297>
 15. NEEMA, D.L.; SHAH, A.; PATEL, A.N. 1987. A statistical optical model for light reflection and penetration through sand. *International Journal of Remote Sensing*. 8(8):1209–1217. <https://doi.org/10.1080/01431168708954765>
 16. NOCITA, M.; STEVENS, A.; NOON, C.; VAN WESEMAEL, B. 2013. Prediction of soil organic carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*. 199:37–42. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.07.020>
 17. NOCITA, M.; STEVENS, A.; VAN WESEMAEL, B.; BROWN, D.J.; SHEPHERD, K.D.; TOWETT, E.; VARGAS, R.; MONTANARELLA, L. 2015. Soil spectroscopy: An opportunity to be seized. *Global Change Biology*. 21(1):10–11. <https://doi.org/10.1111/gcb.12632>
 18. OGEN, Y.; FAIGENBAUM-GOLOVIN, S.; GRANOT, A.; SHKOLNISKY, Y.; GOLDSHLEGER, N.; BEN-DOR, E. 2019. Removing moisture effect on soil reflectance properties: A case study of clay content prediction. *Pedosphere*. 29(4):421–431. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(19\)60811-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(19)60811-8)
 19. PALMER, K.F.; WILLIAMS, D. 1974. Optical properties of water in the near infrared. *Journal of the Optical Society of America*. 64(8):1107–1110. <https://doi.org/10.1364/JOSA.64.001107>
 20. PENG, L.; CHENG, H.; WANG, L.J.; ZHU, D. 2020. Comparisons of the prediction results of soil properties based on fuzzy c-means clustering and expert knowledge from laboratory Visible–Near-Infrared reflectance spectroscopy data. *Canadian Journal of Soil Science*. 101(1):33–44. <https://doi.org/10.1139/cjss-2020-0025>
 21. PEÑA VANEGAS, R.A. 2020. Manual técnico para la interpretación de análisis de suelos y fertilización de cultivos. Número 86. Universidad de la Salle. (Colombia). 60p.
 22. SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; CROUCH, S.R. 2007. *Principles of instrumental analysis*. Thomson Brooks. (EE.UU.) 1039p.
 23. SLAUGHTER, D.C.; PELLETIER, M.G.; UPADHYAYA, S.K. 2001. Sensing soil moisture using NIR spectroscopy. *Applied Engineering in Agriculture*. 17(2):241–247. <https://doi.org/10.13031/2013.5449>
 24. SOMERS, B.; GYSELS, V.; VERSTRAETEN, W.W.; DELALIEUX, S.; COPPIN, P. 2010. Modelling moisture-induced soil reflectance changes in cultivated sandy soils: a case study in citrus orchards. *European Journal of Soil Science*. 61(6):1091–1105. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01305.x>
 25. STENBERG, B.; VISCARRA ROSSEL, R.A.; MOUAZEN, A.M.; WETTERLIND, J. 2010. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. In *Advances in Agronomy* 107:163–215. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7)
 26. TWOMEY, S.A.; BOHREN, C.F.; MERGENTHALER, J.L. 1986. Reflectance and albedo differences between wet and dry surfaces. *Applied Optics*. 25(3):431–437. <https://doi.org/10.1364/AO.25.000431>
 27. WANG, L.; XU, H.; WANG, X.; DING, X. 2022. Multisource uncertain dynamic load identification fitted by Legendre polynomial based on precise integration and the Savitzky-Golay filters. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 123(20):4974–5006. <https://doi.org/10.1002/nme.7071>
 28. WANG, Y.J.; LI, T.H.; LI, L.Q.; NING, J.M.; ZHANG, Z.Z. 2020. Micro-NIR spectrometer for quality assessment of tea: Comparison of local and global models. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 237:118403. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118403>
 29. WEIDONG, L.; BARET, F.; XINGFA, G.; QINGXI, T.; LANFEN, Z.; BING, Z. 2002. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote sensing of environment*. 81(2-3):238–246. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00347-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00347-9)
 30. WHITING, M.L.; LI, L.; USTIN, S.L. 2004. Predicting water content using Gaussian model on soil spectra. *Remote Sensing of Environment*. 89(4):535–552. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2003.11.009>
 31. ZHAN, Z.; QIN, Q.; GHULAN, A.; WANG, D. 2007. NIR-red spectral space based new method for soil moisture monitoring. *Science in China Series D: Earth Sciences*. 50(2):283–289. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-2004-6>
 32. ZHANG, F.; WU, S.; LIU, J.; WANG, C.; GUO, Z.; XU, A.; PAN, K.; PAN, X. 2021. Predicting soil moisture content over partially vegetation covered

- surfaces from hyperspectral data with deep learning. *Soil Science Society of America Journal*. 85(4):989-1001. <https://doi.org/10.1002/saj2.20193>
33. ZHU, Y. 1984. Study on the rule of soil reflectance varied with different soil moisture. *Soil Journal (Chine)*. 21:194-202.
34. ZOSSI, S.; SOROL, N. 2010. Espectroscopia por infrarrojo cercano (NIRS): Su aplicación en análisis de jugos de caña de azúcar. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*. 87(1):01-06.



Habilidad combinatoria de los caracteres relacionados con la producción de habichuela (*Phaseolus vulgaris* L.)

Combining ability of traits related to snap beans production (*Phaseolus vulgaris* L.)

Mayra Contreras-Rojas^{1*} ; Franco Alirio Vallejo-Cabrera¹ ; Sanín Ortiz-Grisales¹ 

¹Universidad Nacional de Colombia. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: mcontreras@unal.edu.co; fvallejo@unal.edu.co; sortizg@unal.edu.co

*autor de correspondencia: mcontreras@unal.edu.co

Cómo citar: Contreras-Rojas, M.; Vallejo-Cabrera, F.A.; Ortiz-Grisales, S. 2023. Habilidad combinatoria de los caracteres relacionados con la producción de habichuela (*Phaseolus vulgaris* L.). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2217. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2217>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: marzo 3 de 2022

Aceptado: junio 14 de 2023

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Las variedades de habichuela cultivadas en Colombia presentan un bajo potencial de producción, por lo que se hace necesario adelantar programas de mejoramiento, cuya ejecución depende del conocimiento de la habilidad combinatoria de los cultivares disponibles. Con el objetivo de evaluar la acción génica predominante en caracteres de importancia económica, se evaluaron 15 híbridos directos y seis progenitores. Las habilidades combinatorias general (HCG) y específica (HCE), se estimaron con el Método 2 modelo 1 de Griffing, que considera a los progenitores y sus cruzamientos directos. Se midieron los caracteres: número de vainas y producción por planta, peso promedio y longitud de la vaina. Los resultados indicaron efectos genéticos aditivos para longitud de la vaina; por el contrario, el número de vainas y producción por planta, se vieron influenciados por efectos genéticos no aditivos, mientras que el peso promedio de la vaina fue controlado por efectos genéticos, tanto aditivos como no aditivos. Los progenitores 1 y 6 mostraron efectos positivos más altos de HCG, para el peso promedio y longitud de la vaina, mientras los progenitores 5 y 6, lo fueron para la producción de vainas por planta y los progenitores 4 y 5, para el número de vainas por planta. La estimación de HCE más alta para todos los caracteres, se presentó en el híbrido 1x2, siendo la más adecuada para mejorar la producción de la habichuela.

Palabras clave: Acción génica; Análisis dialélico; Hibridación; Mejoramiento de hortalizas; Variabilidad genética.

ABSTRACT

Green bean varieties grown in Colombia have low production potential, therefore it is necessary to carry out plant breeding programs, which execution depends on the knowledge of the combinatorial ability of the available cultivars. To evaluate the predominant gene action in economically important traits 15 direct hybrids and six parents were evaluated. General combining ability (GCA) and specific combining ability (SCA) were estimated with Griffing's Method 2 model 1, which considers parents and their direct crosses. The characters: number of pods and yield per plant, average weight and pod length were measured. The results indicated additive genetic effects for pod length. In contrast, pod number and yield per plant were influenced by non-additive genetic effects, while average pod weight was controlled by both additive and non-additive genetic effects. Parents 1 and 6 showed higher positive effects of HCG for average pod weight and pod length, while parents 5 and 6 for pod yield per plant and parents 4 and 5 for number of pods per plant. The highest ECGH estimation for all traits was found in the 1x2 hybrid, being the most suitable for improving bean production.

Keywords: Diallel analysis; Gene action; Genetic variation; Hybridization; Vegetable breeding.

INTRODUCCIÓN

La habichuela es la legumbre inmadura del frijol común *Phaseolus vulgaris* L y una de las hortalizas más importante en la dieta humana (Reis Figueira, 2013). Se consume de manera integral (legumbre con semillas vestigiales a mediano desarrollo) y es fuente importante de vitaminas, minerales y otros compuestos vegetales secundarios; en Colombia, el uso de la habichuela va en ascenso, con demanda en los mercados locales y en la gastronomía vernácula colombiana (Barraza-Alvarez, 2021). A nivel mundial, se producen, aproximadamente, 27 millones de toneladas de habichuelas (FAO, 2021).

Por otro lado, Estados Unidos tiene el 71 % de la producción mundial de habichuelas y el consumo per cápita al año es de 3 kg (USDA, 2019).

En el 2019, la producción de habichuela en Colombia fue de 45.806 ton y los departamentos de Cundinamarca, Valle del Cauca, Santander, Huila y Tolima son los principales productores (MADR, 2021); sin embargo, la producción por hectárea de este cultivo ha venido decreciendo por diversas causas, entre las que se pueden enumerar: el uso de un único cultivar, el Blue Lake y la escasa rotación de cultivos o problemas fitosanitarios del cultivo. La baja productividad hace que su producción no sea rentable para el horticultor. En este sentido, la obtención de cultivares con mayor producción constituye una prioridad para los programas de mejoramiento genético en esta especie; sin embargo, el desarrollo de un programa de mejoramiento necesita información sobre la naturaleza de las acciones de los genes, que controlan los caracteres relacionados con la producción de habichuela.

Los cruzamientos dialélicos son los sistemas de apareamiento más utilizados, que permiten identificar progenitores e híbridos prometedores, además permiten obtener información sobre el control genético de los caracteres de interés, lo que hace más eficientes los procesos de mejoramiento (Cruz *et al.* 2004). A partir del análisis dialélico, se recopila información sobre los efectos, debido a la habilidad combinatoria general (HCG) y la habilidad combinatoria específica (HCE) de los progenitores en los cruzamientos (Yanchuk, 1996; Glover *et al.* 2005). La estimación de los efectos de la HCG y la HCE permiten estimar la acción de genes aditivos y no aditivos (Griffing, 1956). El efecto de la HCG ayuda a identificar progenitores superiores, mientras que el efecto de la HCE estima el rendimiento de los híbridos (Cruz *et al.* 2004).

El objetivo de la presente investigación fue conocer la acción génica que controla la producción de habichuela y los caracteres relacionados a su calidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético. Material genético de la primera etapa: se formó la población dialélica. Se emplearon seis genotipos, dos cultivares comerciales: (1) G17723 (Blue Lake de la compañía Ferry-Morse Estados Unidos) y (6) G51158 (UNAPAL-Milenio de la

Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira) y cuatro líneas: (2) G23956, (3) G20400, (4) G18212 y (5) G16806, de la colección mundial de frijol de la Unidad de Recursos Genéticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (URG-CIAT), previamente seleccionadas por el Programa de Hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia- Sede Palmira. Material genético de la segunda etapa: se evaluaron los 21 genotipos que conformaron el dialélico. Seis progenitores: (1) G17723; (2) G23956; (3) G20400; (4) G18212; (5) G16806 y (6) G51158 y 15 híbridos directos sin recíprocos: 1x2, 1x3, 1x4, 1x5, 1x6, 2x3, 2x4, 2x5, 2x6, 3x4, 3x5, 3x6, 4x5, 4x6 y 5x6.

Localización. El trabajo se realizó en dos etapas. La primera etapa consistió en la obtención de los híbridos F1, la cual, se llevó a cabo durante el segundo semestre del 2018, en la granja Mario González Aranda (MGA), de la Universidad Nacional de Colombia -sede Palmira, departamento de Valle del Cauca, ubicada a 3°30'26,8" N 76°18'47,6" O, a una altura de 1.000 m s.n.m., con temperatura media anual de 24 °C, precipitación anual de 1.020 mm y humedad relativa del 72 %. La segunda etapa estuvo relacionada con la evaluación de los progenitores y sus respectivos híbridos F1, que se desarrolló en el segundo semestre del 2019 (Ambiente1) y primer semestre del 2020 (Ambiente 2), en el Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia -sede Palmira (CEUNP), localizado en la vereda el Carmelo del municipio de Candelaria, Valle del Cauca, a 3°25'34" N 76°25'53" O, a una altura de 1.000 m s.n.m., con temperatura media anual de 26 °C, precipitación anual de 1.028 mm y humedad relativa del 75 % (Ortiz Grisales *et al.* 2020).

Variables de respuesta evaluadas. Número de vainas por planta (NVP): al momento de la cosecha, manualmente, se determinaron las vainas que tenían, por lo menos, una semilla viable y se realizó el conteo de estas en cada planta muestreada. Producción de vainas por planta (PPP): se tomó la totalidad de las vainas por planta y se pesaron en una balanza digital; los resultados se expresaron en kilogramos. Peso promedio de la vaina (PPV): cociente entre producción de vainas por planta sobre el número de vainas por planta y se expresó en gramos. Longitud de vaina (LDV): se tomaron diez vainas por unidad experimental, se midió en centímetros, desde su inserción en el pedicelo hasta el extremo libre del ápice.

Diseño experimental. Se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar (Baena, 2012) con cuatro repeticiones. La unidad experimental consistió en ocho plantas, en surcos de 8 m de largo, con una distancia entre surco de 1,50 m y 1,0 m entre plantas, donde se evaluaron las cuatro plantas centrales.

Análisis estadístico-genético. La comparación de medias se realizó con la prueba de diferencia mínima significativa (DMS), con un nivel de significancia de $p \leq 0,05$. Se realizaron los análisis de varianzas por ambiente para la obtención de los cuadrados medios residuales, a objeto de realizar el análisis de homogeneidad, verificada tal condición, se realizó el análisis de varianzas combinado para cada carácter, empleando el software Genes (Cruz, 2020). El análisis de la habilidad combinatoria se realizó según el

Método 2 modelo 1, de Griffing (1956), teniendo en cuenta las combinaciones $p(p+1)/2$, correspondientes a los progenitores y sus cruzamientos directos (Ortiz Grisales *et al.* 2020). Para las pruebas de significancia y ajuste de medias, se consideraron los genotipos y los ambientes con efectos fijos en el análisis de varianza combinado. El análisis genético se llevó a cabo con la ayuda del software Genes (Cruz, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de los valores promedios. En la tabla 1, se presenta el comportamiento promedio de los seis progenitores y quince

híbridos F1. En el carácter número de vainas por plantas (NVP), se presentaron variaciones en el material genético evaluado. Los valores promedios de los progenitores oscilaron entre 80,66 y 130,81 vainas por planta. Los progenitores 5 (G16806) y 6 (G51158) presentaron los mayores promedios. La mayoría de los cruzamientos superaron el promedio de los mejores progenitores, destacándose los híbridos (1x2) y (4x5), por la mayor cantidad de vainas por planta, lo que indicó la presencia de efectos heteróticos en los cruzamientos evaluados, en concordancia con lo expuesto por Whankate *et al.* (2021), quienes obtuvieron en habichuela promedios, entre las 59,40 y 162,40 vainas.

Tabla 1. Comparación de medias para número de vainas por planta (NVP), peso promedio de vainas por planta (PPV), longitud de la vaina (LDV) y producción por planta (PPP), en progenitores y cruzamientos de habichuela (*Phaseolus vulgaris* L), evaluados en dos ambientes. Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia -sede Palmira (CEUNP) 2019 – 2020.

a. Progenitores	Promedios			
	NVP	LDV (cm)	PPV (g)	PPP (kg)
1. G17723	80,66	14,83	5,55	0,47
2. G23956	108,53	13,92	4,72	0,55
3. G20400	85,34	13,75	5,23	0,47
4. G18212	100,56	13,11	4,61	0,48
5. G16806	130,81	13,01	4,96	0,69
6. G51158	111,50	15,73	5,90	0,70
Media progenitores	102,90	14,06	5,16	0,56
b. Híbridos F1				
7. (1 x 2)	191,56	15,13	6,15	1,22
8. (1 x 3)	146,41	14,34	5,54	0,86
9. (1 x 4)	177,66	12,99	4,50	0,84
10. (1 x 5)	178,56	14,03	5,59	1,05
11. (1 x 6)	154,03	15,93	6,19	0,98
12. (2 x 3)	145,34	14,31	5,12	0,77
13. (2 x 4)	174,56	12,41	4,43	0,83
14. (2 x 5)	154,91	14,17	5,36	0,84
15. (2 x 6)	145,78	15,38	6,04	0,94
16. (3 x 4)	158,13	12,54	4,38	0,69
17. (3 x 5)	120,03	13,24	5,06	0,64
18. (3 x 6)	134,06	14,40	5,58	0,78
19. (4 x 5)	192,25	13,01	4,87	0,91
20. (4 x 6)	163,84	13,13	4,31	0,70
21. (5 x 6)	148,97	15,25	5,87	0,91
Media híbridos F1	159,07	14,02	5,27	0,86
Media general	143,14	14,00	5,24	0,80
DMS (5 %)	43,19	1,28	0,72	0,27

Los progenitores 5 (G16806) y 6 (G51158) presentaron la mayor PPP (Tabla 1). La mayoría de los híbridos se destacaron por su alto promedio en producción por planta en comparación con los mejores progenitores, indicando la presencia de heterosis. Lo anterior, indicó que los progenitores que estuvieron involucrados

en la formación de estos híbridos podrían ser empleados en futuros programas de mejoramiento, para el carácter considerado.

Para el carácter peso promedio de vainas por planta (PPV), los progenitores con altos promedios fueron 1(G17723) y 6(G51158).

Los cruzamientos que superaron en promedio al mejor progenitor fueron 1×2, 1×6 y 2×6, corroborando la existencia de heterosis en los genotipos evaluados, resultados que difieren en magnitud, de acuerdo con los genotipos empleados por Alves Francelino *et al.* (2011), quienes obtuvieron valores de 2,27 a 3,81 gramos por vaina y a los de Cordeiro de Araújo *et al.* (2012), quienes reportaron pesos promedio de 2,51 gramos por vaina. El cultivar 1×2 fue el que obtuvo un mayor peso promedio de vaina por planta, debido a que es un genotipo que se caracteriza por ser altamente productivo y presentar una mayor longitud. Estos resultados brindan una ventaja al agricultor, en donde el incremento en peso del fruto de habichuela cosechado aporta una mayor rentabilidad al cultivo, lo que incrementa los ingresos obtenidos.

Para el carácter longitud de la vaina (LDV), los promedios de mayor valor se encontraron en los progenitores 1 (G17723) y 6 (G51158). Ningún híbrido superó al mejor progenitor, aunque los híbridos 1×2, 1×6, 2×6 y 5×6, con promedios entre 15,93 y 15,13 cm, presentaron diferencias significativas, lo que indica que,

probablemente, el progenitor 6 (G51158) está siendo heterótico, con tres progenitores diferentes. Alves Francelino *et al.* (2011) reportaron valores de 9,31 a 18,79 cm por vaina; Sánchez del Castillo *et al.* (2017), al evaluar genotipos de crecimiento indeterminado encontraron valores entre 9,3 a 14,5 cm de longitud, en las vainas de habichuela; Vidyacar *et al.* (2017) obtuvieron valores entre 8,0 a 14,8 cm por vaina; Gomes *et al.* (2019) encontraron valores de 10,60 a 19,57 cm y Pereira Da Silva *et al.* (2020) reportaron valores entre los 9,47 a 11,38 cm por vaina. La longitud de las vainas es un carácter importante en la aceptación comercial de los cultivares de habichuela arbustiva y se considera que los valores deben ser superiores a 13 cm (Pandey *et al.* 2011), por lo que, con base en los resultados obtenidos, es posible seleccionar cultivares que cuenten con este atributo.

Análisis de Varianza Combinado. Los cuadrados medios del ANDEVA combinado presentaron diferencias altamente significativas ($P < 0,01$), para Ambientes (A), en todas las variables evaluadas (Tabla 2). Los genotipos (G) mostraron diferencias

Tabla 2. Suma de cuadrados expresado en porcentaje de la suma de cuadrado total, significancia de los cuadrados medios del análisis de varianza combinado y componentes de varianza de la habilidad combinatoria general (HCG) y la habilidad combinatoria específica (HCE).

FV	GL	Suma de Cuadrados (% SC)			
		NVP	LDV	PPV	PPP
Ambiente	1	55**	2**	4**	52**
Bloque/Amb	6	5**	19**	5**	6**
Genotipo	20	14**	56**	64**	15**
H.C.G	5	15*	80**	69**	20**
H.C.E	15	85**	20**	32**	80**
Gen x Amb	20	6	4	6*	6*
H.C.G x Amb	5	28	38	39*	20
H.C.E x Amb	15	72	62	61	80*
Error Comb	120	21	18	20	22
$\frac{1}{5} \sum gi^2$	-	377,69	3,50	1,00	0,02
$\frac{1}{15} \sum sij^2$	-	7580,99	1,96	1,09	0,25
Media	-	143,14	14,03	5,24	0,78
CV (%)	-	31,35	4,98	7,55	35,53

*,** significativo para el test F ($P < 0,05$) y ($P < 0,01$), respectivamente; NVP= número de vainas por planta; LDV= longitud de la vaina; PPV= peso promedio de vainas por planta y PPP= producción por planta.

altamente significativas ($P < 0,01$), para todos los caracteres, lo que sugiere la presencia de una amplia variabilidad genética, entre los genotipos estudiados. Al descomponer la fuente de variación genotipos (G), se encontró que tanto la HCG como la HCE, presentaron diferencias significativas ($P < 0,01$), para NVP, LDV, PPV y PPP (Tabla 2). Estas diferencias indicaron que en la expresión de dichos caracteres intervinieron de manera significativa, tanto la HCG (acción génica aditiva) como la HCE (acción génica no aditiva), lo que genera la posibilidad de obtener nuevas líneas o híbridos (Da Silva *et al.* 2004). Resultados similares fueron reportados en habichuela, por Arunga *et al.* (2010), para las características número de vainas por planta, peso promedio de vainas y longitud de las vainas y Cunha Dias *et al.* (2016), para número de vainas por planta y longitud de las vainas en Caupi, indicando la posibilidad de ganancias con la selección.

La interacción G x A fue significativa ($P < 0,05$), para PPV y PPP, lo que explica el comportamiento diferencial de los genotipos al someterlos a ambientes. Algunos estudios, como los de Getachew *et al.* (2015), Mounir *et al.* (2015), Fayaz Ahmad *et al.* (2016) y Taha (2019), encontraron interacciones significativas entre los genotipos de *Phaseolus vulgaris*, en uno o más caracteres de interés. La interacción HCG x A fue significativa ($P < 0,05$), solo para el carácter PPV, indicando que los efectos de HCG cambian según el ambiente, lo que sugiere la necesidad de seleccionar progenitores, con efectos de HCG significativos, a través de los ambientes. En cuanto a la interacción HCE x A fue significativa ($P < 0,05$), solo para el carácter PPP, lo que indica que las combinaciones híbridas no mantienen sus efectos de HCE, a través de los ambientes.

En la participación de las fuentes de variación en la suma de cuadrados, para el carácter NVP (Tabla 2), se observó que la variación fenotípica fue explicada por el ambiente (A), con 55 %, seguido por el genotipo (G), con 14 % y en menor proporción la interacción G x A, con 6 %; para el carácter PPP, la variación fenotípica fue explicada por el ambiente (A), con 52 %, seguido por el genotipo (G), con 15 % y, en menor proporción, la interacción G x A, con 6 %. La fuente de variación ambiente (A) muestra que gran parte de la variación fenotípica fue debido a las variaciones ambientales que se presentaron. La mayor magnitud de la suma de cuadrados de los genotipos (G), en comparación con la interacción G x A, muestra la respuesta promedio diferente de los genotipos, por la divergencia genética y como su comportamiento se vio afectado por la oferta ambiental. Para los caracteres LDV y PPV, la mayor contribución a la suma de cuadrados fue dada por el genotipo (G), con 56 % y 64, respectivamente, seguido de la interacción GxA, con 4 y 6 %, respectivamente y, en menor proporción, el ambiente (A), con 2 y 4 %, respectivamente; estos resultados, se deben a la divergencia genética presente en los genotipos empleados, además de la oferta ambiental que favorece la expresión. La manifestación de estas diferencias supone la presencia de variabilidad genética entre los genotipos y se espera que sea de fundamental importancia para trabajos de esta naturaleza, como enfatizan Krause *et al.* (2012), Da Rocha *et al.* (2014), Machado (2014) y Pereira Leite *et al.* (2019).

La suma de cuadrados de los efectos genéticos de HCG fueron de mayor expresión en LDV (80 %) y PPV (69 %) y los efectos de HCE, lo fueron en NVP (85 %) y PPP (80 %). Estos resultados concuerdan con los reportados por Iqbal *et al.* (2011), Rodrigues *et al.* (2018) y Owusu *et al.* (2020), quienes encontraron que la acción genética no aditiva constituye el componente genético más importante del carácter número de vainas por planta (NVP), en Caupí y habichuela, pero difieren de los reportados por Arunga *et al.* (2010), Da Rocha *et al.* (2014) y Cunha Dias *et al.* (2016), quienes afirman que en el NVP los efectos de HCG son el componente más importante en Caupí y *Phaseolus*.

En el análisis de los componentes de varianza (Tabla 2), se confirmó que en el control genético de los caracteres NVP y PPP hubo predominio de los efectos no aditivos ($\frac{1}{15}\sum sij^2 = 7580,99$ y 0,25, respectivamente), sobre los aditivos ($\frac{1}{5}\sum gi^2 = 377,69$ y 0,02, respectivamente), por lo que se recomienda mejorar estos caracteres por hibridación. Por el contrario, para el carácter LDV, el componente de varianza, debido a la HCG ($\frac{1}{5}\sum gi^2$), contribuyó más a la variación genética, con un valor de 3,50, con relación al componente de varianza, debido a la HCE ($\frac{1}{15}\sum sij^2$), con 1,96; por lo tanto, se recomienda mejorar este carácter por selección, para así seguir acumulando genes deseables. Para PPV, los componentes de varianza, debidos a la HCG ($\frac{1}{5}\sum gi^2$) y HCE ($\frac{1}{15}\sum sij^2$) fueron igualmente importantes, ya que los componentes de varianza son prácticamente equivalentes con la ocurrencia de valores 1,00 y 1,09, respectivamente. Resultados similares obtuvieron Das *et al.* (2014) y Nayak *et al.* (2018), para este carácter; esto muestra que los progenitores se pueden utilizar en programas de mejoramiento, ya sea dentro de poblaciones, como entre poblaciones.

Efectos de la habilidad combinatoria general (\hat{G}_i). Las estimaciones de los efectos de habilidad combinatoria general se presentan en la tabla 3. Estos efectos determinan el desempeño promedio de cada progenitor en las combinaciones híbridas en las que participa y es una estimación de su valor genético (Vallejo & Estrada, 2013). Así, los progenitores con estimaciones de \hat{G}_i altas y positivas son los que más contribuyen al aumento de la expresión de la característica heredada genéticamente, mientras que aquellos con valores \hat{G}_i altos y negativos, contribuyen a la reducción de su manifestación. El conocimiento de la habilidad combinatoria, junto con el desempeño *per se*, es de gran utilidad para la mejora de cualquier carácter (Priya *et al.* 2018). Por lo tanto, los progenitores con los valores más altos de \hat{G}_i y buen desempeño *per se*, se podrían incluir en programas de mejoramiento genético, para cumplir con los objetivos de selección de nuevos cultivares y así lograr una mejora sustancial en el rendimiento y los componentes del rendimiento. Para el carácter número de vainas por planta (NVP), los progenitores 4 (G18212) y 5 (G16806) presentaron valores positivos y altos. El progenitor 5 (G16806) presentó el mayor valor promedio número de vainas por planta (130,81 vainas por planta), lo que indica que este progenitor es el más prometedor, para mejorar este carácter en habichuela.

Tabla 3. Estimativas de los efectos de habilidad combinatoria general (\hat{g}_i), en seis progenitores y efectos de habilidad combinatoria específica (\hat{S}_{ij}), en 15 híbridos de habichuela (*Phaseolus vulgaris* L). Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia -sede Palmira (CEUNP). 2019 – 2020.

Progenitores	Efectos \hat{g}_i			
	NVP	LDV	PPV	PPP
1. G17723	1,05	0,49	0,30	0,06
2. G23956	3,51	0,13	-0,01	0,03
3. G20400	-15,81	-0,23	-0,07	-0,09
4. G18212	8,30	-0,99	-0,62	-0,06
5. G16806	6,90	-0,31	0,00	0,04
6. G51158	-3,94	0,92	0,40	0,03
ES (\hat{g}_i)	14,47	0,06	0,03	0,02
Híbridos F1	Efectos \hat{S}_{ij}			
7. (1x2)	43,99	0,49	0,63	0,36
8. (1x3)	-41,51	0,06	-0,03	0,12
9. (1x4)	18,15	-0,54	-0,41	0,07
10. (1x5)	14,63	-0,17	0,06	0,18
11. (1x6)	-26,05	0,50	0,27	0,11
12. (2x3)	19,73	0,39	-0,03	0,06
13. (2x4)	22,62	-0,76	-0,18	0,08
14. (2x5)	-59,06	0,32	0,14	-0,01
15. (2x6)	27,60	0,30	0,42	0,10
16. (3x4)	-14,08	-0,27	-0,16	0,07
17. (3x5)	34,03	-0,25	-0,10	-0,08
18. (3x6)	-26,01	-0,31	0,03	0,07
19. (4x5)	3,19	0,28	0,25	0,16
20. (4x6)	10,79	-0,83	-0,71	-0,05
21. (5x6)	2,98	0,61	0,23	0,07
ES (\hat{S}_{ij})	43,99	0,22	0,12	0,09

NVP= número de vainas por planta; LDV= longitud de la vaina; PPV= peso promedio de vainas por planta y PPP= producción por planta; ES= Error estándar.

Los progenitores 5 (G16806) y 6 (G51158) mostraron efectos positivos para el carácter producción por planta (PPP) e, igualmente, exhibieron los mayores valores en producción *per se*. En ese sentido, la contribución de estos progenitores es significativamente superior al resto de progenitores. Dichos progenitores realizan una contribución genética positiva para aumentar el carácter producción por planta. En el caso de la habichuela, que es una planta autógama, esta importancia es aún mayor porque lo único que el mejorador puede aprovechar al final del proceso de mejora es la acción genética aditiva.

Para el carácter peso promedio de la vaina (PPV), los progenitores 1 (G17723) y 6 (G51158), tuvieron estimaciones altas y positivas de \hat{g}_i , además de promedios *per se* altos, lo que indica que estos progenitores podrían contribuir en el incremento del peso promedio de las vainas, ya que estas líneas tienen el potencial para transferir genes favorables a sus descendientes.

Para la longitud de la vaina (LDV), los progenitores 1 (G17723) y 6 (G51158) presentaron las estimaciones más altas y positivas de \hat{g}_i y un mayor valor promedio *per se*, aunque el progenitor 6 (G51158), se destacó por su alto promedio. Estas altas y positivas estimaciones de \hat{g}_i y promedio *per se* muestran una alta varianza aditiva, lo que convierte a estos progenitores en fuertes candidatos para producir buenas progenies. Estos resultados son similares a los encontrados por Gomes *et al.* (2019), quienes afirmaron que los efectos \hat{g}_i positivos son indicadores útiles para el carácter LDV y, posteriormente, sugirieron que estos podrían ser explotados para la obtención de líneas superiores de habichuela.

De forma general, se pudo observar que para los caracteres PPV y LDV, los progenitores 1 (G17723) y 6 (G51158), manifestaron efectos positivos y altos de HCG (acción de genes aditivos), mientras para el carácter NVP, fueron los progenitores 4 (G18212)

y 5 (G16806) y para el carácter PPP, lo fueron los progenitores 5 (G16806) y 6 (G51158), por tanto, se pueden utilizar como progenitores en un programa de hibridación, para obtener recombinantes superiores en la progenie.

Efectos de la habilidad combinatoria específica (\hat{S}_{ij}). En la tabla 3, se muestran las estimaciones de los efectos de HCE (\hat{S}_{ij}). Los efectos de \hat{S}_{ij} permiten identificar progenitores con buena complementariedad, teniendo en cuenta la frecuencia de genes con efectos no aditivos (Benin *et al.* 2009). Cruz *et al.* (2012) afirman que los híbridos más prometedores serán aquellos que muestren efectos elevados de HCE y que provienen del cruzamiento de progenitores divergentes, donde al menos uno de ellos tiene una HCG alta. De este modo, los híbridos 1×2 y 3×5 tuvieron los mayores efectos positivos de \hat{S}_{ij} y alto rendimiento *per se*, para el carácter número de vainas por planta (NVP), lo que confirma aún más la superioridad de la acción génica no aditiva en la herencia de este carácter. Los altos efectos de HCE, derivados de progenitores con HCG bajo × bajo y bajo × alto, pueden ser debidos a la complementación de loci, con valores altos y bajos de reducida combinación (Raut *et al.* 2017). De manera similar, la participación de dos combinadores pobres y un combinador pobre por uno alto también produjo cruzamientos potenciales, como se informó por Ayo-Vaughan *et al.* (2013) y Owusu *et al.* (2018), en Caupí, para el carácter número de vainas por planta.

Para el carácter producción por planta (PPP), las estimaciones positivas de \hat{S}_{ij} y rendimientos *per se* más altos pertenecen a los híbridos 1×2; 1×5; 1×6; 2×6; 4×5 y 5×6. Estos mismos híbridos mostraron, más allá de un valor de \hat{S}_{ij} alto, al menos, un progenitor con un valor de HCG alto, lo cual, es deseable. Estos resultados sugieren el importante papel de acción génica no aditiva en la herencia del carácter producción por planta. La HCE es principalmente una función de las varianzas de dominancia, que ayuda a identificar las combinaciones híbridas superiores para la explotación comercial de la heterosis. Resultados similares fueron reportados por Owusu *et al.* (2018), Nayak *et al.* (2018) y Priya *et al.* (2018).

Los resultados de la HCE, para el peso promedio de las vainas (PPV), mostraron que los híbridos 1×2, 1×6 y 2×6, registraron los valores más altos de \hat{S}_{ij} y rendimiento *per se*, en el que, al menos, uno o ambos progenitores tuvieron un valor positivo y alto de HCG, lo que indica que estas combinaciones híbridas tienen un alto potencial para avanzar a la homocigosidad, con una posterior selección de líneas fijas para este carácter. Estos resultados coinciden con los presentados por Rodrigues *et al.* (2016) y Nayak *et al.* (2018), quienes mostraron altos rendimientos en el carácter peso promedio de la vaina, a partir de progenitores con altas y bajas estimaciones de HCG y la posterior obtención de combinaciones híbridas sobresalientes.

En cuanto al carácter de longitud de vaina (LDV), los híbridos 1×2, 1×6 y 5×6 presentaron las estimaciones más altas de \hat{S}_{ij} y rendimientos *per se*. En estos cruzamientos intervienen, tanto líneas con alta HCG como con valores bajos y negativos. En este sentido,

los híbridos de mayor longitud fueron el resultado de cruzar dos líneas de altos efectos positivos de HCG (progenitores 1 y 6) y, al menos, una línea de alta HCG; combinaciones híbridas similares fueron obtenidas por Rodrigues *et al.* (2016), Owusu *et al.* (2018) y Priya *et al.* (2018). Por lo tanto, se establece que las combinaciones híbridas con valores altos de HCE se pueden considerar en un programa de mejoramiento genético por hibridación.

El análisis de la HCE mostró que el híbrido 1×2 fue el que presentó los valores más altos y positivos para todas las variables estudiadas. La combinación híbrida entre los progenitores 1 (G17723) y 2 (G23956) puede ser explotada en el futuro en un programa de mejoramiento, debido a su potencial para generar líneas superiores para producción y sus componentes.

Agradecimientos. Los autores expresan su especial agradecimiento a los Doctores Fredy A. Salazar Villareal y Myriam del Carmen Salazar Villareal. **Conflictos de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución de los autores:** Mayra Contreras Rojas, Franco Alirio Vallejo y Sanin Ortiz diseñaron los experimentos y revisaron el artículo. Mayra Contreras Rojas realizó el trabajo de campo, análisis de los datos y redacción del artículo. **Financiación:** Este estudio fue financiado por la División de investigación y extensión de la Universidad Nacional de Colombia -sede Palmira.

REFERENCIAS

- ALVES FRANCELINO, F.M.; DE AMARAL GRAVINA, G.; COIMBRA MANHÃES, C.M.; RIBEIRO CARDOSO, P.M.; CORDEIRO DE ARAÚJO, L. 2011. Evaluation of promising of snap bean to the North and Northwest Fluminense. *Revista Ciência Agronômica*. 42(2):554-562. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000200039>
- ARUNGA, E.E.; VAN RHEENEN, H.A.; OWUOCHE, J.O. 2010. Diallel analysis of Snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties for important traits. *African Journal of Agricultural Research*. 5(15):1951-1957.
- AYO-VAUGHAN, M.A.; ARIYO, O.J.; ALAKE, C.O. 2013. Combining ability and genetic components for pod and seed traits in cowpea lines. *Italian Journal of Agronomy*. 8(2):73-78. <https://doi.org/10.4081/ija.2013.e10>
- BAENA GARCÍA, D. 2012. Diseño de experimentos en investigación agropecuaria: Planeación, análisis e interpretación de resultados. Universidad Nacional de Colombia (Colombia).
- BARRAZA-ALVAREZ, F.V. 2021. La horticultura y su relación con las expresiones socioculturales que unen a los pueblos del mundo. *Hombre, Ciencia y Tecnología*. 25(3):1-7.

6. BENIN, G.; DA SILVA, G.O.; PAGLIOSA, E.S.; LEMES, C.; SIGNORINI, A.; BECHE, E.; CAPELIN, M.A. 2009. Capacidade de combinação em genótipos de trigo estimada por meio de análise multivariada. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 44(9):1145-1151.
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000900012>
7. CORDEIRO DE ARAÚJO, L.; DE AMARAL GRAVINA, G.; MARINHO, C.D.; COSTA DE ALMEIDA, S.N.; FIGUEIREDO DAHER, R.; TEIXEIRA DO AMARAL JÚNIOR, A. 2012. Contribution of components of production on snap bean yield. Crop Breeding and Applied Biotechnology. 12(3):206-210.
<https://doi.org/10.1590/S1984-70332012000300007>
8. CRUZ, C.D. 2020. Programa genes. aplicativo computacional em genética e estatística. Universidade Federal de Viçosa. Disponível desde Internet en: www.ufv.br/dbg/genes/genes.htm (con acceso 05/02/2021).
9. CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. 2004. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Volumen 1, tercera edición. Editora Universidade Federal de Viçosa. (Brasil). 480p.
10. CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. 2012. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Volumen 1, cuarta edición. Editora Universidade Federal de Viçosa (Brasil). 514p.
11. CUNHA DIAS, F.T.; CAMPOS DE MAGALHÃES BERTINI, C.H.; RODRIGUES FREIRE FILHO, F. 2016. Genetic effects and potential parents in cowpea. Crop Breeding and Applied Biotechnology. 16(4):315-320.
<https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a47>
12. DA ROCHA, F.; STINGHEN, J.C.; GEMELI, M.S.; COIMBRA, J.L.M.; GUIDOLIN, A.F. 2014. Diallel analysis as a tool when selecting parents for beans. Revista Ciência Agronômica. 45(1):74-81.
<https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000100010>
13. DA SILVA, M.P.; AMARAL JÚNIOR, A.T.; RODRIGUES, R.; DAHER, R.F.; LEAL, N.R.; SCHUELTER, A.R. 2004. Análise dialélica da capacidade combinatória em feijão-de-vagem. Horticultura Brasileira. 22(2):277-280.
<https://doi.org/10.1590/S0102-05362004000200022>
14. DAS, I.; SETH, T.; DURWAS, S.V.; DUTTA, S.; CHATTOPADHYAY, A.; SINGH, B. 2014. Gene action and combining ability for yield and yield component traits in Dolichos bean (*Dolichos lablab* var. *typicus*). Sabrao Journal of Breeding and Genetics. 46(2):293-304.
15. FAYAZ AHMAD, S.; PARVAIZ AHMAD, S.; SHABIR HUSSAIN, W.; MOHAMMAD NISAR, K.; ZAHOOR AHMED, D.; JAVEED AHMED, L. 2016. Stability analysis in bush type Rajmash (*Phaseolus vulgaris* L.) under temperate Kashmir conditions. International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology. 9(5):745.
<https://doi.org/10.5958/2230-732X.2016.00097.8>
16. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. 2021. FAOFAOSTAT. Base de datos, cultivos (producción). Disponible desde Internet en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL> (con acceso el 09/12/21).
17. GETACHEW, E.A.; MOHAMMED, A.; TESFAYE, A. 2015. Impact of sowing date and plant spacing on yield, quality and disease incidence of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties at Jimma Southwestern, Ethiopia. Global Advanced Research Journal of Educational Research and Review. 4(5):81-89.
18. GLOVER, M.A.; WILLMOT, D.B.; DARRAH, L.L.; HIBBARD, B.E.; ZHU, X. 2005. Diallel analyses of agronomic traits using Chinese and US maize germplasm. Crop Science. 45(3):1096-1102.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0493>
19. GOMES, A.B.S.; OLIVEIRA, T.R.A.; GRAVINA, G.A.; CRUZ, D.P.; SANT'ANNA, C.Q.S.S.; DAHER, R.F.; ARAÚJO, L.C.; ARAÚJO, K.C.; OLIVEIRA, G.H.F.; ROCHA, R.S.; PEREIRA, I.M. 2019. Combining ability in snap bean lines in Brazil. Genetics and Molecular Research. 18(2):1-9. <https://doi.org/10.4238/gmr18214>
20. GRIFFING, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. Australian Journal of Biological Sciences. 9(4):463-493.
<https://doi.org/10.1071/BI9560463>
21. IQBAL, A.M.; NEHVI, F.A.; WANI, S.A.; HENNA, Q.; DAR, Z.A.; LONE, A.A. 2011. Genetic studies in relation to yield and quality traits in rajmash (*Phaseolus vulgaris* L.). Journal of Plant Breeding and Crop Science. 3(1):8-13.
22. KRAUSE, W.; RODRIGUES, R.; LEAL, N.R. 2012. Capacidade combinatória para características agronômicas em feijão-de-vagem. Revista Ciência Agronômica. 43(3):522-531.
<https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000300015>
23. MACHADO, A.T. 2014. Construção histórica do melhoramento genético de plantas: do convencional ao participativo. Revista Brasileira de Agroecologia. 9(1):35-50.
24. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL - MADR. 2021. Agronet. Obtenido de Área,







- producción y rendimiento nacional por cultivo. Disponible desde internet en:
<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?c od=1> (con acceso 08/12/21).
25. MOUNIR, A.M.; EL-YAZID, A.A.; ORABI, I.O.A.; ZAHARAN, A.A.; EL-OKSH, I.I. 2015. Effect of sowing date, gamma irradiation and intracultivar differences on growth, pod characteristics and some endogenous plant growth regulators in snap Beans. *World Journal of Agricultural Sciences*. 11(6):380-390.
<https://doi.org/10.5829/idosi.wjas.2015.11.6.1891>
 26. NAYAK, N.J.; MAURYA, P.K.; MAJI, A.; MANDAL, A.R.; CHATTOPADHYAY, A. 2018. Combining ability and genetic control of pod yield and component traits in dolichos bean. *International Journal of Vegetable Science*. 24(4):390-403.
<https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1423598>
 27. ORTIZ GRISALES, S.; VALDÉS RESTREPO, M.P.; VALLEJO CABRERA, F.A. 2020. Efecto de la endocria sobre habilidad combinatoria del rendimiento y calidad en zapallo (*Cucurbita moschata* Duchesne). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 23(1):e1176.
<https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n1.2020.1176>
 28. OWUSU, E.Y.; AMEGBOR, I.K.; DARKWA, K.; OTENG-FRIMPONG, R.; SIE, E.K. 2018. Gene action and combining ability studies for grain yield and its related traits in cowpea (*Vigna unguiculata*). *Cogent Food & Agriculture*. 4(1):1519973.
<https://doi.org/10.1080/23311932.2018.1519973>
 29. OWUSU, E.Y.; MOHAMMED, H.; MANIGBEN, K.A.; ADJEBENG-DANQUAH, J.; KUSI, F.; KARIKARI, B.; SIE, E.K. 2020. Diallel analysis and heritability of grain yield, yield components, and maturity traits in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *The Scientific World Journal*. 2020:9390287.
<https://doi.org/10.1155/2020/9390287>
 30. PANDEY, Y.R.; GAUTAM, D.M.; THAPA, R.B.; SHARMA, M.D.; PAUDYAH, K.P. 2011. Variability of French bean in the western mid hills of Nepal. *Kasetsart Journal Natural Science*. 45:780-792.
 31. PEREIRA DA SILVA, V.P.; APARECIDO BARELLI, M.A.A.; FELIPIN-AZEVEDO, R.; PARISOTTO POLETINE, J.P.; SANTOS BERNINI, C. 2020. Agronomic Performance and Heterosis in Common Bean Genotypes. *Journal of Agricultural Studies*. 8(4):387-399.
<https://doi.org/10.5296/jas.v8i4.17329>
 32. PEREIRA LEITE, P.H.M.; PEREIRA DA SILVA, V.; SANTANA GILIO, T.A.; AZEVEDO, R.F.; CARVALHO DE OLIVEIRA, T.C.; APARECIDO BARELLI, M.A.A. 2019. Diversidade genética em cultivares e linhagens de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizando análises multivariadas. *Revista Cultura Agronômica*. 28(3):268-279.
<https://doi.org/10.32929/2446-8355.2019v28n3p268-279>
 33. PRIYA, R.D.; THANGARAJ, K.; GNANAMALAR, R.P.; SENTHIL, N. 2018. Combining ability studies for grain yield and its component traits in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *Electronic Journal of Plant Breeding*. 9(3):941-947.
<https://doi.org/10.5958/0975-928X.2018.00117.5>
 34. RAUT, D.M.; TAMNAR, A.B.; BURUNGAL, S.V.; BADHE, P.L. 2017. Half diallel analysis in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 6(7):1807-1819.
<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.607.218>
 35. REIS FILGUEIRA, F.A. 2013. Parte II-Olericultura especial. Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Tercera edición. Editora Universidade Federal de Viçosa (Brasil). 421p.
 36. RODRIGUES, E.V.; DAMASCENO-SILVA, K.A.; DE MOURA ROCHA, M.; ALVES BASTOS, E.; DOS SANTOS, A. 2018. Diallel analysis of tolerance to drought in Cowpea genotypes. *Revista Caatinga Mossoró*. 31(1):40-47.
<https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n105rc>
 37. RODRIGUES, E.V.; DAMASCENO-SILVA, K.J.; ROCHA, M.M.; BASTOS, E.A. 2016. Diallelic analysis to obtain cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) populations tolerant to water deficit. *Genetics and Molecular Research*. 15(2).
<https://doi.org/10.4238/gmr.15027996>
 38. SÁNCHEZ DEL CASTILLO, F.; DURÁN PAREDES, M.G.; MORENO PÉREZ, E.D.C.; MAGDALENO VILLAR, J.J. 2017. Variedades y densidades de población de frijol ejotero cultivado bajo invernadero e hidroponía. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8(5):1187-1193.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.117>
 39. TAHA, N.M. 2019. Genotype × environment interaction and stability analysis for some economic characters in snap bean. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*. 27(2):1541-1558.
<https://doi.org/10.21608/AJS.2019.11880.1016>
 40. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. 2019. Disponibilidad y consumo de alimentos del USDA. Disponible desde internet en:
<https://www.ers.usda.gov/data-products/ag-and-food-statistics-charting-the-essentials/food-availability-and-consumption/> (con acceso 12/07/2021).

41. VALLEJO, F.A.; ESTRADA, E.I. 2013. Mejoramiento genético de plantas. Segunda edición. Universidad Nacional de Colombia (Colombia). 456p.
42. VIDYAKAR, V.; LAL, G.M.; SINGH, M.K.; KUMAR, A. 2017. Study on genetic diversity in French bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, New Delhi. 6(6):184-187.
43. WHANKATE, R.A.; GARANDE, V.K.; SHINDE, U.S.; DHUMAL, S.S.; SONAWANE, P.N.; SARVADE, S.A.; AMBAD, S.N. 2021. Growth and yield performance of french bean (*Phaseolus vulgaris* L.) germplasm under sub-montane zone of Maharashtra. Legume Research: An International Journal. 44(2):138-144. <https://doi.org/10.18805/LR-4249>
44. YANCHUK, A.D. 1996. General and specific combining ability from disconnected partial diallels of coastal douglas-fir. Silvae Genetica. 45(1):37-45.



Caracterización física y sensorial de 24 genotipos especiales de cacao *Theobroma cacao*

Physical and sensory characterization of 24 special cocoa genotypes *Theobroma cacao*

Lucero Gertrudis Rodríguez-Silva¹ ; Lucas Fernando Quintana-Fuentes² ; Roberto Antonio Coronado-Silva¹ ;
Alberto García-Jerez² ; Eliana Yadira Báez-Daza^{1*} ; Genaro Andrés Agudelo-Castañeda¹ 

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, Centro de Investigación La Suiza. Rionegro - Santander, Colombia; e-mail: lgrodriguez@agrosavia.co, rcoronado@agrosavia.co; ebaez@agrosavia.co; gagudelo@agrosavia.co

²Universidad Abierta y a Distancia - UNAD. Bucaramanga - Santander, Colombia; e-mail: lucas.quintana@unad.edu.co; alberto.garcia@unad.edu.co

*autor de correspondencia: ebaez@agrosavia.co

Cómo citar: Rodríguez-Silva, L.G.; Quintana-Fuentes, L.F.; Coronado-Silva, R.A.; García-Jerez, A.; Báez-Daza, E.Y.; Agudelo-Castañeda, G.A. 2023. Caracterización física y sensorial de 24 genotipos especiales de cacao *Theobroma cacao*. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2410. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2410>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: enero 21 de 2022

Aceptado: junio 16 de 2023

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Colombia, se destaca como país productor de cacao fino y de aroma, por lo cual, resulta de gran importancia explorar las características físicas y sensoriales de la diversidad genética existente. Para el presente estudio, se seleccionaron 22 genotipos de colecciones de trabajo con atributos productivos sobresalientes y dos testigos comerciales, reconocidos por su productividad y calidad sensorial; las muestras evaluadas fueron tomadas, de acuerdo con un muestreo aleatorio simple y se realizó un proceso de poscosecha homogéneo, controlado e independiente por genotipo, para obtener muestras de cacao seco individuales. Se realizaron análisis físicos al grano de cada genotipo y se preparó licor de cacao con cada una de las muestras obtenidas. Posteriormente, se evaluó cada licor por medio del panel de evaluación sensorial entrenado, donde se identificó y cuantificó la intensidad de atributos básicos, atributos especiales y atributos adquiridos, característicos de cada muestra. La información fue analizada mediante estadística descriptiva y análisis de componentes principales, lo que permitió la identificación de tres genotipos sobresalientes por el índice de grano y el porcentaje de cascarilla. El análisis sensorial evidenció que, en diecisiete genotipos, predominaron los atributos especiales, como herbal, floral, frutal, frutos secos y dulce. Estos resultados son un aporte importante para la selección de nuevas variedades de

alta productividad, con características sensoriales de interés para la comercialización, que pueden ser evaluadas en diferentes regiones, para aumentar la disponibilidad genética en futuros programas de renovación y siembra de cacao que está en expansión, en los distintos territorios del país.

Palabras clave: Análisis sensorial; Calidad del cacao; Fitomejoramiento; Genotipos promisorios; Licor de cacao.

ABSTRACT

Colombia stands out as a country that produces fine and aroma cocoa; therefore, it is of great importance to explore the physical and sensory characteristics of the existing genetic diversity. For the present study, 22 genotypes from working collections with outstanding productive attributes and two recognized commercial controls were selected and evaluated for its productivity and sensory quality; the evaluated samples were taken according to a simple random sampling and a homogeneous, controlled, and independent post-harvest process was carried out by genotype, to obtain individual dry cocoa samples. Physical analyzes were carried out on the grain of each genotype and cocoa liquor was prepared with each of the samples obtained. Subsequently, each liquor was evaluated by means of the trained sensory evaluation

panel, where the intensity of basic attributes, special attributes and acquired attributes characteristic of each sample was identified and quantified. The information was analyzed through descriptive statistics and principal component analysis, which allowed the identification of three outstanding genotypes by the grain index, and the husk percentage. The sensory analysis showed that, in seventeen genotypes, special attributes predominated such as: herbal, floral, fruity, dried fruit and sweet. These results are an important contribution for the selection of new high productivity varieties with sensory characteristics of interest for commercialization, which can be evaluated in different regions, to increase genetic availability in future renewal and planting programs of cocoa that is expanding in the different territories of the country.

Keywords: Cocoa liquor; Cocoa quality; Plant breeding; Promising genotypes; Sensory analysis.

INTRODUCCIÓN

El cacao *Theobroma cacao* L. (Malvaceae) es originario de la región amazónica, donde se encuentra una alta diversidad natural de la especie (Zhang & Motilal, 2016). En Colombia, el cultivo de cacao ocupa un área de 194.428 ha (MADR - CNC, 2021), con una producción de 69.040 t, para el 2021 (Fedecacao, 2022) y una proyección de incremento, para el 2030, que puede llegar a 160.000 t, con un rendimiento promedio de 470 kg ha⁻¹ (Jaimes Suárez *et al.* 2021). La producción de cacao es una actividad productiva de importancia para el sector agrícola, considerado como uno de los principales productos que aporta a la economía del departamento de Santander, con una producción de 28.037 t, en el 2021, equivalente al 41 % de la producción Nacional (Fedecacao, 2021).

Según la Organización Internacional del Cacao - ICCO (por sus siglas en inglés), el cultivo de cacao en Colombia es catalogado como fino aromatizado (ICCO, 2020), involucrando a más de 65.341 familias y 30 departamentos en la producción, resaltando a Santander, como el de mayor producción (PROCOLOMBIA, 2020). Colombia, se caracteriza como productor de cacao y, a su vez, como consumidor, lo cual, conlleva al desarrollo empresarial y su implementación, como nuevas alternativas de producción y sustitución de cultivos ilícitos (Ramírez Montañez *et al.* 2019).

El cacao es un cultivo con diversidad genética amplia en la que se encuentran tres grupos genéticos principales: 1) el grupo de los criollos, caracterizados por su rugosidad en el fruto con forma alargada y coloración verde y rojo, que cambian a color amarillo y naranja cuando obtiene la madurez fisiológica; las almendras son de color blanco o crema con atributos sensoriales predominantes a nuez, amargo suave y notas afrutadas; 2) el grupo de los Forasteros, que presentan frutos amelonados de color verde, en estado inmaduro y amarillo, cuando madura, las almendras son pequeñas y de color púrpura o morado; 3) el grupo tipo Trinitarios, que son producto de cruzamientos naturales y controlados entre los Criollos y Forasteros; este grupo presenta una gran diversidad en color, forma del fruto, tamaño de semillas y coloración interna de la almendra, encontrando variaciones entre crema hasta púrpura (Ríos *et al.*

2017; Ramírez-Guillermo *et al.* 2018); sin embargo, Motamayor *et al.* (2008) realizaron un estudio donde encontraron 10 grandes grupos amelonado, Contamana, Criollo, Curaray, Guiana, Iquitos, Maraño, Nacional, Nanay, Purús, que determinan la diversidad genética de *Theobroma cacao* y ratifican que la especie es originaria del triángulo amazónico.

El cacao presenta alta diversidad genética, la que, en su mayor parte, es conservada en bancos de germoplasma; este recurso genético es un insumo para investigaciones y selección de genotipos con características sobresalientes, como: índice de grano, número de mazorcas por árbol, calidad sensorial, resistencia a enfermedades e identificación de nuevos grupos genéticos, factores de suma importancia para los programas de mejoramiento genético (González-Orozco *et al.* 2022). Como resultado de las diferentes estrategias para mejorar la cadena productiva de cacao, en Agrosavia, Centro de Investigación la Suiza, se han desarrollado procesos de selección de genotipos de cacao, denominados con la sigla TCS (*Theobroma Corpoica la Suiza*), producto de investigaciones previas y selección participativa. Estos genotipos presentan genética de tipo criollo, trinitario y forastero, los cuales, se destacan por presentar índice de grano > 1,2, alta productividad, tolerancia a enfermedades y calidad sensorial diferenciadora, lo que permite contribuir a mejorar la productividad y competitividad y posesionar a Colombia con cacao de calidad, en los diferentes mercados (Báez-Daza *et al.* 2022).

Asimismo, el grano de cacao se puede diferenciar, de acuerdo con el mercado, donde se encuentran tipos de cacao corriente y especial (fino y de aroma). El cacao especial proviene de genotipos Criollos o Trinitarios, mientras que el cacao corriente, de cultivares Forasteros, con algunas excepciones, dependiendo de la región donde se cultiva y los procesos de poscosecha que se realizan (Finagro, 2018). A partir de la producción y la comercialización, se identifica una estrategia para la oferta de cacaos especiales en donde están vinculados países, como Perú, Ecuador, Colombia y República Dominicana (Sánchez *et al.* 2019); sus objetivos principales es la generación de políticas que impulsen la cadena de valor y el mejoramiento en la comercialización (Ríos *et al.* 2017).

Los cacaos especiales se comercializan con precios diferenciadores, representando el 5 % de la oferta mundial, que son muy apetecidos internacionalmente, por sus características organolépticas, para elaboración de productos premium. Estas tendencias se dan por nuevas corrientes de consumo del chocolate, donde los consumidores buscan alimentos con menos concentraciones de azúcar y mayor proporción de la materia prima que, en este caso, es el cacao, lo que conlleva a que el cacao de alta calidad sea mejor valorado económicamente (Sánchez *et al.* 2019).

El chocolate está entre los alimentos más apetecidos por los consumidores, el mismo que es obtenido a partir de semillas de cacao, que son sometidas a procesos de poscosecha y transformación, como fermentación, secado, tostado y molienda (Delgado *et al.* 2018). Dentro del proceso de fermentación, los granos de cacao frescos (sin fermentar) están compuestos por una pulpa que recubre

la almendra, que presenta altos contenidos de azúcares y ácido cítrico, que favorecen los procesos fermentativos por medio de las levaduras, en donde se desarrolla el ácido acético y etanol y esta primera etapa es denominada anaeróbica; una segunda etapa, que se desarrolla es la fase aeróbica, donde se provoca aireación al grano por medio de volteos periódicos a la masa que se encuentra en proceso de fermentación.

Posteriormente, inicia la proliferación de bacterias ácido-acéticas (BAA) encargadas de la oxidación de etanol, que se convierten en ácido acético y acetato de etilo; estos procesos bioquímicos producen cambios en las variables fisicoquímicas, como pH, acidez, % fermentación y elevación de la temperatura, que influyen en el desarrollando de los precursores de sabor y aroma (García-González *et al.* 2021). En este proceso bioquímico se forman los compuestos volátiles y se da la oxidación del cotiledón, lo que conlleva a la pérdida de polifenoles, que contribuyen a la reducción del amargo y la astringencia (Rojas-Rojas *et al.* 2021). La expresión del sabor en los granos de cacao se da posterior al tostado, mediante diversas reacciones, en la que se destaca la de Maillard, la cual, contribuye en la presencia de sabor y aroma a nuez y es activada con la presencia de temperaturas altas; sin embargo, en temperaturas entre 30 a 50 °C, también se favorece esta reacción (Rodríguez-Sierra *et al.* 2022). Lo anterior, genera la caramelización de los azúcares, degradación de la proteínas, activación y formación de compuestos volátiles, reacciones que dan origen al color, sabor y aroma del producto final y que serán percibidos en el análisis sensorial (Domínguez-Pérez *et al.* 2019).

La evaluación de la calidad de los granos de cacao presenta diferentes enfoques, considerados relevantes las características físicas, químicas y sensoriales (Quelal-Vásconez *et al.* 2020). Estas caracterizaciones son realizadas, a través de técnicas y metodologías, que pueden definir la identidad de este producto agroalimentario. El análisis sensorial es una metodología, que permite caracterizar organolépticamente los atributos de sabor y aroma, que componen las almendras de cacao; esta metodología debe estar ejecutada bajo un panel capacitado, que permita obtener datos válidos, certeros y sin variabilidad (Lemarcq *et al.* 2021). Los atributos sensoriales que caracterizan un chocolate son determinados por evaluadores expertos, que constituyen un panel y realizan el análisis sensorial; en Colombia, se sigue la guía técnica colombiana GTC 165 (Icontec, 2014). El perfil de sabor evaluado por un panel se realiza en tres pasos: i) Evaluación de olor y apariencia física, ii) Percepción de sabores y atributos y iii) Evaluación de post-gusto (Lemarcq *et al.* 2021).

Teniendo en cuenta la necesidad de profundizar el conocimiento sobre la diversidad genética de cacao existente en el país y algunos resultados de investigaciones previas, se determinaron las características físicas y atributos sensoriales, predominantes de 24 genotipos de cacao, para responder a la demanda de la cadena de cacao en la generación de nuevos genotipos, con cualidades diferenciadoras y de alta calidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. El estudio fue realizado en el laboratorio de química y análisis sensorial de Agrosavia, Centro de Investigación la Suiza, con ubicación geográfica a 7°22'12" N 73°11'39" O, a 550 m s.n.m, con precipitaciones promedio de 2.000 mm anuales y temperatura media de 30 °C, ubicado en el km 32 vía al mar, vereda Galápagos en Rionegro Santander (Báez-Daza *et al.* 2022). Las muestras fueron recolectadas en parcelas de investigación del mismo centro, entre 2017 y 2019.

Material vegetal. Se utilizaron 24 genotipos de cacao, de los cuales, 22 hacen parte de una colección de trabajo, producto de selección natural participativa. Cuatro de ellos son oferta tecnológica disponible para los agricultores, los cuales, están identificados como Theobroma Corpoica La Suiza – TCS: TCS 01, TCS 06, TCS 13 y TCS 19; 17 genotipos, se encuentran en procesos de evaluación, identificados como TCS 02, TCS 04, TCS 05, TCS 08, TCS 10, TCS 11, TCS 12, TCS 20, TCS 40, TCS 41, TCS 42, TCS 44, TCS 45, TCS 46, TCS 47, TCS 48 y TCS 49, un genotipo producto de cruzamiento dirigido identificado, como TCS 03 y dos genotipos utilizados de referencia internacional, denominados Colección Castro Naranjal – CCN; CCN 51 e Imperial Collage Selection - ICS; ICS 95 (Quintana Fuentes *et al.* 2015). Todos los frutos colectados provienen de parcelas de investigación en el C.I. La Suiza, cosechados cuando presentaron madurez fisiológicamente óptima, libres de patógenos, plagas y daños naturales.

Procesamiento de muestras. Se realizó un muestreo de frutos maduros, donde se extrajo el grano fresco, para iniciar proceso de fermentación por separado a cada genotipo, utilizando la metodología de microfermentación, mediante el uso de incubadora marca MEMMERT IN 450, ajustado a los procesos fermentativos del grano de cacao y alcanzando porcentajes de fermentación superiores al 75 %. El proceso de secado fue realizado de forma natural a libre exposición, hasta obtener una deshidratación del 7% de humedad, parámetro determinado, de acuerdo con la norma NTC 1252 de 2021 (Icontec, 2021a); este registro se realizó con el medidor de humedad portátil marca COFFE PRO MOISTURE-MAC.

Análisis Físico. El análisis físico es aplicado a 300 granos bajo la norma NTC 1252 de 2021 (cacao en grano, especificaciones y requisitos de calidad), la cual, determina el índice de grano (Peso seco promedio de un grano), porcentaje de cascarilla y almendra, bajo el método de recuento de granos para el cacao de comercialización nacional. Los valores de porcentaje de cascarilla y almendra, se obtuvieron a partir del peso de 100 granos de cacao, utilizando la balanza de precisión marca Santorius, CPA323S, labor realizada por triplicado. El índice de grano se determinó mediante la fórmula de Báez-Daza *et al.* (2022):

$$\text{Índice de grano} = \frac{\text{Peso total de 100 granos de cacao}}{100}$$

Para la determinación del porcentaje de cascarilla y almendra se tomaron 100 granos previamente pesados, a los cuales, se les retiró la cascarilla o testa y se calculó el porcentaje, aplicando las fórmulas de Báez-Daza *et al.* (2022):

$$\text{Porcentaje de cascarilla} = \frac{\text{Peso cascarilla} * 100}{\text{Peso total de 100 granos completos}}$$

$$\% \text{ cotiledón} = \frac{\text{Peso cotiledón} * 100}{\text{Peso total de 100 granos completos}} \text{ cotiledón}$$

Obtención de licor de cacao. En la preparación de las muestras por cada genotipo se utilizaron granos de cacao fermentado y seco, con el uso de una guillotina marca MAGRA 12; se realizó corte transversal a los granos quedando expuesta la parte interna para separar los granos bien fermentados, lo que permitió obtener el porcentaje de fermentación de cada muestra. Finalmente, se seleccionó una muestra de 250 g por genotipo con granos bien fermentados, para obtener la mayor expresión sensorial del recurso genético; estas muestras fueron tostadas y descascarilladas.

El proceso de tostado de las muestras se realizó mediante el uso de un tostador marca Caffemat, que permite la transferencia de energía a la masa, con una temperatura de 110 °C, durante 12 minutos, realizando reacciones químicas, que se evidencian con cambios en las características físicas, químicas y sensoriales.

Para el descascarillado de grano se utilizó un equipo marca Cocoa Town, que permitió la separación de la cascarilla de los nibs. Este proceso se efectuó minuciosamente, con el fin de evitar la presencia de cascarilla, ya que estas pueden generar amargor y astringencia en el licor de cacao (Quintana Fuentes & García Jerez, 2021).

Los nibs de cada una de las muestras en evaluación fueron procesados en un molino de piedras marca Cocoa Town, que permite la obtención de licor de cacao, con una granulometría aproximada entre 20 a 30 μ (Quintana Fuentes & García Jerez, 2021).

Con el apoyo del panel sensorial del Centro de Investigación La Suiza, AGROSAVIA, conformado por once evaluadores y un juez experto, se realizó la evaluación sensorial, bajo la normativa vigente GTC 165 del 2014 (Icontec, 2014). Para la conformación de este panel se surtieron procesos de preselección de candidatos, selección y formación de jueces, de acuerdo con las normas NTC 5278 del 2004 (Icontec, 2004), GTC 280 del 2017 (Icontec, 2017), NTC 3929 del 2021 (Icontec, 2021b), GTC 232 del 2020 (Icontec, 2020) y la NTC 3501 de 2012 (Icontec, 2012).

Con base en las normativas mencionadas, se estableció el protocolo de análisis sensorial, que se utilizó para la evaluación de los atributos sensoriales de licor de cacao, que contempló un análisis descriptivo cualitativo por consenso, donde los panelistas cuantificaron la percepción de los sabores básicos de amargor, astringente, acidez; atributos complementarios de cacao, frutal, floral, frutos secos, dulce, herbal y otros y defectos o sabores atípicos, como sobre fermentado, verde, pizarroso, entre otros, con base en una escala de 0 a 10 (Cacao of Excellence, 2021; Icontec, 2021b). Los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva y análisis de componentes principales, utilizando el software XLSTAT 2021.3.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad física del grano. Los resultados promedio de la variable índice de grano generan valores desde 1,3 hasta 2,2 g, identificándose claramente tres genotipos con un índice de grano superior; por tanto, cabe mencionar que todos los genotipos

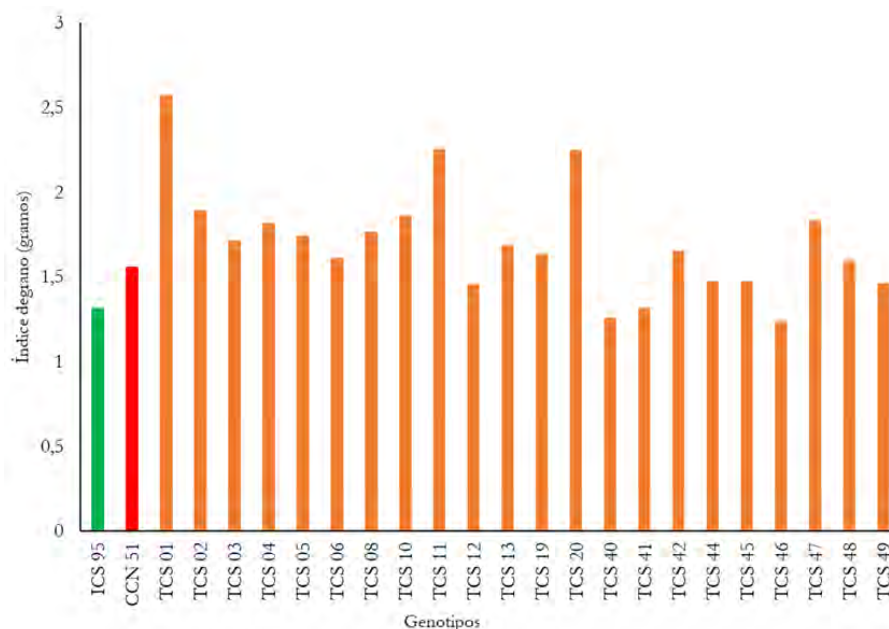


Figura 1. Índice de grano en los 22 genotipos TCS (*Theobroma Coripoica* La Suiza) y 2 genotipos universales CCN 51 (Colección Castro Naranjal), ICS 95 (Imperial College Selection).

presentaron un tamaño de grano superior a 1,2 g (Figura 1). Lo anterior, determina que los genotipos de cacao evaluados son de buena calidad comercial, catalogados como “premium”, ya que cumplen con los requerimientos de la Norma (Icontec, 2021a).

Los resultados obtenidos son acordes con los estudios realizados por Puentes-Páramo *et al.* (2014), quienes reportan índices de grano para CCN 51, de 1,6 g y para ICS 95, de 1,3 g; asimismo, estudios realizados por Nazario *et al.* (2013), donde evaluaron ocho genotipos de cacao, reportan que los genotipos CCN 51 e ICS 95 tienen un índice de grano de 1,4 y 1,3 g, respectivamente.

El análisis demuestra la variabilidad de los 24 genotipos evaluados en cuanto al índice de grano, los cuales, se pueden agrupar en tres patrones, de acuerdo con esta variable; en el primer patrón, se encuentran aquellos genotipos considerados de grano pequeño, con un índice entre 1,2 y 1,5 g en seco; en el segundo patrón, genotipos de grano intermedio, con índices entre 1,5 y 1,9 g y un tercer patrón, aquellos genotipos de grano grande, con índice mayor a 2 g. Estos resultados concuerdan con los estudios realizados por Quintana Fuentes *et al.* (2015), donde clasificaron tres genotipos de cacao, de acuerdo con el tamaño de grano, estableciendo rangos

de tamaño pequeño, con índice de grano inferior a 1,3 g, tamaño mediano, con rangos entre 1,3 a 1,7 g y tamaño alto, con valores superiores a 1,7 g.

El porcentaje de cascarilla es otro indicador de calidad física del grano de cacao de los genotipos evaluados, en donde a menor porcentaje de cascarilla indica un mayor rendimiento (González-Alejo *et al.* 2019). De acuerdo con el genotipo varía la proporción de cascarilla, lo que permite establecer categorías de porcentajes, como alto >13 %, medio 11-12 % y bajo <11 % (García-Jerez *et al.* 2022). En la figura 2, se observa un rango que oscila entre el 11,20 a 15,32 %, para los genotipos evaluados. Los resultados indican que los genotipos que se destacan por presentar porcentajes inferiores al 13 % son el TCS 01, TCS 03, TCS 05, TCS 06, TCS 08, TCS 10, TCS 11, TCS 19, TCS 20, TCS 40 y TCS 45, lo cual, permite proyectar un buen rendimiento para los procesadores de cacao y garantizar rendimientos en los procesos de transformación (García-Jerez *et al.* 2022). Estos resultados coinciden con los estudios realizados por Quintana Fuentes *et al.* (2015), donde se indica que los valores de porcentaje superiores al 13 % son considerados como altos; asimismo, encontraron que el ICS 95 y CCN 51 presentan contenidos de cascarilla, con valores de 13 y 12 %, respectivamente.

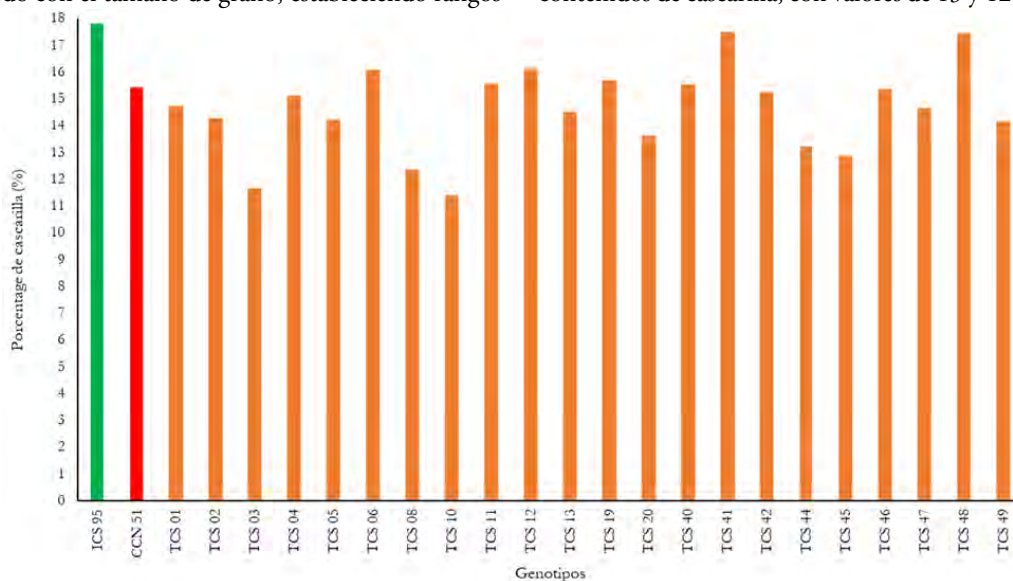


Figura 2. Porcentaje de cascarilla cuantificado en los 22 genotipos *Theobroma Coripoica* La Suiza - TCS y 2 genotipos universales, el Colección Castro Naranjal - CCN 51 y el Imperial College Selection - ICS 95.

Perfil sensorial para los 24 genotipos de cacao. El perfil sensorial para cada genotipo está representado por la gráfica radial “telaraña”, donde se puede evidenciar la puntuación de los atributos sensoriales (amargor, acidez, astringente, cacao, dulce, floral, frutal y otros).

En los sabores básicos se obtuvieron un puntaje máximo de 5, en el rango de la escala de 0 a 10 puntos, para las sensaciones de acidez, amargor, astringencia y cacao, destacándose los genotipos TCS 05, TCS 08, TCS 10, TCS 11, TCS 13, TCS 19, TCS 47 y TCS 49, con mayor puntaje en estas cualidades; sin embargo, esta valoración es considerada de intensidad media, con acidez tipo frutal, lo que no afecta negativamente el perfil sensorial. En los atributos complementarios, se observa que las notas a frutos secos y

frutal se cuantificaron con una calificación máxima de 5 puntos; las notas de dulzor hasta 4 puntos; las sensaciones florales, herbal hasta 3 puntos y las notas a especiado, se percibieron en un valor máxima de 2 puntos, donde se destaca el genotipo TCS 11 (Figura 3). Estas cualidades sensoriales se pueden interpretar como resultado de la genética y el correcto uso de los procesos de postcosecha ejecutados. En un estudio realizado con los cultivares FEAR 5 y CCN 51, cosechados en el departamento de Arauca (Colombia), mejoraron sus características organolépticas en aromas a nuez, dulzor, frutal y floral, por efecto de la fermentación controlada con adición de reactivos con ácido acético y ácido láctico respecto a la fermentación tradicional; sin embargo, la acidez siempre estuvo en niveles altos (Santander *et al.* 2021).

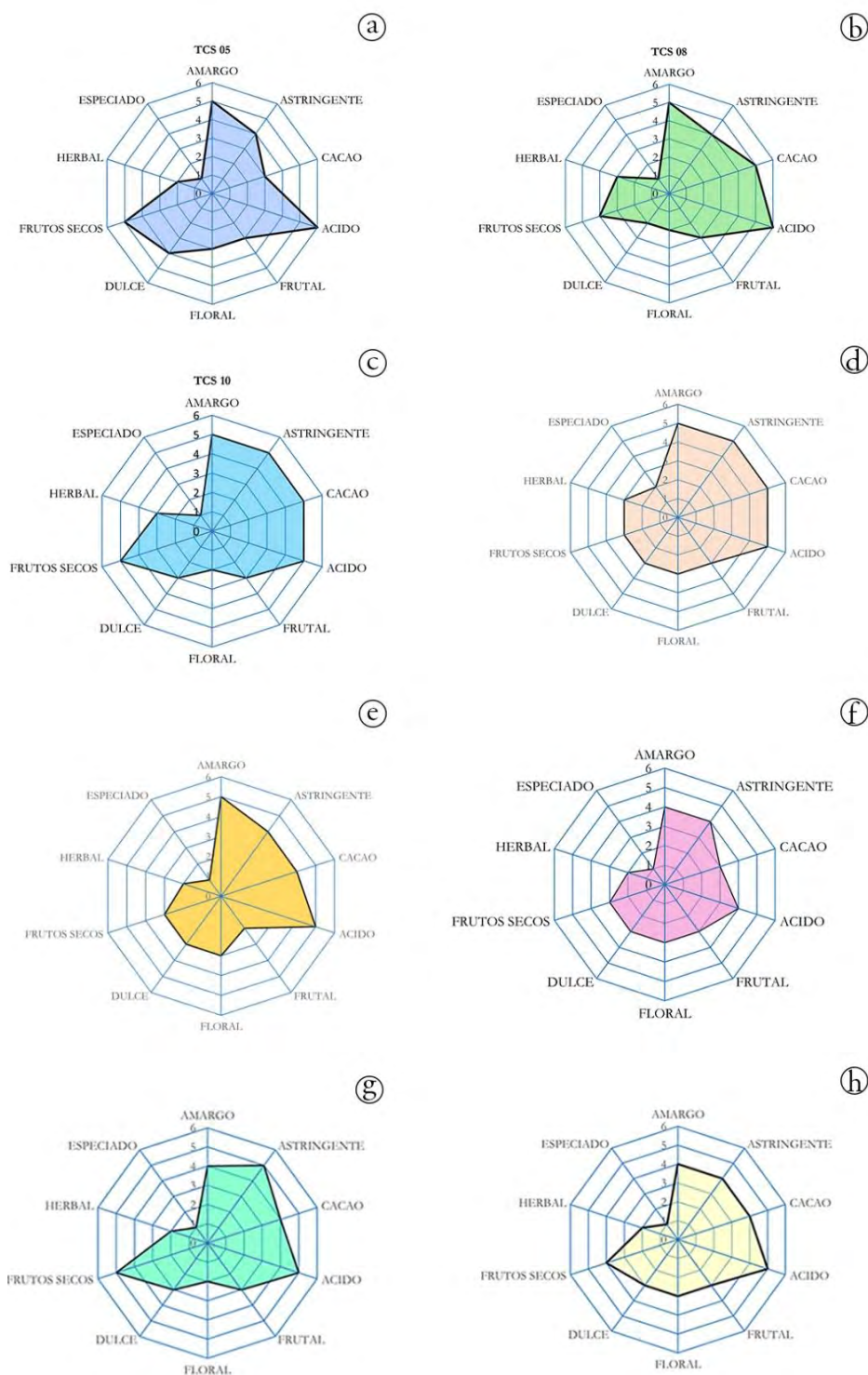


Figura 3. Genotipos de cacao con mayor calidad sensorial en cuanto a sabores básicos, atributos de aroma y sabor, de acuerdo con el análisis sensorial para los 22 genotipos TCS (*Theobroma Corpoica* La Suiza) y 2 genotipos universales CCN 51 (Colección Castro Naranjal), ICS 95 (Imperial College Selection). a) TCS 05; b) TCS 08; c) TCS 10; d) TCS 11; e) TCS 13; f) TCS 19; g) TCS 47; h) TCS 49.

El análisis de componentes principales (ACP) muestran la variabilidad de los 24 genotipos en estudio con respecto a intensidad de los atributos sensoriales, evaluados con un 65,61 % de variación de los dos primeros componentes, como se aprecia en la figura 4. En

el primer grupo se observan 17 genotipos, los cuales, ofrecen mayor intensidad de los atributos complementarios, como especiado herbal, floral, frutal, frutos secos, dulzor y cacao; en estos genotipos, se observa el balance del perfil sensorial entre sabores básicos y los

sabores complementarios de la muestra, durante la percepción en boca. En el segundo grupo, se presentan los genotipos con un balance intermedio resaltando atributos favorables con una menor intensidad, siendo estos finos y de aroma y el tercer grupo está conformado por los genotipos con sabores básicos de astringencia, amargor y acidez. Estos resultados muestran un contraste de los genotipos con características más planas, como CCN 51 que, en este caso, presentó notas marcadas de acidez, astringencia y amargor, que coincide con lo reportado por Quintana Fuentes & Gómez

Castelblanco (2011). Las notas de especiado fueron percibidas con una intensidad de 2 puntos en el genotipo TCS 11, mientras en los cultivares TCS 08, TCS 10 y TCS 13, se cuantificaron en 1; en tanto que las notas florales se asociaron, en mayor medida, a los genotipos TCS 05 y TCS 49. El conjunto de atributos de frutos secos (nuez), afrutado, cacao y dulzor, se percibieron en mayor medida, en los genotipos TCS 01, TCS 02, TCS 03 TCS 06, TCS 12, TCS19, TCS 40, TCS 41, TCS 44 e ICS 95.

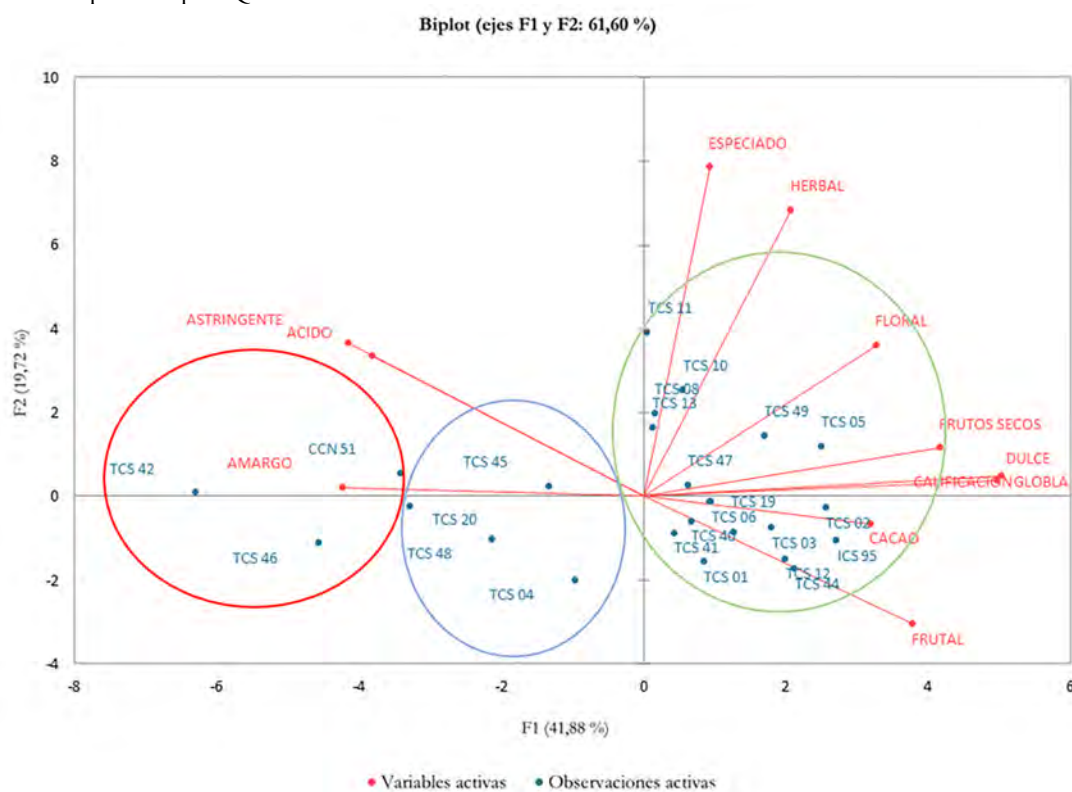


Figura 4. Análisis de componentes principales para los 22 genotipos *Theobroma Corpoica* La Suiza - TCS y dos genotipos universales, la Colección Castro Naranjal - CCN 51 y el Imperial College Selection - ICS 95. Primer grupo encerrado en verde, segundo grupo encerrado en azul y tercer grupo encerrado en rojo.

Otro de los aspectos evaluados en la determinación de un perfil sensorial es la calificación global del producto, en donde es otorgada a la muestra de licor catada, un valor numérico en escala de 0-10, escala estandarizada, de acuerdo con Cacao of Excellence y la NTC 3939 del 2021, permitiendo calificar los factores encontrados entre sabores básicos, específicos y posibles defectos encontrados, la cual, fue valorada en los 24 genotipos evaluados. Este comportamiento global (Figura 5) permite identificar un nivel satisfactorio para la mayoría de los genotipos evaluados; los licores obtuvieron valores superiores, con la presencia de atributos especiales. Este resultado e identificación de descriptores positivos permite categorizar ocho genotipos, anteriormente mencionados, como cacaos finos y aromatizados (ICCO, 2020). Estos resultados confirman que en Colombia se encuentran recursos genéticos valiosos, que representan ventajas competitivas para apuntar al mercado externo especializado, entre estos, se destacan los genotipos TCS 01, TCS 02, TCS 03, TCS 05, TCS 10, TCS 44, TCS 49 e ICS 95. Los genotipos que se pueden catalogar como cacaos corrientes, de

acuerdo con los resultados, son el TCS 42, TCS 46 y CCN 51, que podrían mejorar sus características organolépticas, con la inclusión de procesos de fermentación eficientes, así como el manejo de curvas de temperatura, acorde con la genética del material.

La evaluación de los parámetros de índice de grano, porcentaje de cascarilla y calidad sensorial permiten valorar la genética existente del cacao en Colombia, para proyectar nuevos genotipos con potencial de producción y comercialización; para efectos en este estudio, se encontró genotipos de cacao con índices de granos altos, que representan rentabilidad y competitividad en los mercados; a esto, se suma la calidad sensorial, donde se destacan perfiles de sabor de cacaos finos y de aroma. El índice de grano superior a 1,5 se encontró en los genotipos TCS 01, TCS 03, TCS 08, TCS 10, TCS 11, TCS 19 y TCS 20, que presentan porcentaje de cascarilla inferior a 13 % y perfil sensorial con notas predominantes a cacao, frutal, frutos secos, floral y herbal, con balance de sabores básicos (Figura 6). Estos recursos genéticos de Colombia evidencian la

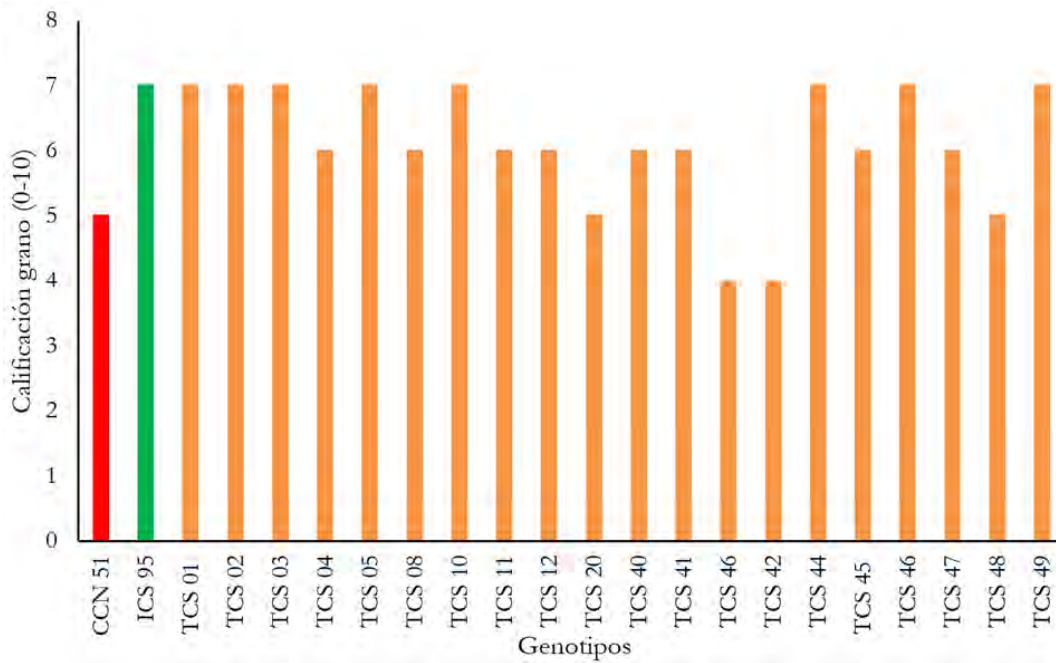


Figura 5. Calificación global de perfiles sensoriales para los 22 genotipos *Theobroma Corpoica* la Suiza - TCS y 2 genotipos universales el genotipo Colección Castro Naranjal - CCN 51, y el Imperial College Selection - ICS 95.

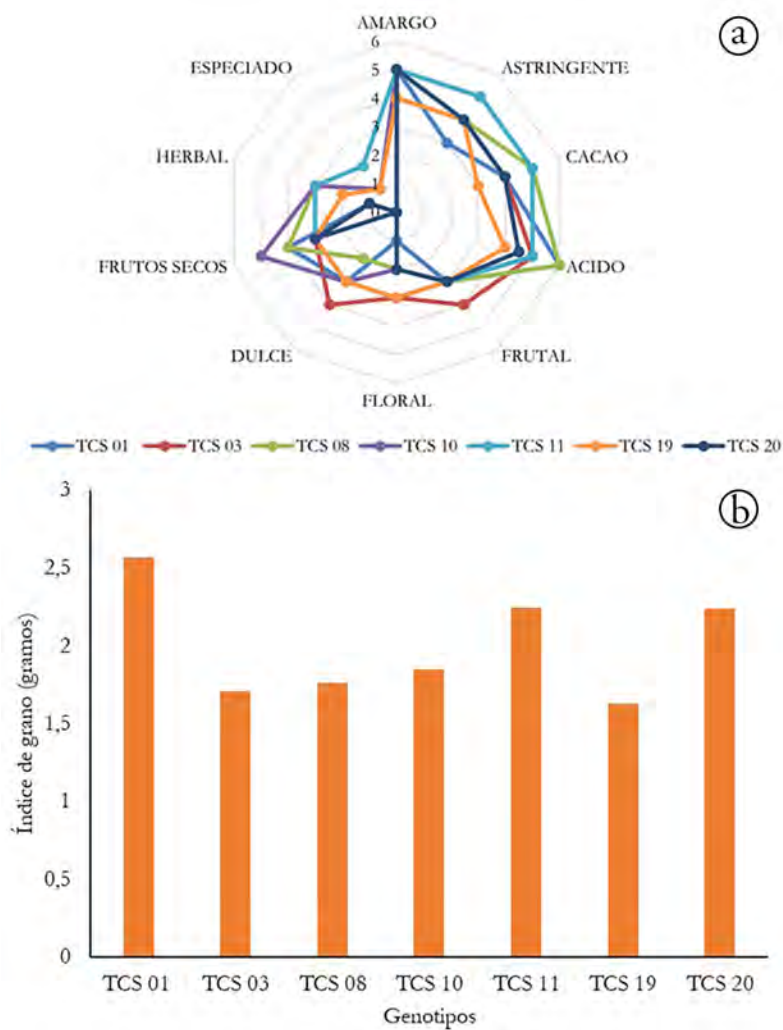


Figura 6. Genotipos destacados: a) perfil sensorial, b) índice de grano.

calidad física y sensorial del grano de cacao, lo cual, conlleva a mantener el cacao colombiano con categoría de fino sabor y aroma. Además, permite seleccionar genotipos de cacao para incluir en procesos de investigación, donde se evalué su comportamiento, productividad y tolerancia a enfermedades, para generar paquetes tecnológicos con nuevas variedades especiales, que contribuyan al incremento de la productividad del cultivo de cacao en Colombia.

Agradecimientos. Los autores agradecen al Centro de Investigación la Suiza de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA y a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD grupo de investigación GIAUNAD, por el desarrollo del proyecto bajo la actividad Caracterización física y sensorial de los 24 genotipos de cacao, que se desarrolla dentro del proyecto de investigación BPIN 20013000100255 “Investigación, desarrollo e innovación de cacaos especiales bajo sistemas agroforestales”. De igual manera, agradecen a Carol Castro Rodríguez y Jiner Niño Solano (Asistentes de investigación), por su apoyo en la consecución de mazorcas para la obtención de grano. **Financiación:** obtenida de sistema general de regalías del gobierno Nacional de Colombia. **Conflicto de intereses:** los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses. **Contribución de los autores:** todos los autores participaron en el planteamiento de la investigación y la toma, procesamiento y análisis de los datos. Lucero Gertrudis Rodríguez-Silva, Lucas Fernando Quintana-Fuentes, Alberto García-Jerez y Eliana Yadira Báez-Daza participaron en la redacción inicial del manuscrito y Roberto Antonio Coronado-Silva y Genaro Andrés Agudelo-Castañeda participaron en la revisión y edición del documento. Todos los autores aprueban la versión final.

REFERENCIAS

- BÁEZ-DAZA, E.Y.; AGUDELO CASTAÑEDA, G.A.; NÚÑEZ GÓMEZ, K.S.; RODRIGUEZ SILVA, L.G.; CORONADO SILVA, R.A.; LÓPEZ GIRALDO, L.J. 2022. Caracterización agronómica, fisicoquímica, sensorial y de metabolitos con actividad funcional de cacaos especiales cultivados bajo sistemas agroforestales en el departamento de Santander. AGROSAVIA. 203p. <https://doi.org/10.21930/AGROSAVIA.INVESTIGATIO.N.7405309>
- CACAO OF EXCELLENCE. 2021. Quality & Flavour Assessment. Disponible desde Internet en: <https://www.cacaoofexcellence.org/about-us/quality-flavour-assessment>
- DELGADO, J.D.; MANDUJANO, J.I.; REÁTEGUI, D.; ORDOÑEZ, E.S. 2018. Desarrollo de chocolate oscuro con nibs de cacao fermentado y no fermentado: polifenoles totales, antocianinas, capacidad antioxidante y evaluación sensorial. *Scientia Agropecuaria*. 9(4):543-550. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.10>
- DOMÍNGUEZ-PÉREZ, L.A.; LAGUNES-GÁLVEZ, L.M.; BARAJAS-FERNÁNDEZ, J.; OLÁN-ACOSTA, M.D.L.Á.; GARCÍA-ALAMILLA, R.; GARCÍA-ALAMILLA, P. 2019. Caracterización vibracional de grupos funcionales en granos de cacao durante el tostado usando espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier. *Acta Universitaria*. 29:e2172. <https://doi.org/10.15174/AU.2019.2172>
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS - FEDECACAO. 2021. Producción Nacional de cacao. Disponible desde Internet en: <https://www.fedecacao.com.co/economianacional>
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS - FEDECACAO. 2022. La producción cacaotera nacional sigue creciendo: en 2021 logra un récord histórico. Disponible desde Internet en: <https://www.fedecacao.com.co/post/la-produccion-cacaotera-nacional-sigue-creciendo-en-2021-logra-un-nuevo-record-historico>
- FONDO PARA EL FINANCIAMIENTO DEL SECTOR AGROPECUARIO - FINAGRO. 2018. Inteligencia de mercado: cacao. Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios -UGRA. 16p. Disponible desde Internet en: https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/ficha_cacao_version_ii.pdf
- GARCÍA-GONZALEZ, E.; OCHOA-MUÑOS A.F.; MONTALVO-RODRIGUEZ, C.; ORDOÑEZ-NARVAES, G.A.; LONDOÑO-HERNANDEZ, L. 2021. Sucesión microbiana durante la fermentación espontánea de cacao en unidades productivas. *Ciencia en Desarrollo*. 12(2):21-30. <https://doi.org/10.19053/01217488.V12.N2.2021.12242>
- GARCÍA-JEREZ, A.; QUINTANA-FUENTES, L.F.; MORENO MARTINEZ, E. 2022. Determinación del índice de grano y del porcentaje cascarilla de los genotipos de cacao regionales FSV41, FEAR5 y FLE2 y genotipo universal CCN 51. *Ingeniería y Competitividad*. 24(2):11420. <https://doi.org/10.25100/iyv.v24i02.11420>
- GONZÁLEZ-ALEJO, FA.; BARAJAS-FERNÁNDEZ, J.; GARCÍA-ALAMILLA, P. 2019. Extracción de compuestos solubles de la cascarilla de cacao con CO₂ supercrítico. Caso de metilxantinas y grasa. *CienciaUAT*. 13(2):128-140. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v13i2.1073>
- GONZÁLEZ-OROZCO, C.E.; OSORIO-GUARÍN, J.A.; YOCKTENG, R. 2022. Diversidad filogenética de genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Colombia. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization*. 20(3):203-214. <https://doi.org/10.1017/S1479262123000047>
- INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION FINE OR FLAVOUR COCOA - ICCO. 2020. Fine or Flavour Cocoa. Disponible desde Internet en: <https://www.icco.org/fine-or-flavor-cocoa/#:~:text=It%20sh>




- ould%20be%20noted%20that,rich%20and%20balanced%20chocolate%20bases.
13. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. 2004. Norma técnica colombiana NTC 5278. Análisis sensorial. Metodología. Análisis secuencial. Icontec. Bogotá D.C. 9p. Disponible desde Internet en:
<https://tienda.icontec.org/gp-analisis-sensorial-metodologia-analisis-secuencial-ntc5278-2004.html>
14. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. 2012. Norma técnica colombiana NTC 3501. Análisis sensorial. Vocabulario. Icontec. Bogotá D.C. 26p. Disponible desde Internet en:
<https://tienda.icontec.org/gp-analisis-sensorial-vocabulario-ntc3501-2012.html>
15. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. 2014. Guía técnica colombiana GTC 165. Análisis sensorial. Metodología. Guía general. Icontec. Bogotá D.C. 26p. Disponible desde Internet en:
<https://tienda.icontec.org/gp-analisis-sensorial-metodologia-guia-general-gtc165-2014.html>
16. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. 2017. Guía técnica colombiana GTC 280: Análisis sensorial. Directrices para la selección, el entrenamiento y seguimiento de evaluadores seleccionados y expertos. Icontec. Bogotá D.C. 34p. Disponible desde Internet en:
<https://tienda.icontec.org/gp-analisis-sensorial-directrices-para-la-seleccion-entrenamiento-y-seguimiento-de-evaluadores-sensoriales-seleccionados-y-expertos-gtc280-2017.html>
17. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. 2020. Guía técnica colombiana GTC 232. Análisis sensorial. Metodología. Guía general para el establecimiento de un perfil sensorial. Icontec. Bogotá D.C. 45p. Disponible desde Internet en:
<https://tienda.icontec.org/catalogsearch/result/?q=gtc+232>
18. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. 2021a. Norma técnica colombiana NTC 1252. Cacao en grano. especificaciones y requisitos de calidad. Icontec. Bogotá D.C. 57p. Disponible desde Internet en:
<https://tienda.icontec.org/gp-cacao-en-grano-especificaciones-y-requisitos-de-calidad-ntc1252-2021.html>
19. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. 2021b. Norma técnica colombiana NTC 3929. Análisis sensorial. Metodología. Métodos del perfil de sabor. Icontec. Bogotá D.C. 15p. Disponible desde Internet en:
<https://tienda.icontec.org/gp-analisis-sensorial-metodologia-metodos-del-perfil-de-sabor-ntc3929-2021.html>
20. JAIMES SUÁREZ, Y.Y.; AGUDELO, G.A.; BÁEZ DAZA, E.Y.; RENGIFO ESTRADA, G.A.; ROJAS MOLINA, J. 2021. Modelo productivo para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el departamento de Santander. AGROSAVIA. Mosquera, Colombia. 214p.
<https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7404647>
21. LEMARCQ, V.; VAN DE WALLE, D.; MONTERDE, V.; SIORIKI, E.; DEWETTINCK, K. 2021. Assessing the flavor of cocoa liquor and chocolate through instrumental and sensory analysis: a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1-17.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1887076>
22. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL - MADR; CONSEJO NACIONAL CACAOTERO - CNC. 2021. Plan nacional de desarrollo cacaotero 2012-2021. MADR. 30p. Disponible desde Internet en:
<https://sioc.minagricultura.gov.co/Cacao/Normatividad/2012%20Plan%20Decenal%20cacaotero%202012-2021.pdf>
23. MOTAMAYOR, J.C.; LACHENAUD, P.; DA SILVA E MOTA, J.W.; LOOR, R.; KUHN, D.N.; BROWN, J.S.; SCHNELL, R.J. 2008. Diferenciación geográfica y genética de la población del árbol del chocolate amazónico (*Theobroma cacao* L.). *PLOS ONE*. 3(10):e3311.
<https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0003311>
24. NAZARIO, O.; ORDOÑEZ, E.; MANDUJANO, Y.; ARÉVALO, J. 2013. polifenoles totales, antocianinas, capacidad antioxidante de granos secos y análisis sensorial del licor de cacao (*Theobroma cacao* L.) criollo y siete clones. *Investigación y Amazonía*. 3(1):51-59.
25. PROCOLOMBIA. 2020. Cacao en Colombia, un producto reconocido a nivel mundial. Disponible desde Internet en:
<https://www.colombiatrader.com.co/noticias/cacao-en-colombia-un-producto-reconocido-nivel-mundial>
26. PUENTES-PÁRAMO, Y.J.; MENJIVAR-FLORES, J.C.; GÓMEZ-CARABALÍ, A.; ARANZAZU-HERNÁNDEZ, F. 2014. Absorción y distribución de nutrientes en clones de cacao y sus efectos en el rendimiento. *Acta Agronómica*. 63(2):145-152. <https://doi.org/10.15446/ACAG.V63N2.40041>
27. QUELAL-VÁSCONEZ, M.A.; LERMA-GARCÍA, M.J.; PÉREZ-ESTEVE, É.P.; TALENS, P.; BARAT, J.M. 2020. Roadmap of cocoa quality and authenticity control in the industry: A review of conventional and alternative methods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 19(2):448-478. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12522>

28. QUINTANA FUENTES, L.F.; GARCIA JEREZ, A. 2021. Evaluación integral de la calidad sensorial del cacao. Sello Editorial UNAD. 136p. Disponible desde Internet en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/4852/4570>
29. QUINTANA FUENTES, L.F.; GOMÉZ CASTELBLANCO, S. 2011. Perfil del sabor del clon CCN51 del Cacao (*Theobroma cacao* L.) producido en tres fincas del municipio de San Vicente de Chucurí. Publicaciones e Investigación. 5(1):45-58. <https://doi.org/10.22490/25394088.594>
30. QUINTANA FUENTES, L.F.; GÓMEZ CASTELBLANCO, S.; GARCÍA JEREZ, A.; MARTÍNEZ GUERRERO, N. 2015. Caracterización de tres índices de cosecha de cacao de los clones CCN51, ICS60 e ICS 95, en la montaña santandereana, Colombia. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. 6(1):253-265.
31. RAMÍREZ-GUILLERMO, M.Á.; LAGUNES-ESPINOZA, L.C.; ORTIZ-GARCÍA, C.F.; GUTIÉRREZ, O.A.; DE LA ROSA-SANTAMARÍA, R. 2018. Variación morfológica de frutos y semillas de cacao (*Theobroma cacao* L.) de plantaciones en Tabasco, México. Revista fitotecnia mexicana. 41(2):117-125. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.2.117-125>
32. RAMÍREZ MONTAÑEZ, J.; VALERO CÓRDOBA, G.M.; MARTÍNEZ HIGUERA, P. 2019. Oportunidades de las minicadenas productivas del sector cacao de Santander frente al pos conflicto colombiano. Económicas CUC. 40(2):153-182. <https://doi.org/10.17981/econcuc.40.2.2019.10>
33. RÍOS, F.; RUIZ, A.; LECARO, J.; REHPANI, C. 2017. Estrategias país para la oferta de cacaos especiales. Políticas e iniciativas privadas exitosas en el Perú, Ecuador, Colombia y República Dominicana. Swisscontact Foundation. 136p. Disponible desde Internet en: https://www.swisscontact.org/_Resources/Persistent/b/7/9/0/b7909c63ce01d3c0333defd340188b15376359d7/Estrategias_pais_para_la_oferta_de_cacaos_especiales.pdf
34. RODRÍGUEZ-SIERRA, E.; JORGE-CABRERA, M.C.; RODRIGUEZ-ÁLVAREZ, I. 2022. Influencia de la granulometría en el perfil de sabor del licor de cacao cubano refinado con molino de piedras. Ciencia y Tecnología de Alimentos. 32(3):6-9.
35. ROJAS-ROJAS, K.; HERNÁNDEZ-AGUIRRE, C.; MENCÍA-GUEVARA, A. 2021. Transformaciones bioquímicas del cacao (*Theobroma cacao* L.) durante un proceso de fermentación controlada. Agronomía Costarricense. 45(1):53-65. <https://doi.org/10.15517/rac.v45i1.45694>
36. SÁNCHEZ, V.H.; ZAMBRANO, J.L.; IGLESIAS, C. 2019. La cadena de valor del cacao en América Latina y el Caribe. Fontagro, Espol, Iniap ((Ecuador). 100p. Disponible desde Internet en: https://www.fontagro.org/new/uploads/adjuntos/Informe_CACAO_linea_base.pdf
37. SANTANDER, M.; VAILLANT, F.; SINUCO, D.; RODRÍGUEZ, J.; ESCOBAR, S. 2021. Enhancement of fine flavour cocoa attributes under a controlled postharvest process. Food Research International. 143:110236. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110236>
38. ZHANG, D.; MOTILAL, L.A. 2016. Origin, dispersal, and current global distribution of cacao genetic diversity. En: Bailey, B.A.; Meinhardt, L.W. (eds.). Cacao diseases. Springer. p.3-31. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2_1

Valoración de un método de osmoguiado a flores de durazno (*Prunus persica*) aplicado en abejas *Apis mellifera*

Assessment of a method of osmoguided peach (*Prunus persica*) flowers in honeybee *Apis mellifera*

Camilo Andrés Higuera-Higuera¹ ; Saira María Esiponsa-Sánchez² ; Diana María Dueñas-Quintero³ 

Mariana Palacios-Preciado³ ; Fabio Eleazar Lozano-Suarez⁴ ; Víctor Manuel Solarte-Cabrera⁵ 

Oswaldo Andrés Sánchez-Alarcón^{6*} 

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC, Grupo de investigación Gigas. Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: andres.higuera01@uptc.edu.co

²Compañía Campo Colombia SAS, Grupo de investigación AYNI; La Mesa - Cundinamarca, Colombia; e mail: smespinosas@unal.edu.co

³Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC, Grupo CREPIB. Tunja – Boyacá, Colombia; e mail: diana.duenas@crepib.org.co; direccion@crepib.org.co

⁴Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC, Grupo de investigación Gigas. Duitama - Boyacá, Colombia; e-mail: fabio.lozano@uptc.edu.co

⁵Blue Note Data Analysis SAS. Grupo de Investigación Labinat/Blue Note Data Analysis. Bogotá D.C., Colombia; e-mail: vmsolartec@bluenotedataanalysis.com

⁶Compañía Campo Colombia SAS, Grupo de investigación AYNI, Grupo de investigación Bioprospectiva. La Mesa - Cundinamarca, Colombia; e mail: investigacion@campocolombia.com

*autor para correspondencia: investigacion@campocolombia.com

Cómo citar: Higuera-Higuera, C.A.; Esiponsa-Sánchez, S.M.; Dueñas-Quintero, D.M.; Palacios-Preciado, M.; Lozano-Suarez, F.E.; Solarte-Cabrera, V.M.; Sánchez-Alarcón, O.A. 2023. Valoración de un método de osmoguiado a flores de durazno (*Prunus persica*) aplicado en abejas *Apis mellifera*. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2242. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2242>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: marzo 16 de 2022 **Aceptado:** mayo 27 de 2023 **Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Diversos estudios demuestran que la inclusión de polinizadores, como las abejas *Apis mellifera*, generan efectos positivos sobre la productividad de cultivos de durazno (*Prunus persica*). Esto lleva a probar metodologías que estimulen a las abejas para visitar, con mayor frecuencia, el cultivo de interés, sugiriendo el uso de la técnica de osmoguiado, como herramienta para potencializar el efecto de la polinización. Este estudio valoró un protocolo de osmoguiado, para estimular híbridos africanizados de *Apis mellifera*, a recolectar polen de flores de durazno, utilizando, como indicador indirecto, el análisis palinológico en muestras de polen. Los tratamientos utilizados fueron con osmoguiado y sin osmoguiado. Cada tratamiento contó con tres colmenas y el periodo de evaluación fue de cinco semanas, coincidiendo con el mayor periodo de floración del durazno. Los resultados evidenciaron que este protocolo no logró estimular a las

abejas a visitar la flor de durazno para la búsqueda de polen. La disponibilidad permanente de otras plantas productoras de polen, reportadas previamente como importantes en el aporte de este recurso, pudo influir en la selección de fuentes por parte de las abejas. El polen obtenido provino, principalmente, de plantas de las familias Fabaceae, Asteraceae, Malvaceae y Passifloraceae.

Palabras clave: Polinización entomófila; Polinización dirigida; Caducifolios; Rendimiento de cultivos; Palinología.

ABSTRACT

Several studies show that the inclusion of pollinators such as honeybee *Apis mellifera* generates positive effects in the productivity of peach (*Prunus persica*) crops. It led to test methodologies that stimulate bees to improve the visit of crops of interest, suggesting

the use of the osmoguiding technique, as a tool to potentiate the effect of pollination. This study evaluated an osmoguided protocol to stimulate Africanized hybrids of *Apis mellifera* to collect pollen from peach flowers, using palynological analysis of pollen samples as an indirect indicator. The treatments used were with osmoguided and without osmoguided. Each treatment had three hives, and the evaluation period was five weeks, coinciding with the peak flowering period of the peach. The results showed that this protocol did not stimulate the bees to visit the peach blossom to search pollen. The permanent availability of other pollen-producing plants, previously reported as significant in the contribution of this resource, could influence bee source selection. The pollen obtained came mainly from plants of the families Fabaceae, Asteraceae, Malvaceae, and Passifloraceae.

Keywords: Entomophilous pollination; Crop yield; Deciduous; Directed pollination; Palynology.

INTRODUCCIÓN

Se estima que, al menos, el 75 % de los suministros de comida en el mundo dependen, en alguna medida, del proceso de polinización (Gallai & Vaissière, 2009). Entre los diversos organismos que median este proceso se destacan las abejas, como el grupo de animales con mayor especialización (Claro Carrascal *et al.* 2017). Para el caso de plantas de interés económico, las abejas desempeñan un papel importante en la productividad de los cultivos, generando incrementos en la cantidad y peso de los frutos, así como disminución en deformaciones de estos (Winfrey *et al.* 2011); en consecuencia, es común el uso de abejas como polinizadores gestionados para obtener mayor rentabilidad en las plantaciones agrícolas.

En Colombia fueron validados los efectos positivos sobre la inclusión de abejas en cultivos de frutales, como fresa (*Fragaria x ananassa*), mora (*Rubus glaucus*) (Vásquez Romero *et al.* 2006; 2011), aguacate (*Persea americana*), mango (*Mangifera indica*) y naranja (*Citrus x sinensis*) (Vásquez Romero *et al.* 2011).

Para el caso específico del durazno (*Prunus persica*), en el país, se evidencian escasas investigaciones relacionadas con la dinámica de los polinizadores y su efecto sobre la productividad del cultivo; sin embargo, resultados en estudios de otros países muestran que las abejas pueden aportar, significativamente, a la productividad del cultivo de durazno a pesar de que la planta presenta un alto nivel de autopolinización (Chaudhary, 2008; Weinbaum *et al.* 1986).

La flor de durazno presenta características relacionadas a estrategias de polinización por insectos, como, por ejemplo, la producción de volátiles asociados a la atracción innata en abejas (Mas *et al.* 2020), la oferta de néctar y polen suficientes para promover el pecoreo de abejas en el cultivo (McGregor, 1976; Niyéki *et al.* 2000) y también la mayor proporción de anteras dehiscentes en la hora del día con mayor actividad de recolección de polen por parte de las abejas, entre las 11:00 y las 14:00 horas (Zhang *et al.* 2019).

Como resultado de estas adaptaciones, la flor del durazno es visitada por diversas especies de abejas, entre las cuales, se reportan los géneros *Bombus*, *Ceratina*, *Xylocopa*, *Lassioglossum*, *Nomia* y *Osmia* (Dar *et al.* 2020; Maryam *et al.* 2020). De ellas, las abejas de los géneros *Bombus* y *Osmia* son utilizadas como polinizadores gestionados en cultivos de durazno bajo invernadero, en Asia (Zhang *et al.* 2019); sin embargo, a nivel general, se reconoce a la especie de abeja *Apis mellifera*, como el polinizador más importante del duraznero (Randhawa *et al.* 1963).

La incorporación de abejas *Apis mellifera* en plantaciones de durazno genera efectos positivos en el cultivo, especialmente, sobre la formación de frutos (Niyéki *et al.* 2000), lo cual, conlleva a que la relación de dependencia de polinización en la planta de durazno sea calificada con orden de un 70 % (Gallai & Vaissière, 2009); por ejemplo, Tanda (2021) describió que el porcentaje de flores cuajadas cuando se presenta autopolinización es cercano al 40 % y aumenta significativamente a 75 %, al ser polinizadas por abejas *A. mellifera*.

Con el fin de aumentar la tasa de visita (pecoreo) de las abejas al cultivo de interés se utilizan diversas técnicas, entre las cuales, se reporta un método sencillo y de bajo costo, denominado osmoguido (Lesser Preuss, 2004; Vásquez Romero *et al.* 2006; Munchara Pouz, 2017). Esta técnica parte de la hipótesis que, al proporcionar a las abejas jarabes obtenidos por la maceración o cocción de flores del cultivo de interés, se estimula a que los insectos presenten mayor atracción hacia la flor utilizada. Esto, a su vez, genera un aumento en la tasa de visitas, mejor polinización y, en consecuencia, mejoras en la calidad y cantidad de los frutos.

En Colombia existen documentos técnicos que sugieren el uso de esta técnica cuando se realiza polinización dirigida en cultivos comerciales (Cortes Conde, 2015; Vásquez Romero *et al.* 2006, 2021); sin embargo, hasta el momento, no se reporta de forma cuantitativa el efecto del proceso de osmoguido sobre la frecuencia de pecoreo de las abejas, en un cultivo agrícola. Por tal razón, el objetivo del presente estudio se centró en establecer el efecto de un protocolo de osmoguido como estrategia para potencializar la polinización asistida con abejas *Apis mellifera*, en un cultivo de durazno, establecido en condiciones altoandinas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones del cultivo. El estudio se llevó a cabo en el municipio de Tuta – Boyacá, Colombia, en un cultivo comercial de durazno, con las variedades Dorado y Diamante, ubicado en las coordenadas N 5°42'5.0", W 73°11'24.3". El cultivo estaba compuesto por 180 plantas, de 12 años.

Disponibilidad de flores de durazno. Para verificar la disponibilidad de flores de durazno, semanalmente, se escogieron 30 plantas de forma aleatoria, de las cuales, se seleccionó una rama al azar y se contó el número de flores abiertas. Los conteos se realizaron durante las cinco semanas del ensayo.

Condiciones del apiario. Se estableció el apiario, ubicado en una zona cercana al cultivo de durazno, cuya distancia al árbol más alejado fue de 170 metros. El apiario estuvo compuesto por seis colonias de híbridos africanizados de abejas *A. mellifera*. Las reinas utilizadas en las colonias del experimento se obtuvieron a partir de la misma madre, por tanto, fueron medio hermanas, reduciendo el efecto de la variabilidad genética, lo cual, podría generar diferencias en la preferencia de pecoreo de la flor del durazno. La fecundación de las reinas se dio de forma natural. Al momento del experimento, las reinas tenían seis meses de edad. Las colmenas contaron con una cámara de cría, en la cual, se verificó permanentemente la presencia de reina y, al menos, seis cuadros con cría. En todos los casos, el alto volumen de abejas de la colonia condujo a que se instalará una segunda alza, que se mantuvo durante todo el ensayo.

En el periodo experimental, todas las colmenas fueron alimentadas semanalmente con 1,5 litros de jarabe. El jarabe se elaboró con azúcar comercial, mezclando 1 kg de azúcar por cada 750 ml de agua. El jarabe se proporcionó en alimentadores plásticos internos, dispuestos en la segunda alza de las colmenas. Este jarabe tuvo como finalidad mantener la fortaleza de las colonias durante el periodo experimental y este no hizo parte del método de osmoguiado.

Proceso de osmoguiado. El inductor de osmoguiado se elaboró fundamentado en el principio descrito por Vásquez Romero *et al.* (2012, 2021). Para esto, se realizó la recolección de 30 flores de durazno abiertas (variedad Diamante), que fueron sometidas a maceración y cocción en 400 ml de agua, a 90 °C, por un periodo de 20 minutos. Posteriormente, se incorporó la mezcla a una solución de 400 ml de jarabe, elaborado con 1 kg de azúcar, por cada 750 ml de agua; la mezcla resultante se dispuso en un atomizador. El inductor se preparó cada semana, el día anterior a su aplicación.

Para aplicar inductor en las colonias, se retiró cada marco de la colmena y se procedió a asperjar directamente. Se verificó visualmente que ambas caras del marco estuvieran completamente húmedas con el inductor. En los casos donde los cuadros presentaban abejas, se realizó la aspersión directamente sobre ellas.

Como tratamientos experimentales se establecieron dos grupos, cada uno compuesto por tres colonias:

- Con osmoguiado: aspersión semanal del inductor en las colmenas 1, 3 y 4, durante las cinco semanas del ensayo.
- Control: sin aplicación del inductor en las colmenas 5, 7 y 10.

Valoración de la efectividad del método de osmoguiado. Para verificar de manera indirecta la eficiencia del método de osmoguiado, a las seis colonias se les instalaron colectores de polen, que fueron cosechados semanalmente. La recolección de datos se llevó a cabo durante cinco semanas, posteriores a la primera aplicación del inductor.

El polen obtenido cada semana, por cada colmena, fue recolectado y almacenado por separado en bolsas plásticas y mantenidas en refrigeración, a 4 °C.

Para establecer la presencia de polen de durazno por colmena, se procedió a unificar el contenido de cada bolsa, para obtener muestras representativas y uniformes. A continuación, se colectaron 30 g de polen de cada bolsa, para desarrollar análisis palinológicos, mediante la técnica de acetólisis de Erdtman (1969). En este procedimiento, se agregó ácido acético, para degradar el protoplasma y solución acetolítica, para la hidrólisis ácida del material. Posteriormente, se montó una submuestra del material en láminas permanentes, usando gelatina glicerínada. Cada lámina fue etiquetada y observada al microscopio en 400 aumentos. Se realizaron conteos de palinomorfos en, al menos, 30 campos, hasta no encontrar nuevos tipos por lámina o hasta alcanzar una abundancia total de 400 granos de polen.

Análisis de datos. Los conteos de flores de durazno entre semanas se compararon con la prueba Kruskal-Wallis y la riqueza de palinomorfos entre tratamientos, con la prueba U de Mann-Whitney. Se consideró estadísticamente significativo, cuando $p < 0,05$. La red de interacción entre las especies de plantas y las colmenas se elaboraron con el paquete bipartite (Dormann *et al.* 2021), para determinar la conectividad, el anidamiento, la especialización y la robustez de la interacción. Los análisis de datos y gráficas se ejecutaron con los paquetes ggplot2 (Wickham *et al.* 2021) y ggalluvial (Brunson & Read, 2020), en el ambiente estadístico R Core Team v 4.1.2 (2021), con la plataforma RStudio v 1.4.1717 (2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Disponibilidad de flores de durazno. Los conteos de flores de durazno realizados permitieron confirmar la disponibilidad de este recurso, durante todo el periodo del ensayo. Los resultados obtenidos en las cinco semanas indicaron un promedio de flores por rama, que varió entre 9,5 y 13,2, dependiendo de la semana. El máximo de flores obtenidas en la rama fue 36 y el mínimo de 2 (Figura 1). No se presentaron diferencias estadísticas significativas en el número de flores por semana ($H=22,65$, $gl=24$, $p=0,5405$).

Valoración de la efectividad del método de osmoguiado. Los análisis palinológicos desarrollados sobre el polen corbicular de las seis colmenas evidenciaron la presencia de palinomorfos, provenientes de 21 familias de plantas. De estas, la familia Fabaceae representó el 17 %, Asteraceae 10 %, Malvaceae 7 % y Passifloraceae 7 %; las demás familias fueron representadas solo por una especie de planta, equivalente al 3 %, para cada caso (Tabla 1).

Respecto a la riqueza de plantas, en total, se cuantificaron 29 palinomorfos diferentes. Entre estos, no se detectó la presencia de polen de durazno (*Prunus persica*), independientemente, de que la colmena incluyera o no el proceso de osmoguiado. La riqueza obtenida por cada colmena, en cada semana, varió entre 7 y 14 especies (Figura 2). No se presentaron diferencias estadísticas significativas en la riqueza de palinomorfos entre tratamientos ($U=81,5$, $p=0,308$).

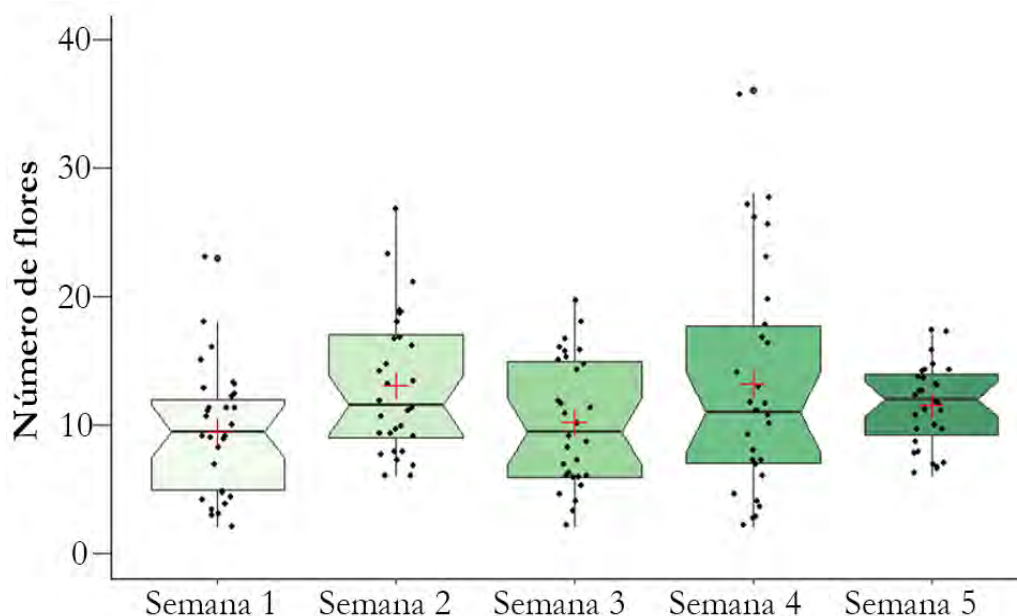


Figura 1. Disponibilidad de flores de durazno *Prunus persica* durante el periodo experimental. Se contabilizaron las flores abiertas de una rama de cada uno de los 30 árboles.

Tabla 1. Especies vegetales registradas en los análisis palinológicos, a partir del polen colectado de colmenas de abejas (*Apis mellifera*) con osmoguiado y sin osmoguiado, dispuestas en un cultivo de durazno (*Prunus persica*).

FAMILIA	ESPECIE
Fabaceae: Caesalpinioideae	<i>Senna reticulata</i>
Fabaceae: Faboideae	<i>Aeschynomene americana</i>
Fabaceae: Faboideae	<i>Trifolium pratense</i>
Fabaceae: Faboideae	<i>Trifolium repens</i>
Fabaceae: Mimosoideae	<i>Acacia cf. decurrens</i>
Asteraceae	<i>Baccharis trinervis</i>
Asteraceae	<i>Taraxacum officinale</i>
Asteraceae	<i>Tithonia diversifolia</i>
Malvaceae	<i>Abutilon sp.</i>
Malvaceae	<i>Triumphetta bogotensis</i>
Passifloraceae	<i>Passiflora bogotensis</i>
Passifloraceae	<i>Passiflora mixta</i>
Actinidaceae	<i>Saurauia cf. scabra</i>
Adoxaceae	<i>Viburnum triphyllum</i>
Asparagaceae	<i>Sansevieria trifasciata</i>
Arecaceae	Arecaceae sp.
Balsaminaceae	<i>Impatiens walleriana</i>
Bombacaceae	Aff. <i>Quararibea cordata</i>
Brassicaceae	<i>Brassica sp.</i>
Cleomaceae	Tipo <i>Cleome sp.</i>
Ericaceae	Ericaceae sp.
Euphorbiaceae	<i>Acalypha macrostachya</i>
Myrtaceae	<i>Eucalyptus globulus</i>
Onagraceae	<i>Ludwigia sp.</i>
Poaceae	<i>Zea mays</i>
Rutaceae	<i>Citrus sp.</i>
Saxifragaceae	<i>Escallonia pendula</i>
Solanaceae	<i>Solanum aff. quitoensis</i>
Indeterminada	Indeterminado 1

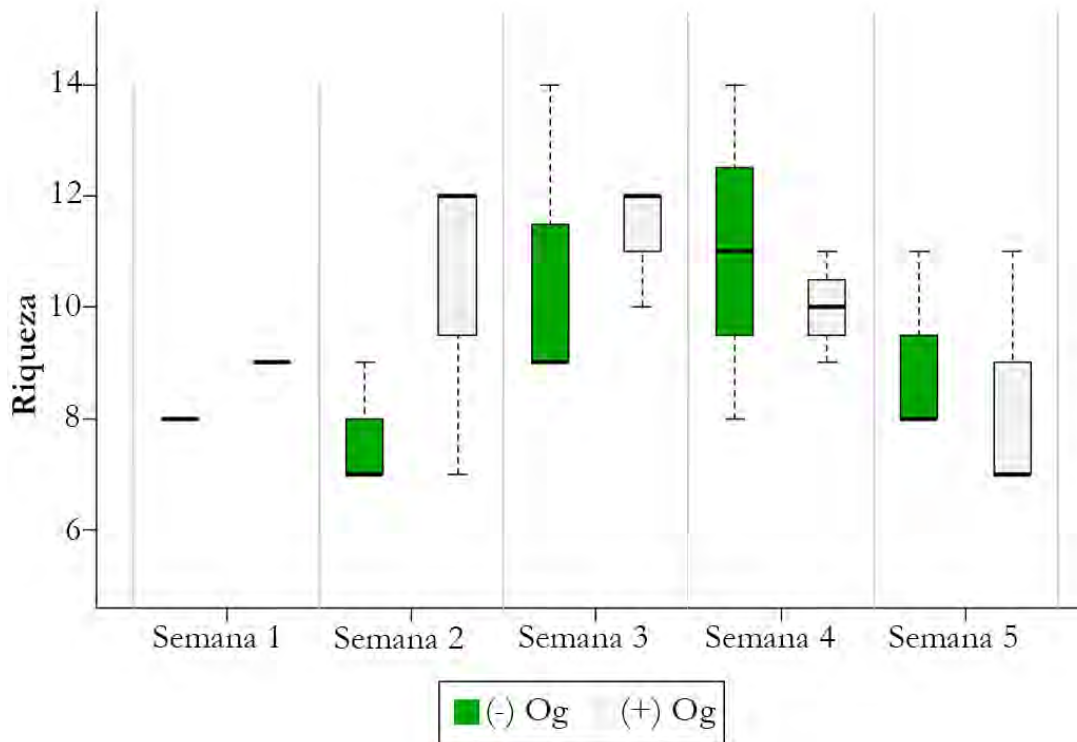


Figura 2. Riqueza semanal de especies de plantas en las muestras de polen apícola colectado de colmenas de abejas (*Apis mellifera*), con osmoguiado y sin osmoguiado, dispuestas en un cultivo de durazno (*Prunus persica*). (-) Og sin osmoguiado; (+) con osmoguiado.

La interacción entre plantas visitadas y colmenas muestra que la mayoría de las plantas fueron visitadas por las seis colmenas, tanto las colmenas del tratamiento sin osmoguiado como las de tratamiento con osmoguiado, es decir, las abejas visitaron, en términos generales, las mismas plantas, independientemente del tratamiento aplicado a la colmena. La red de interacción bipartita (Figura 3) muestra que las seis colmenas son generalistas (baja especialización de 0,086), no muestran anidamiento (29,19) y su conectividad es intermedia (59,77 %), señalando que la interacción es altamente robusta (96,7 %); el número de plantas interactuando con las seis colmenas, con comportamiento generalista, está directamente relacionado con la disponibilidad constante de recursos proteicos por parte de, al menos, 29 especies botánicas.

Al agregar los resultados de las seis colmenas incluidas en el ensayo, las especies de plantas dominantes en, al menos, el 20 % de los 29 muestreos fueron: *Trifolium pratense*, con el 38 %; *Brassica* sp., con el 24 % y *Eucalyptus globulus*, con el 20 % (Figura 4).

El protocolo de osmoguiado utilizado en el presente estudio no estimuló a las abejas para recolectar polen de flores de durazno, lo que se evidenció en la ausencia de granos de polen de la especie de planta y en las muestras analizadas, independientemente, del tratamiento de osmoguiado aplicado (Tabla 2).

Este resultado se podría explicar en la preferencia de las abejas por el recurso néctar sobre el recurso polen, en las flores de durazno

(Zhang *et al.* 2019). Tanda (2021) señaló, sobre la preferencia de recursos obtenidos por *A. mellifera* en flores de durazno, que de cada 100 abejas observadas, 65 recolectaron exclusivamente néctar, 23 exclusivamente polen y 12, los dos recursos.

En el desarrollo del presente estudio, específicamente, en la fase de conteo de flores abiertas, fue posible verificar visualmente la presencia de abejas *A. mellifera* recolectando recursos en la flor de durazno; sin embargo, no se realizó ninguna valoración cuantitativa de dicho comportamiento. Estas observaciones, aunadas a los resultados obtenidos en el análisis palinológico, indican que el estudio del polen obtenido, a través de colectores, como indicador exclusivo de los efectos de técnicas, como el osmoguiado, fue insuficiente para explicar variaciones en el proceso de pecoreo en abejas, para cultivos de durazno.

Sería recomendable utilizar, adicionalmente, otras metodologías; por ejemplo, el desarrollo de transectos con conteos de abejas sobre las flores a lo largo del día (Vaissière *et al.* 2011), que permite obtener datos directamente sobre las dinámicas de la tasa de visita de los insectos. También, se puede efectuar la evaluación mediante el desarrollo de análisis palinológicos de las mieles, para corroborar su origen botánico (Nates-Parra *et al.* 2013); sin embargo, esta técnica no permite diferenciar, con claridad, los cambios en el pecoreo generados, en un periodo corto de tiempo y solo se obtendría un dato final sobre las colonias con mayor proporción de polen, de la planta de interés. Una opción más precisa podría ser la valoración

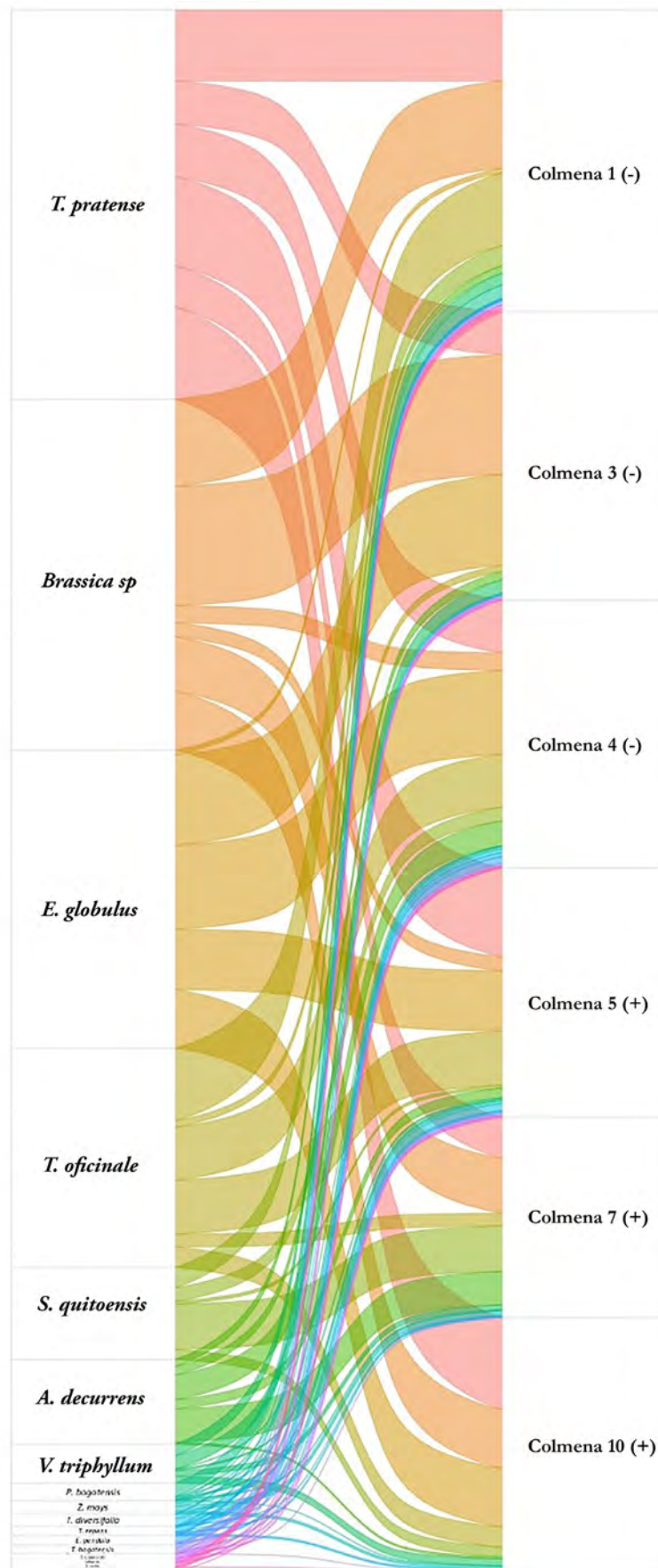


Figura 3. Red de interacción colmenas-plantas, elaborada a partir del polen recolectado en colmenas con osmogiado y sin osmogiado, dispuestas en un cultivo de durazno (*Prunus persica*).

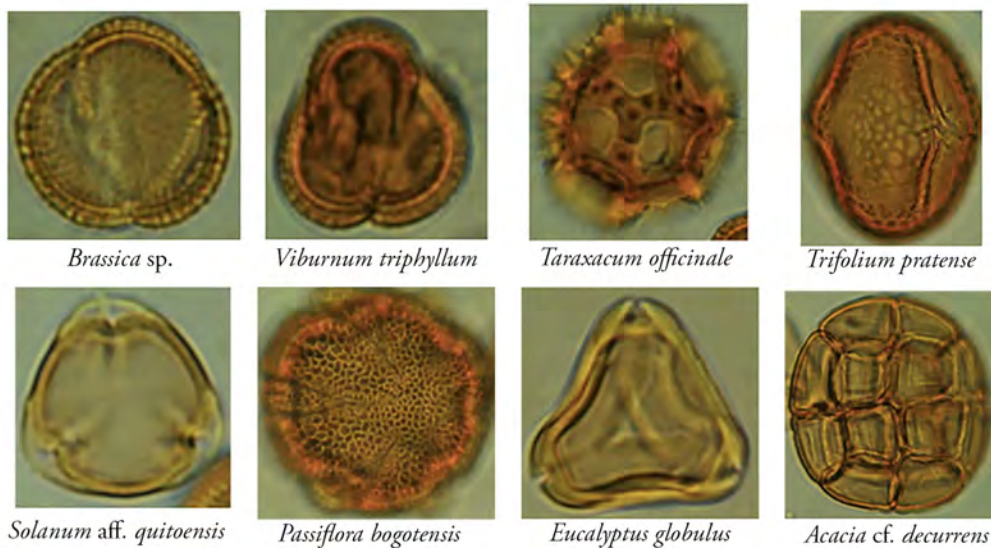


Figura 4. Polen de las especies de plantas dominantes en el análisis palinológico, proveniente de las colmenas de abejas (*Apis mellifera*), con osmoguiado y sin osmoguiado, dispuestas en un cultivo de durazno (*Prunus persica*).

Tabla 2. Especies de plantas predominantes en las muestras de polen colectado en colmenas de abejas (*Apis mellifera*), con osmoguiado (1, 3 y 4) y sin osmoguiado (5, 7 y 10), dispuestas en un cultivo de durazno (*Prunus persica*).

Colmena	Especie de planta	%de granos de polen por semana evaluada				
		S1	S2	S3	S4	S5
1	<i>Brassica</i> sp.	68%	55,1%	19,5%		
	<i>Viburnum triphyllum</i>	9,7%	7,3%			
	<i>Taraxacum officinale</i>	7,9%	19,5%	29,4%	45,7%	16,4%
	<i>Trifolium pratense</i>			30%	26,7%	50,3%
	<i>Solanum</i> aff. <i>quitoensis</i>				16,8%	
	<i>Passiflora bogotensis</i>					17,6%
3	<i>Eucalyptus globulus</i>	48%	16,7%	42%	36,7%	
	<i>Brassica</i> sp.	22,7%	36,2%	27%	38,8%	76,2%
	<i>Trifolium pratense</i>	17,4%		18%	15,5%	9,3%
	<i>Viburnum triphyllum</i>		10,5%			5,6%
4	<i>Eucalyptus globulus</i>	48%	41,2%	19,9%	26,9%	
	<i>Taraxacum officinale</i>	19,2%	18,4%		19,4%	31%
	<i>Trifolium pratense</i>	16,4%		42,9%	16,4%	
	<i>Brassica</i> sp.		6,2%			16,2%
	<i>Acacia</i> cf. <i>Decurrens</i>			14,1%		
	<i>Solanum</i> aff. <i>quitoensis</i>					13,2%
5	<i>Trifolium pratense</i>	51%	39,8%	24,2%	20,8%	41,1%
	<i>Eucalyptus globulus</i>	26%		22,5%	30,4%	19,8%
	<i>Taraxacum officinale</i>	8,7%	24,8%	35,7	23,5%	13,3%
	<i>Acacia</i> cf. <i>Decurrens</i>		9%			
7	<i>Brassica</i> sp.		42,9%	22%	22,3%	17,8
	<i>Trifolium pratense</i>		26,9%	33,9%		
	<i>Acacia</i> cf. <i>Decurrens</i>				24,6%	23,4%
	<i>Solanum</i> aff. <i>quitoensis</i>		11,6%	20,8%	23,8%	40,5%
10	<i>Brassica</i> sp.	44,2	15,6%	12,8%		27,9%
	<i>Trifolium pratense</i>	28,6	35,5%	30,6%	30%	53,1%
	<i>Eucalyptus globulus</i>	17,8		35%	27%	7,6%
	<i>Taraxacum officinale</i>		14,9%	12,8%		
	<i>Solanum</i> aff. <i>quitoensis</i>				17,2%	

S= Semana. Se resalta en color azul la especie de planta dominante en cada colmena por semana. Las especies que aparecen en blanco, no estuvieron entre las tres primeras especies dominantes, para la semana reportada.

del polen de contacto, la cual, se obtiene de fijar granos obtenidos del dorso y vientre de las abejas (Cepeda-Valencia *et al.* 2014). Las muestras para dicho indicador permitirían establecer el espectro de las flores visitadas por los insectos, aun cuando el recurso colectado sea néctar.

Respecto a las plantas identificadas en los análisis palinológicos, los resultados coinciden con estudios realizados previamente, en los cuales, se estableció que las familias de plantas predominantes en muestras de polen procedentes de Cundinamarca y Boyacá fueron Asteraceae y Fabaceae (Chamorro *et al.* 2017). A nivel de especie, también se presentaron coincidencias con resultados obtenidos entre las plantas clasificadas como predominantes en el presente estudio y los tipos polínicos clasificados como muy frecuentes, en la región Cundiboyacense; tal es el caso de *Brassica* sp., *E. globulus* y *T. pratense* (Chamorro *et al.* 2017).

La oferta de recursos proteicos constantes durante el periodo de estudio muestra que las colmenas son generalistas, aunque con preferencia por siete de 29 plantas, en las que pecorearon. La disponibilidad del recurso proteico aportado por estas plantas, probablemente, influyó en que no hayan elegido el polen de la flor del durazno como recurso proteico. Además, la vegetación circundante a los cultivos de durazno es la habitual en estos tipos de hábitat y suficiente para el mantenimiento de las colmenas de *Apis mellifera*, siendo este un factor que se deberá tener en cuenta para futuros estudios.

Agradecimientos. Los autores expresamos nuestro agradecimiento a la organización Sociedad Agropecuaria del Municipio de Sotaquirá SAT y al productor Jaime Rodríguez, por el apoyo técnico. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, Tecnología y la Innovación Francisco José Caldas, Minciencias y a la gobernación de Boyacá, a través del proyecto “Desarrollo de un sistema de manejo de abejas como polinizadores y vectores de agentes de control biológico en frutales caducifolios de importancia económica en el departamento de Boyacá: caso piloto durazno (*Prunus persica*)”. **Contribución de los autores:** Oswaldo Andrés Sánchez-Alarcón, Saira María Esiponsa Sánchez y Diana María Dueñas Quintero, contribuyeron con la conceptualización del estudio. Camilo Andrés Higuera Higuera y Oswaldo Andrés Sánchez-Alarcón contribuyeron en el proceso de investigación. Víctor Manuel Solarte Cabrera contribuyó en el análisis formal de datos. Mariana Palacios Preciado y Fabio Eleazar Lozano Suarez contribuyeron en la adquisición de fondos. Todos los autores contribuyeron en la escritura original del documento.

REFERENCIAS

- BRUNSON, J.C.; READ, Q.D. 2020. Alluvial Plots in ‘ggplot2’, v 0.12.3. ggalluvial. Disponible desde Internet en: <http://corybrunson.github.io/ggalluvial/>
- CEPEDA-VALENCIA, J.; GÓMEZ P, D.; NICHOLLS, C. 2014. La estructura importa: Abejas visitantes del café y estructura agroecológica principal (EAP) en cafetales. Revista Colombiana de Entomología. 40(2):241-250.
- CHAMORRO, F.J.; LEÓN, D.; MONTOYA-PFEIFFER, P.M.; SOLARTE, V.M.; NATES-PARRA, G. 2017. Botanical origin and geographic differentiation of bee-pollen produced in high mountains from the Colombian eastern Andes. Grana. 56(5):386-397. <https://doi.org/10.1080/00173134.2017.1283440>
- CHAUDHARY, O.P. 2008. Influence of different placement distance on yield and quality parameters of peach (*Prunus persica* L.). Korean Journal of Apiculture. 23(2):89-95.
- CLARO CARRASCAL, R.A.; MONGES, R.; MAMANI, D. 2017. Estado del arte del servicio ecosistémico de la polinización en Chile-Paraguay y Perú. FAO. 118p.
- CORTES CONDE, W.H. 2015. Manual de Apicultura Trashumante. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.
- DAR, S.A.; WANI, S.H.; JAVEED, K.; MIR, S.H.; YAQOOB, M.; SHOWKAT, A.; KUNDOO, A.A.; HASSAN, R.; FAROOK, U.B.; ISLAM, T. 2020. Mountain landscapes, foraging behaviour and visitation frequencies of insect pollinators on peach (*Prunus persica*). International Journal of Chemical Studies. 8:42-49. <http://dx.doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i6a.10916>
- DORMANN, C.; FRUEND, J.; GRUBER, B. 2021. Visualising bipartite networks and calculating some (ecological) indices, v 2.16. bipartite. Disponible desde Internet en: <https://rdrr.io/cran/bipartite/>
- ERDTMAN, G. 1969. Handbook of palynology: Morphology - Taxonomy - Ecology an Introduction to the Study of Pollen Grains and Spores. Hafner Publishing Co. 486p.
- GALLAI, N.; VAISSIÈRE, B. 2009. Guidelines for the economic valuation of pollination services at a national scale. FAO. 17p.
- LESSER PREUSS, R. 2004. Manual de apicultura moderna. Cuarta edición. Editorial Universitaria SA. (Chile). 223p.
- MARYAM, H.; RAFI, M.A.; ZIA, A.; RASUL, G.; SHEIKH, M.K.; QASIM, M.; PARVEEN, G. 2020. Insect pollinator fauna of apricot from Gilgit-Baltistan, Pakistan. Pakistan journal of agricultural research. 33(2):202-211. <https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2020/33.2.202.211>
- MAS, F.; HORNER, R.M.; BRIERLEY, S.; BUTLER, R.C.; SUCKLING, D.M. 2020. Selection of key floral scent compounds from fruit and vegetable

- crops by honey bees depends on sensory capacity and experience. *Journal of Insect Physiology*. 121:104002. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2019.104002>
14. MCGREGOR, S.F. 1976. Insect pollination of cultivated crop plants. US Department of Agriculture. 419p.
 15. MUNCHARA POUZ, M. 2017. El almendro. Manual técnico. Volumen 1. Ediciones Mundi-Prensa. 452p.
 16. NATES-PARRA, G.; MONTOYA, P.M.; CHAMORRO, F.J.; RAMÍREZ, N.; GIRALDO, C.; OBREGÓN, D. 2013. Origen geográfico y botánico de mieles de *Apis mellifera* (APIDAE) en cuatro departamentos de Colombia. *Acta biológica colombiana*. 18(3):427-438.
 17. NIYÉKI, J.; SZABÓ, Z.; BENEDEK, P.; SZALAY, M. 2000. Nectar production and pollination in peach. *International Journal of horticultural Science*. 6(3):123-126. <https://doi.org/10.31421/IJHS/6/3/113>
 18. RANDHAWA, G.S.; YADAV, I.S.; NATH, N. 1963. Studies on flowering, pollination and fruit development in peach grown under subtropical conditions. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 32:129-138.
 19. R CORE TEAM. 2021. R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. Disponible desde Internet en: <https://www.R-project.org/>
 20. RSTUDIO TEAM. 2021. RStudio: Integrated development for R. RStudio, PBC, Boston, MA. Disponible desde Internet en: <http://www.rstudio.com/>
 21. TANDA, A.S. 2021. Pollination Efficacies of *Apis mellifera* L. and *Tetragonula carbonaria* (Smith) on Peach. *Indian journal of entomology*. 83(4):527-529. <http://dx.doi.org/10.5958/0974-8172.2021.00072.9>
 22. VAISSIÈRE, B.E.; FREITAS, B.M.; GEMMILL-HERREN, B. 2011. Protocol to detect and assess pollination deficits in crops: A handbook for its use. FAO. 82p.
 23. VÁSQUEZ ROMERO, R.E.; BALLESTEROS CHAVARRO, H.H.; MUÑOZ OSORIO, M.E.; CUÉLLAR CHAPARRO, M.E. 2006. Utilización de la abeja *Apis mellifera* como agente polinizador en cultivos comerciales de fresa (*Fragaria chiloensis*) y mora (*Rubus glaucus*) y su efecto en la producción. Corpoica. 78p.
 24. VÁSQUEZ ROMERO, R.E.; BALLESTEROS CHAVARRO, H.H.; TELLO DURAN, J.E.; CASTAÑEDA CARRILLO, S.J.; CALVO CORREDOR, N.E.; ORTEGA FLORÉZ, N.C.; RIVEROS ALEJO, L.E. 2011. Polinización dirigida con abejas *Apis mellifera*: Tecnología para el mejoramiento de la producción de cultivos con potencial exportador. Corpoica (Bogotá). 88p.
 25. VÁSQUEZ ROMERO, R.E.; MARTÍNEZ SARMIENTO, R.A.; ORTEGA FLÓREZ, N.C.; MALDONADO QUINTERO, W.D. 2012. Manual técnico de apicultura: abeja (*Apis mellifera*). Primera edición. Corpoica. 100p.
 26. VÁSQUEZ ROMERO, R.E.; MARTÍNEZ SARMIENTO, R.A.; ORTEGA FLÓREZ, N.C.; MALDONADO QUINTERO, W.D. 2021. Conceptos fundamentales de producción apícola. Segunda edición. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia. (Colombia) 178p. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7404104>
 27. WEINBAUM, S.A.; POLITO, V.S.; KESTER, D.E. 1986. Pollen retention following natural self pollination in peach, almond, and peach × almond hybrids. *Euphytica*. 35(1):193-200. <https://doi.org/10.1007/BF00028557>
 28. WICKHAM, H.; CHANG, W.; HENRY, L.; PEDERSEN, T.; TAKAHASHI, K.; WILKE, C.; WOO, K.; YUTANI, H.; DUNNINGTON, D. 2021 ggplot2: Create elegant data visualizations using the grammar of graphics, v 3.3.5. Disponible desde Internet e: <https://ggplot2.tidyverse.org/reference/ggplot2-package.html>
 29. WINFREE, R.; GROSS, B.J.; KREMEN, C. 2011. Valuing pollination services to agriculture. *Ecological Economics*. 71:80-88. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.08.001>
 30. ZHANG, H.; ZHOU, Z.; AN, J. 2019. Pollen release dynamics and daily patterns of pollen-collecting activity of honeybee *Apis mellifera* and bumblebee *Bombus lantschouensis* in solar greenhouse. *Insects*. 10(7):216. <https://doi.org/10.3390/insects10070216>

Effect of carotenoid pigments extracted from papaya epicarp (*Carica papaya*) on the characteristics of Frankfurt sausages

Efecto de los pigmentos carotenoides extraídos del epicarpio de papaya (*Carica papaya*) sobre las características de las salchichas Frankfurt

Viviana Andrea Velasco-Arango¹ ; José Igor Hleap-Zapata^{1*} ; Luis Eduardo Ordóñez-Santos¹ 

¹Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: vavelasco@unal.edu.co; jihleapz@unal.edu.co; leordonezs@unal.edu.co

*corresponding author: jihleapz@unal.edu.co

How to cite: Velasco-Arango, V.A.; Hleap-Zapata, J.I.; Ordóñez-Santos, L.E. 2023. Effect of carotenoid pigments extracted from papaya epicarp (*Carica papaya*) on the characteristics of Frankfurt sausages. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2167. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2167>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

Received: November 23, 2021 **Accepted:** February 28, 2023 **Edited by:** Rita María Ávila G. de Hernández

ABSTRACT

The industrialization of papaya generates a large amount of organic waste, which is rich in antioxidant compounds, especially carotenoids. The purpose of the present article was to study the influence of carotenoid pigments extracted from the papaya epicarp as a partial substitute for nitrites in Frankfurt sausages. Four concentrations of lipid extract of papaya epicarp were analyzed in said sausages. While the control sample had 0 % substitution, 25 %, 50 % and 75 % substitution of nitrite was added to the other samples. The sausages were kept at 6 ± 2 °C for 30 days. The chemical composition, pH, water holding capacity, water activity, emulsion stability, color coordinates, texture profile and sensory appearance were analyzed, and for the sausage that presented the best physicochemical parameters, the stability in the time at 0, 10, 20 and 30 days of storage. It was obtained that adding the papaya epicarp extract to a concentration of 25 % did not affect the physicochemical parameters. In addition, the texture and color characteristics, as well as the sensory evaluation showed the best results for said concentration, guaranteeing stability up to a period of 30 days of storage under vacuum packing conditions and under refrigeration (6 ± 2 °C). A new alternative is proposed to minimize the negative action of nitrites in analyzed Frankfurt sausages, replacing them with antioxidant compounds obtained from a raw material of vegetable origin.

Keywords: Antioxidants, Fruit waste, Functional food, Meat quality, Oxidation.

RESUMEN

La industrialización de la papaya genera residuos orgánicos, ricos en compuestos antioxidantes, especialmente, en carotenoides. El objetivo de la presente investigación fue estudiar la influencia de los pigmentos carotenoides extraídos de epicarpio de la papaya, como sustituto parcial de los nitritos en salchichas Frankfurt. En dichos embutidos, se analizaron cuatro concentraciones de extracto lipídico de epicarpio de papaya; mientras que la mezcla control tenía 0 % de sustitución, se añadió 25, 50 y 75 % de reemplazo de nitrito a las otras muestras. Las salchichas se mantuvieron a 6 ± 2 °C durante 30 días. Se analizó la composición química, el pH, la capacidad de retención de humedad, la actividad de agua, la estabilidad de la emulsión, las coordenadas de color, el perfil de textura y la apariencia sensorial y para el embutido que presentó los mejores parámetros fisicoquímicos, la estabilidad en el tiempo a 0, 10, 20 y 30 días de almacenamiento. Se obtuvo que la adición del extracto de epicarpio de papaya a una concentración del 25 % no afectó los parámetros fisicoquímicos. Además, las características de textura y color, así como la evaluación sensorial, mostraron los mejores resultados para dicha concentración, garantizando la estabilidad, hasta un periodo de 30 días de almacenamiento, en condiciones de envasado al vacío y en refrigeración (6 ± 2 °C). Se propone una nueva alternativa para minimizar la acción negativa de los nitritos en las salchichas Frankfurt, sustituyéndolos por compuestos antioxidantes, obtenidos a partir de una materia prima de origen vegetal.

Palabras clave: Alimentos funcionales; Antioxidantes; Calidad de las carnes; Oxidación; Subproductos de frutas.

INTRODUCTION

In recent years, world agricultural production has seen a significant increase in the harvest of tropical fruits, especially in countries located in tropical and subtropical areas of the planet. According to data provided by the FAO, it is estimated that 99 % of tropical fruit production occurs in developing countries (FAO, 2019). Colombia, with its geographic, climatic and biological diversity, forms different ecosystems, which allows the production of a wide variety of plant species throughout the year (Rodríguez-Leyton, 2019). Papaya (*Carica papaya* L.) is one of the fruits with the highest production and consumption, which generates in its agro-industrial transformation a large quantity of by-products that are generally disposed of as organic waste (ASOHOFrucol, 2009; Ovando-Martínez *et al.* 2018; Pathak *et al.* 2019). Different studies have shown that papaya residues basically the epicarp, is an excellent source of multiple antioxidant compounds, phenolics, various vitamins, and specially carotenoid pigments (Ordóñez-Santos *et al.* 2014; Dorado *et al.* 2017).

Eating food rich in natural antioxidants helps protect cells from oxidative-type damage caused by free radicals, leading to a lower risk of cardiovascular disease, various types of cancer and some degenerative and neurological diseases (Ahmad *et al.* 2015). This growing demand for the consumption of natural and healthy foods has forced the food industry to include antioxidants in various products, as seen in meat products. Natural antioxidants include carotenoid pigments, which are fat-soluble compounds responsible for the natural yellow, orange and red color fruits, in vegetables and plants (Pinzón-Zárate *et al.* 2015). Additionally, they protect cells from the oxidative damage caused by freed radicals, reducing the risk of developing catastrophic diseases (Ahmad *et al.* 2015). These antioxidants are beneficial in the production of meat products since various additives, nitrates and nitrites, among others, are generally added in order to increase preservation times or improve organoleptic properties (color, smell and taste), in addition to preventing some oxidative processes. However, the presence of these chemicals in meat products has led to some consumer rejection because these substances are deemed harmful to humans. Nitrites combine with secondary or tertiary amines to form N-nitroso derivatives, and some of these derivate have been shown to accelerate the development of diseases such as cancer according to studies carried out at the laboratory level (Gassara *et al.* 2016). For this reason, the global trend at the research level is to look for naturally-derived compounds that can fulfill a conservative function in meat products, extending shelf-life and maintaining sensory properties without harming consumer health.

Multiple studies have developed based on the use of plant-based resources as a source of functional compounds in the meat industry: turnips (*Brassica rapa*) (Carvajal-Macías *et al.* 2019), preconverted nitrites from spinach, lettuce, celery and beets (Hwang *et al.* 2018), celery powder, purple sweet potato powder, red gardenia and paprika powder and cranberry (Jin *et al.* 2018), beet powder (Sucu & Turp, 2018), parsley extract powder (Riel *et al.* 2017) and dry red grape pomace (Riazi *et al.* 2016). However, no studies

have been reported from lipid extracts from papaya epicarp as an alternative source of carotenoid pigments with applications in the manufacture of meat products in order to reduce the presence of nitrites in these products. Therefore, there is potential for a new field of research aimed at establishing the agro-industrial valuation and the technical and economic benefits on the potential use of papaya by-products as a source of natural dyes in the meat industry.

Therefore, the objective of the present study was to evaluate the agro-industrial potential of lipid extracts from papaya epicarp as a partial substitute for nitrites in Frankfurt sausages, in addition to evaluating stability over time to ensure that physicochemical, nutritional and sensory properties were not affected.

MATERIALS AND METHODS

Materials. This research was carried out at the Laboratorio de Tecnología de Carnes and the Laboratorio de Frutas y Hortalizas of the Universidad Nacional de Colombia – Palmira. Papaya residues from fruits in maturity grade 5, composed of epicarp and small mesocarp adhesions, were acquired at different points of sale in the market in the city of Palmira, Valle del Cauca, Colombia. The samples were selected by excluding material with mechanical damage, dark areas or abnormal coloration and were immersed in a hypochlorite solution at 150 ppm for 20 minutes and washed with abundant potable water. Subsequently, they were placed in vacuum-sealed polyethylene bags using an EGARVAC SCP BASIC B devise (Vacarises, Barcelona, Spain) for freezing at -30 ± 2 °C for 24 hours.

To obtain the extract, the material was subjected to freeze drying under a vacuum pressure of 0.120 mBar and at condenser temperature of -80 °C for 24 h using a LABCOMCO, USA, 18 L tray lyophilizer. Subsequently, the dry material was ground using an IKA M.20s#, USA, grinder with a 3 mm diameter hole and screened in a Rotap (M PS-35, Series 1329, Colombia) for 15 minutes, obtaining 0.074 mm particles. The carotenoid pigments were extracted with ultrasound, obtaining an oil-based extract, for which neutral sunflower oil was used according to the methodology proposed by Ordóñez-Santos *et al.* (2015). Finally, the oily papaya epicarp extract (PEE) was added to a meat matrix (Frankfurt sausages) at different concentrations, with a sample without the extract as a control sample (Table 1).

Frankfurt sausage elaboration. Pork meat (pH 6.6) and commercial quality pork back fat purchased from a supermarket in the city of Palmira, Valle del Cauca, Colombia were used to make the sausages. The other supplies and additives used in the formulation of the sausages were purchased in supermarkets in the same city. The formulation and procedure for making the sausages were adjusted to the provisions of Colombian Technical Standard NTC 1325 (ICONTEC, 2008) and were taken from Pinzón-Zárate *et al.* (2015), as seen in table 2.

Table 1. Percentage of nitrites and oily papaya epicarp extract for each treatment.

Treatment	Nitrites %		Oily extract (carotenoids) %	
	%	g/kg of meat	%	g/kg of meat
Control	100	3.300	0	0.000
T1	75	2.475	25	0.825
T2	50	1.650	50	1.650
T3	25	0.825	75	2.475

Table 2. Formulation used to make Frankfurt sausage.

Ingredients	Percentage in the formulation %	
Pork (pH 6.6)	65	
Pork back fat	16	
Wheat flour	5	
Ice	10	
Additives	4	
Total	100	
Additives	%	Weight in relation to meat mass (g/kg)
Salt	0.846	7.0
Sugar	0.242	2.0
Garlic	0.459	3.8
Onion powder	0.060	0.5
Pepper	0.060	0.5
Phosphates	0.484	4.0
Seasoning	1.208	10.0
Monosodium glutamate	0.121	1.0
Ascorbic acid	0.121	1.0
Nitrite ¹	0.398	3.3
Total	4.000	33.1

¹Commercial formulation

The emulsion was prepared using a CM14PGZ Mainca (Barcelona, Spain) cutter with a capacity of 9 kg. The sausages were made with a 23-gauge Amicel® artificial sleeve and tied at a length of 12 cm, which guaranteed an average weight of 60 g per sausage. The processed sausages were subjected to a heat treatment (scalding at 72 °C – internal temperature of the sausage, for 6 minutes) to achieve coagulation of the protein and stability of the emulsion. Said sausages were packed in vacuum polyethylene bags using an EGARVAC SCP Basic B devise (Vacarises, Barcelona, Spain) and refrigerated (3 ± 2 °C) for 72 hours until the respective analyses.

Physicochemical determinations. For each analyzed treatment, the dry matter, protein, ether extract, ash and carbohydrates were determined in triplicate with a proximate analysis according to AOAC methods (AOAC, 2016). Additionally, the caloric value was determined according to the Berthelot-Malher calorimetric pump method cited by Fabbri *et al.* (2000).

The pH measured in the sausages of each treatment was performed with a METTER TOLEDO MP 230 Switzerland digital pH meter according to the methodology proposed by Dzudie *et al.* (2002).

The water holding capacity (WHC) for each sausage treatment was determined according to methodology proposed by Dzudie *et al.* (2002). A 0.5 g sample of each sausage was placed on a grade 1 filter paper under a pressure of one kilogram, exerted by two plexiglass plates, for 20 minutes. The area of the pressed sausage and the liquid extracted from it were determined using ImageJ software (Image J® 1.40 g, Wayne Rasband, National Institutes of Health (USA)) (Pietzsch *et al.* 2012). The water holding capacity (WHC) was determined with the equations 1 and 2.

$$\text{Released water (\%)} = \frac{(S1-S2)}{\omega} \times 61.1 \times 100 \quad \text{equation 1}$$

$$\text{WHC (\%)} = 100 - (\%) \text{released water} \quad \text{equation 2}$$

Where, S1 – total surface area, S2 – area of the pressed sausage, ω – total moisture of the sausage sample, WHC – water holding capacity.

To determine the stability of the emulsion, 6 g of the meat emulsion were taken directly from the cutter and placed in previously weighed 16 ml centrifuge tubes. The tubes were heated at 75 ± 1 °C for 30 minutes and centrifuged at 2100xg for five minutes according to Choe *et al.* (2013). Finally, the stability of the emulsion was calculated using the equation 3.

$$Ee (\%) = \frac{\omega_2}{\omega_1} \times 100 \quad \text{equation 3}$$

Where, Ee – Stability of emulsion (%), ω_1 – Weight of the meat emulsion mass in the tube after draining the lipid layer, ω_2 – Weight of the meat emulsion mass in the tube before heating.

The water activity of each sausage treatment was measured according to AOAC standards (AOAC, 2016) with the help of an AquaLab 4te. USA, hygrometer.

Determination of the texture profile. The methodology proposed by Savadkoohi *et al.* (2014) was used with a universal texturometer, SHIMADZU TESTER EZTestEZ-S (Tokyo, Japan). A 15 mm thick slice was taken from each sausage and placed in the middle of two parallel axial plates, which were compressed 50 % at a speed of 60 mm/min with no waiting interval between the two compressions. The hardness, cohesiveness, elasticity, chewiness, adhesiveness and gumminess were measured.

Determination of the color coordinates CIEL*a*b*. The color coordinates were determined at five different points following the methodology proposed by Ordóñez-Santos *et al.* (2015). A KONICA MINOLTA METER CR-100 (Osaka, Japan) model colorimeter, was used. Illuminant D65 with an 8 mm measurement and 2° observation angle, were used (equipment calibrated with a white ceramic plate with reference values $Y = 89.5$, $x = 0.3176$ and $y = 0.3340$). Three 5 cm long cylindrical samples were taken, making a longitudinal cut to analyze their internal color. The color measurements were expressed in terms of luminosity L^* ($L^* = 0$ for black and $L^* = 100$ for white) and the chromaticity parameters a^* (green [-] and red [+]) and b^* (blue [-] and yellow [+]). Based on these

parameters, the hue or pitch angle (h°) and the chromaticity or saturation index (C) were calculated using the equations 4, 5 and 6.

$$h^\circ = \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad \text{equation 4}$$

$$C^\circ = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad \text{equation 5}$$

The difference in the total color (ΔE) was calculated with the following equation:

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2} \quad \text{equation 6}$$

Sensory evaluation of processed sausages. The sensory characteristics of the different sausages were evaluated with the qualitative parameters smell, color, taste, texture and acceptability. The panel was used on day zero of storage and, for the evaluation, the different sausages were cut into 1.5 cm long and heated with steam (140 °C) for five minutes and offered to the panelists on white plastic trays under natural lighting and at room temperature. Each treatment was identified with random three-digit numbers so that they did not provide any information to the evaluators. A satisfaction degree test was applied to 70 untrained panelists of both sexes and aged between 17 and 65 years. Prior informed consent was obtained from the participants. A survey with a seven-point unstructured hedonic scale was used (1 = I dislike it very much and 7 = I like it very much) (Duizer & Walker, 2016; Baba *et al.* 2016).

Evaluation of the stability of sausages over storage. The stability of the sausages with PEE with the best physicochemical and sensory characteristics was evaluated. For this, the proximate analysis and the color coordinates were measured on days 0, 10, 20 and 30 of storage of the sausages, vacuum-packed and refrigerated (6 ± 2 °C); the analysis was performed for the residual nitrite content and lipid oxidation at 0, 15 and 30 days of storage under the same packaging and refrigeration conditions. All measurements were made in triplicate and are presented as mean value \pm standard deviation.

The proximate analysis, at different evaluation times, was performed according to the methods established by the AOAC (AOAC, 2016). Likewise, the measurements of the color coordinates were carried out under the same conditions. The determination of the residual nitrite was carried out according to the methodology proposed by Zahran & Kassem (2011).

For the determination of lipid oxidation on the evaluation days, the analysis of the reactive substances to 2-thiobarbituric acid reactive substances – TBARS (Ke & Woyewoda, 1979), substances that form as a secondary by-product of lipid peroxidation, including malondialdehyde (MDA). The value of p-anisidine was also quantified according to method proposed by Osawa *et al.* (2008), which measures the oxidative state of lipids, in relation to the quality of flavor. In addition, the peroxide index was determined according to method proposed by Dermis *et al.* (2012), which measures the initial oxidation state or formation of primary products of lipid oxidation.

Experiment design. A sample randomized design was used for the first part of the study, while a randomized block design was applied to determine the stability of the sausages during storage; each treatment had three replications. The level of significance for all treatments was determined with ANOVA analysis of variance, with a significance level of 5 %. The difference between the means of the treatments was determined using the Tukey test, with a probability for significant differences of $p < 0.05$. A statistical analysis was performed with SPSS Statics 19, 2020.

RESULTS AND DISCUSSION

Physicochemical properties of Frankfurt sausage. The results of the proximate analysis, the caloric value and the physicochemical properties did not show significant differences ($p < 0.05$) (Table 3). It was observed that the addition of the oily PEE did not influence the chemical and nutritional characteristics of the different treatments. These results were agree with those presented by Marchetti *et al.*

(2015), who worked with lean reduced sodium sausages with fish oil, optimized for a mix design approach. The pH values were than those of Chattopadhyay *et al.* (2019) (pH = 6.55 on average), who worked on fish sausages with a vegetable gel enriched with chitosan; however, the WHC value was slightly higher than the results presented by the same author (WHC = 91,41 % on average). Likewise, the data provided by Wang *et al.* (2019) in sausages made with beef and mushrooms (*Lentinula edodes*) presented higher pH values (pH = 6.65), but the water activity was similar to that found in this study ($A_w = 0.98$). The research presented by Xiang *et al.* (2019) for sausages with mulberry extract (*Morus alba*) showed a pH value = 5.93, slightly higher than that found in this study. Finally, the data presented by Savadkoohi *et al.* (2014) for sausages with bagasse tomato peels showed similar values to those obtained in this study for both and WHC (pH = 5.48, WHC = 88.22%). The different values found for the physicochemical properties are attributed to the characteristics of the plant substances added in each case, whose chemical composition in highly varied.

Table 3. Proximate analysis, caloric value and physicochemical properties of the different processed sausage treatments.

Proximate Analysis	Control Sausage	Sausage with oily PEE		
	0% oily PEE	T ₁	T ₂	T ₃
		25%	50%	75%
Dry material (%)	31.65 ± 0.30	31.92 ± 0.15	32.13 ± 1.24	31.42 ± 0.28
Protein (%)	61.35 ± 0.08	61.38 ± 0.16	61.32 ± 0.62	61.43 ± 0.69
Ether Extract (%)	18.23 ± 0.11	19.23 ± 0.78	18.30 ± 0.47	18.56 ± 0.51
Ash (%)	7.80 ± 0.29	7.27 ± 0.27	8.00 ± 0.91	7.50 ± 0.34
Caloric value (Cal/g)	5415.3 ± 0.6	5415.3 ± 0.25	5431.3 ± 0.73	5431.3 ± 0.48
pH	5.4 ± 0.26	5.3 ± 0.38	5.3 ± 0.94	5.4 ± 0.27
Water holding capacity (WHC), (%)	95.84 ± 0.56	96.56 ± 0.31	96.87 ± 0.75	96.63 ± 0.48
A_w	0.96 ± 1.38	0.96 ± 0.16	0.96 ± 0.82	0.96 ± 0.64
Emulsion stability. (%)	98.02 ± 0.29	98.36 ± 0.68	98.56 ± 0.11	98.78 ± 0.43

PEE – Papaya epicarp extract

T₁ – 25 % oily PEE, T₂ – 50 % oily PEE, T₃ – 75 % oily PEE

The results are the average of three repetitions and are shown as mean ± standard deviation (n = 3)

Textural and color coordinates of Frankfurt sausage. The result of the texture profile and the surface color coordinates of the analyzed sausages are shown in table 4. Statistically differences were evident in the elasticity and gumminess values, while for the rest of the parameters there were no variations in the texture of the different sausages. These differences could be attributed to the size of the fat globules since this factor is strongly related to the texture with large globules that reduce the adhesion between the proteins and the cellulose and the proteins present in the meat emulsion (Toledo *et al.* 2016).

In a study by Ozaki *et al.* (2020), sausages with two concentrations of mixture of radish powder and chitosan (0.5 % radish powder + 0.25 chitosan and 0.5 % radish powder + 0.5 chitosan) had higher values for all parameters except adhesiveness. The research developed by Rosero-Chasoy *et al.* (2018) on pork sausages with yacon peel flour

lower values than this study for hardness (28.32 N), elasticity (0.41 mm), chewiness (3.58 N/mm) and adhesiveness (-0.52 N/mm), while for cohesiveness (0.30), the value was higher. The variations in the different studies are attributed to the composition of the sausages and, in particular, to the type and content of fats and the greater or lesser amount of water and hydrocolloids used in their preparation, which affect texture, making them harder or softer.

For the color coordinates, statistical differences were evident in the L*, a*, C* and h° parameters, while the b* parameter showed no changes in relation to the control sausage. The L* light intensity was higher in treatment two (T₂), followed by treatment three (T₃) and finally treatment one (T₁). These data differ from those provided by Amensour *et al.* (2010) who worked with chicken sausages with an aqueous extract of *Myrtus communis*, finding a decrease in luminosity as the concentration of the extract increased.

The data presented by Afoakwah *et al.* (2015) showed values similar to those found in this study for sausages with lyophilized Jerusalem artichoke powder (*Helianthus tuberosus* L.). The different variations in luminosity are attributed to the fact that the concentration of the pigments does not contribute to luminosity but is related to a high presence of bound water and fats that predominate in light spaces, decreasing the oxidation capacity of myoglobin. For the a^* and C^* coordinates, a significant increase directly proportional to the increase in the concentration of oily PEE was observed. The highest values were 4.71 and 11.56, respectively (for treatment T_3), which means an increase of 22.33 % for coordinate a^* and 7.24 for

C^* . These values differ from those presented by Pinzón-Zárate *et al.* (2015) for sausages with oily extract of chontaduro palm fruits (*Bactris gasipaes*) and by Rosero-Chasoy *et al.* (2018) for sausages with yacon peel flour (*Smallanthus sonchifolius*), studies in which the value of coordinate a^* was lower than in the control sausage. For chroma, the results of the present study were like those presented by Rosero-Chasoy *et al.* (2018) for sausages with yacon peel flour, by Savadkoohi *et al.* (2014) for pork sausages with tomato peel bagasse and by De Souza Paglarini *et al.* (2019) for bologna-type sausages with a gel prepared from soybean oil.

Table 4. Texture profile and color coordinates of the analyzed sausages.

Texture profile				
Parameter	Control sausage	T ₁	T ₂	T ₃
Hardness (N)	41.56 ± 0.21 ^a	41.31 ± 0.48 ^a	41.26 ± 0.19 ^a	41.95 ± 0.16 ^a
Cohesiveness	-0.01 ± 0.73 ^a	-0.02 ± 0.26 ^a	-0.02 ± 0.18 ^a	-0.02 ± 0.67 ^a
Elasticity (mm)	0.99 ± 1.23 ^a	0.86 ± 0.02 ^b	0.97 ± 0.39 ^a	0.86 ± 0.24 ^b
Chewiness (N/mm)	22.31 ± 0.12 ^a	21.65 ± 0.99 ^a	23.07 ± 0.67 ^a	22.13 ± 0.26 ^a
Adhesiveness (N/mm)	-0.35 ± 0.57 ^a	-0.31 ± 0.38 ^a	-0.32 ± 0.62 ^a	-0.31 ± 0.28 ^a
Gumminess (N)	9.56 ± 0.34 ^c	10.12 ± 0.81 ^b	11.03 ± 0.74 ^a	10.84 ± 0.78 ^b
Color Coordinates CIE L*a*b*				
L*	75.66 ± 0.60 ^c	76.01 ± 0.54 ^b	78.06 ± 0.25 ^a	76.42 ± 0.18 ^c
a*	3.85 ± 0.18 ^b	4.32 ± 0.14 ^a	4.40 ± 0.15 ^a	4.71 ± 0.12 ^a
b*	10.06 ± 0.25 ^a	10.72 ± 0.15 ^a	10.30 ± 0.10 ^a	10.56 ± 0.20 ^a
C*	10.78 ± 0.22 ^b	11.52 ± 0.18 ^a	11.21 ± 0.03 ^a	11.56 ± 0.19 ^a
h°	69.04 ± 1.20 ^a	68.05 ± 0.46 ^b	66.86 ± 0.90 ^c	65.97 ± 0.62 ^c
ΔE	-	0.98 ± 0.20	2.48 ± 0.24	1.26 ± 0.14

L*: 0 = black and 100 = white; a^* : -60 = green and +60 = red; b^* : -60 = blue and +60 = yellow; h - pitch angle: 90° = yellow, 180° = green and 0° = red; C - saturation index, distance from the coordinates at the origin to the determined color point.

T₁ - 25% oily PEE, T₂ - 50% oily PEE. T₃ - 75% oily PEE

The results are the average of three repetitions and are shown as mean ± standard deviation (n = 3)

^{a-c} Averages within rows with different letters are significantly different (p < 0.05)

In general terms, the addition of plant-based flour to meat products leads to a decrease in the red color of the meat because of the reactions that occur, hindering the formation of oxymyoglobin; however, in the case of the PEE, an increase is noted because of its own coloration, which is an intense red-orange color because of the presence of and β carotene, β -cryptoxanthin and lycopene fractions (Velasco-Arango *et al.* 2019), the formation of nitrosomyoglobin and loss of moisture, which favor an increase in the concentration of the heme pigment and the development of the normal coloration of emulsified meat products such as Frankfurt sausages. For the b^* coordinate, the values for all treatments were in a range between (10.06 – 10.74, including the control sausage) without showing statistically significant differences. The lowest value was obtained for treatment T₁ (0.98), sausages with 25 % PEE.

Sensory evaluation of processed sausages. The texture, flavor, smell and acceptance attributes (Figure 1) were not affected by the addition of PEE for treatment T₁, while T₂ and T₃ did show significant differences (p < 0.05). The color was better in the T₁ treatment (25 % PEE). These results agree with those presented by Hernández & Güemes (2010), who registered significant differences in sensory attributes in sausages made with orange epicarp flour.

The results showed that the sausages with better characteristics and better acceptance because of their physicochemical, textural, color and sensory properties were in the T₁ treatment (25 % of PEE and 75 % of nitrites) which is why they were subjected to the stability analysis in the storage time.

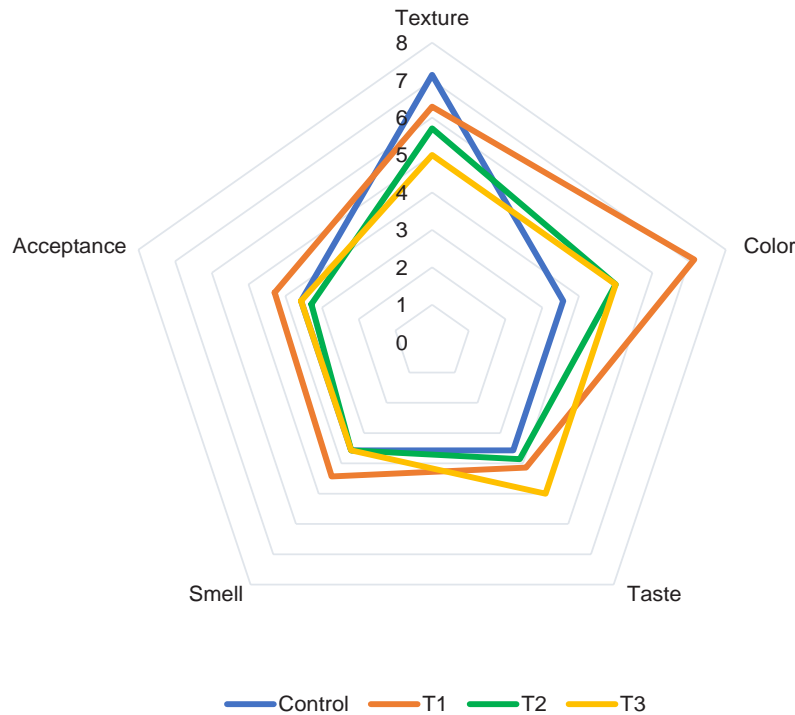


Figure 1. Sensory attributes of sausages with PEE extract.

Control – 0 % oily PEE, T₁ – 25 % oily PEE, T₂ – 50 % oily PEE, T₃ – 75 % oily PEE

Quality scale: 7 – I like it very much, 6 – I like much, 5 – I like moderately, 4 – Neither like or dislike, 3 – I dislike moderately, 2 – I dislike much, 1 – I dislike very much.

The results of the proximate analysis (Table 5) for day 0 agree with the data obtained in the first part of this study (Table 3). When comparing the results from day 0 with day 30, no statistically significant differences were noted for any of the parameters of the

chemical composition. However, for caloric values, a slight non-significant decrease was observed, probably represented by the decrease in lipid content.

Table 5. Proximate analysis, caloric value and CIEL*a*b* color parameters of sausages during storage time.

Proximate analysis	Sausage with 25 % PEE and 75 % nitrites			
	Day 0	Day 10	Day 20	Day 30
Dry material (%)	31.92 ± 0.14	31.76 ± 0.23	31.30 ± 0.21	31.25 ± 0.18
Protein (%)	61.35 ± 0.08	61.36 ± 0.32	61.33 ± 0.24	61.30 ± 0.22
Ether extract (%)	19.22 ± 0.11 ^a	19.17 ± 0.23 ^a	18.65 ± 0.31 ^b	18.02 ± 0.56 ^b
Ash. (%)	7.26 ± 0.18	7.25 ± 0.12	7.26 ± 0.14	7.26 ± 0.33
Caloric value (Cal/g)	5414.86 ± 0.24	5413.75 ± 0.27	5412.69 ± 0.34	5410.67 ± 0.32
Color parameter	Day 0	Day 10	Day 20	Day 30
L*	73.37 ± 0.29 ^a	73.38 ± 0.48 ^a	73.98 ± 0.19 ^a	73.09 ± 0.67 ^a
a*	8.46 ± 0.15 ^a	8.32 ± 0.09 ^a	8.18 ± 0.14 ^a	8.40 ± 0.38 ^a
b*	8.26 ± 0.03 ^a	8.75 ± 0.08 ^a	8.61 ± 0.13 ^a	9.62 ± 0.21 ^b
C*	11.82 ± 0.11 ^b	12.07 ± 0.10 ^a	11.87 ± 0.17 ^b	12.77 ± 0.38 ^a
h°	44.33 ± 0.55 ^c	46.44 ± 0.28 ^b	46.47 ± 0.30 ^b	48.89 ± 0.87 ^a
ΔE	-	0.64 ± 0.14 ^c	0.78 ± 0.12 ^b	1.51 ± 0.28 ^a

PEE – Papaya Epicarp Extract

T₁ – 25 % oily PEE, T₂ – 50 % oily PEE, T₃ – 75 % oily PEE

L*: 0 = black and 100 = white; a*: -60 = green and +60 = red; b*: -60 = blue and +60 = yellow; h - pitch angle: 90° = yellow, 180° = green and 0° = red; C - saturation index, distance from the coordinates at the origin to the determined color point.

The results are the average of three repetitions and are shown as mean ± standard deviation (n = 3)

^{a-c} Averages within rows with different letters are significantly different (p < 0.05)

The CIEL*a*b* color parameters (Table 5) did not show significant differences ($p < 0.05$) in the L* and a* coordinates, while the b*, C*, h° and ΔE parameters did differ with the increased storage time. The determination of color in meat products is not only considered a sensory parameter that determines the acceptance or rejection of a certain product but also shows the changes to which muscle tissue is subjected to during storage. As storage time increased, the ΔE color difference also increased, an increase attributed to isomerization of carotenoid pigments. Feng & Makino (2020) showed similar results in pork sausages at 68 days of storage. Similarly, Dong *et al.* (2020), working on vacuum-packed Harbin red sausages, also did not see significant differences in these coordinates during storage at room temperature over 12 days of observation. In relation to the attributes b*, C* and h°, an increase occurred after 30 days of storage, which is possibly attributed to enzymatic reactions and released moisture that favor alterations in hue and saturation of analyzed sausages. These data agree with those presented by Jin *et al.* (2018) who worked with sausages with different vegetables used as partial nitrite substitution, measured at four weeks of storage, and as stated by Armenteros *et al.* (2013) this increase may be due to the fact that the bioactive compounds in plant extracts promote the reaction between nitrite and muscle myoglobin, forming the pink pigment nitrosylhemochrome.

The analysis of residual nitrite (Table 6) showed a significant reduction during storage, which is attributed to the interaction that occurs between muscle myoglobin and nitrite converted to NO through an oxidation reaction and NO₂ consumption generating NO, which is regulated in the active site of myoglobin, giving rise to the pink color in sausage thanks to the formation of nitrosomyoglobin. These results agree with those presented by Jin *et al.* (2018) for sausages with different types of vegetables at different concentrations, obtaining a decrease from 27.90 mg/kg to 17.22 mg/kg during four weeks of storage. Likewise, Šojić *et al.* (2019) showed a decrease of 24.60 mg/kg in pork sausages with coriander essential oil during fifteen weeks of storage. Finally, Deda *et al.* (2007) showed results similar to this study in frankfurters added with tomato paste, where the value of the residual nitrite after 33 days of storage was reduced from 34.75 mg/kg to 8 mg/kg. The data allowed us to conclude that the analyzed sausages complied with the provisions of Colombian Technical Standard NTC 1325 (ICONTEC, 2008), which allows for a maximum of 200 mg/kg in processed meat products.

Table 6. Results of the analysis of residual nitrite and lipid oxidation for the sausages during the storage time.

Analysis	Sausages with 25% PEE and 75% nitrites		
	Day 0	Day 15	Day 30
Residual Nitrite mg/Kg	41.35 ± 0.18 ^a	30.06 ± 0.30 ^b	21.66 ± 0.21 ^c
Peroxide index meq O ₂ /Kg	23.50 ± 0.97 ^b	27.53 ± 0.56 ^a	29.78 ± 0.38 ^a
p-anisidine Value μmol/μg	25.18 ± 0.61 ^b	27.09 ± 0.49 ^a	28.57 ± 0.46 ^a
Total volatile bases mg N ₂ /100g	12.14 ± 0.88 ^b	16.70 ± 0.73 ^a	19.93 ± 0.43 ^a
TBARS mg MDA/Kg	0.41 ± 0.03 ^b	0.49 ± 0.01 ^b	0.51 ± 0.03 ^a

PEE – Papaya Epicarp Extract

The results are the average of three repetitions and are shown as mean ± standard deviation ($n = 3$)

^{a-c} Means with different letters in the rows are significantly different ($p < 0.05$)

In meat products, the oxidation of fats is one of the main causes of deterioration of quality, and, during storage, changes related to the transformation of intramuscular lipids occur, changes that make it possible to detect alterations in the primary and secondary metabolites of fat oxidation. As the storage time increased, all the measured values (peroxide index, p-anisidine value, total volatile bases and TBARS) increased (Table 6); in the first 15 days of storage, a statistically significant growth ($p < 0.05$) occurred, which allowed us to conclude that fat oxidation is determinant during the first 15 days of storage. These results agree with those presented by Wen *et al.* (2019) and by Deda *et al.* (2007), who worked respectively with dry pork sausages and Frankfurt sausages where there was a significant increase in TBARS values in the first 12 and 33 days of storage, respectively.

The sausages formulated with the lipid extract of carotenoids obtained from papaya epicarp presented excellent physicochemical and sensory characteristics, with very good stability over time, which established a potential use of these extracts in agri-food applications in the meat industry as an alternative that reduces nitrites by 25 % and also as natural colorants in sausages. An interesting alternative is proposed herein that minimizes the negative effect of the action of nitrites in meat products on human health by adding natural carotenoid pigments.

Acknowledgments. The authors would like to thank the Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira for financing the HERMES 43547 project, from which this article is derived. **Conflict of interest:** The manuscript was prepared and revised by

all authors, who declare the absence of any conflict which can put the validity of the presented results at risk. **Authors contribution:** Conceptual Idea by Velasco-Arango, V.A. Methodology design by Hleap-Zapata, J.I., Ordóñez-Santos, L.E. Data collection by Velasco-Arango, V.A. Data analysis and interpretation by Velasco-Arango, V.A., Ordóñez-Santos, L.E., Hleap-Zapata, J.I. Writing and editing by Hleap-Zapata, J.I., Ordóñez-Santos, L.E., Velasco-Arango, V.A.

REFERENCES

1. AFOAKWAH, N.A.; DONG, Y.; ZHAO, Y.; XIONG, Z.; OWUSU, J.; WANG, Y.; ZHANG, J. 2015. Characterization of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) powder and its application in emulsion-type sausage. *LWT - Food Science and Technology*. 64(1):74-81. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.030>
2. AHMAD, S.R.; GOKULAKRISHNAN, P.; GIRIPRASAD, R.; YAHOO, M.A. 2015. Fruit-based natural antioxidants in meat and meat products: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 55(11):1503-1513. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.701674>
3. AMENSOUR, M.; SÁNCHEZ-ZAPATA, H.; ABRINI, J.; SENDRA, E.; SAYAS, E.; NAVARRO, C.; PÉREZ, J.A.; FERNÁNDEZ, J. 2010. Color stability in frankfurter chicken sausages added with *Myrtus communis* leaf aqueous extract. *Optica Pura y Aplicada*. 43(4):251-257.
4. ARMENTEROS, M.; MORCUENDE, D.; VENTANAS, S.; ESTEVEZ, M. 2013. Application of natural antioxidants from strawberry (*Arbutus unedo* L.) and dog rose (*Rosa canina* L.) to frankfurters subjected to refrigerated storage. *Journal of Integrative Agriculture*. 12(11):1972-1981. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60635-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60635-8)
5. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS INTERNATIONAL, AOAC. 2016. Official methods of analysis of AOAC international (20th ed.). Maryland, USA. Available from Internet in: https://www.techstreet.com/standards/official-methods-of-analysis-of-aoac-international-20th-edition-2016?product_id=1937367
6. BABA, Y.; KALLAS, Z.; COSTA-FONT, M.; GIL, J.M.; REALINI, C.E. 2016. Impact of hedonic evaluation on consumers' preferences for beef attributes including its enrichment with n-3 and CLA fatty acids. *Meat Science*. 111:9-17. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.08.005>
7. CARVAJAL-MACÍAS, B.; PÉREZ-RAMÍREZ, S.; GAVIRIA-GAVIRIA, Y.; ALZATE-AGUDELO, J. 2019. Substitution of nitrites in a meat product stuffed with turnip (*Brassica rapa*) and partial replacement of potato flour (*Solanum tuberosum*) by mango peel meal (*Mangifera indica*) for the evaluation of the development of color and texture. *Informador Técnico*. 83(1):19-29. <https://doi.org/10.23850/22565035.1518>
8. CHATTOPADHYAY, K.; XAVIER, M.K.A.; BALANGE, A.; LAYANA, P.; NAYAK B.B. 2019. Chitosan gel addition in pre-emulsified fish mince – Effect on quality parameters of sausages under refrigerated storage. *LWT - Food Science and Technology*. 110:283-291. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.081>
9. CHOE, J.H.; KIM, H.Y.; LEE, J.M.; KIM, Y.J.; KIM, C.J. 2013. Quality of frankfurter-type sausages with added pig skin and wheat fiber mixture as fat replacers. *Meat Science*. 93(4):849-854. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.11.054>
10. DE SOUZA PAGLARINI, P.; DE FIGUEREDO, G.; HONORIO, A.R.; MOKARSEL, L.; DA SILVA, V.A.; BADEN, A.P.; CUNHA, R.L.; RODRIGUEZ P., M.A. 2019. Functional emulsion gels as pork fat replacers in bologna sausage. *Food Structure*. 20:100105. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2019.100105>
11. DEDA, M.S.; BLOUKAS, J.G.; FISTA, G.A. 2007. Effect of tomato paste and nitrite level on processing and quality characteristics of frankfurters. *Meat Science*. 76(3):501-508. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.01.004>
12. DERMIS, S.; CAN, S.; DOĞRU, B. 2012. Determination of peroxide values of some fixed oils by using the mfox method. *Spectroscopy Letters*. 45:359-363. <https://doi.org/10.1080/00387010.2012.666702>
13. DONG, C.; WANG, B.; LI, F.; ZHONG, Q.; XIA, X.; KONG, B. 2020. Effects of edible chitosan coating on Harbin red sausage storage stability at room temperature. *Meat Science*. 159:107919. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107919>
14. DORADO, D.J.; HURTADO, A.M.; MARTÍNEZ-CORREA, H.A. 2017. Supercritical extraction of papaya (*Carica papaya*) seed oil: composition and physicochemical properties. *Vitae, Revista De La Facultad De Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias*. (Colombia). 24(2):35-45. [https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v24n2\(2\)a05](https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v24n2(2)a05)
15. DUIZER, L.M.; WALKER, S.B. 2016. The application of sensory science to the evaluation of grain-based foods. *Encyclop. Food Grains*. 3:144-153. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00134-0>
16. DZUDIE, T.; SCHER, J.; HARDY, J. 2002. Common bean flour as an extender in beef sausages. *Journal of Food Engineering*. 52(2):143-147. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00096-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00096-6)
17. FABBRI, D.; LOCATELLI, C.; TARABUSI, S. 2000. A new procedure, based on combustion to sulphate and ion chromatography for the analysis of elemental

- sulphur in sediments. *Chromatographia*. 53:119-121. <https://doi.org/10.1007/BF02491557>
18. FENG, C.H.; MAKINO, Y. 2020. Color analysis in sausages stuffed in modified casings with different storage days using hyperspectral imaging - a feasibility study. *Food Control*. 111:107017. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107047>
 19. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FAO. 2019. Tropical fruits. Rome, Italy. Available from Internet in: <https://www.fao.org/3/cb071en/cb0717en.pdf>.
 20. GASSARA, F.; KOUASSI, A.P.; BRAR, S.K.; BELKACEMI, K. 2016. Green alternatives to nitrites in meat-based products - a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 56(13):2133-2148. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.812610>
 21. HERNÁNDEZ, S.; GÜEMES, N. 2010. Efecto de la aplicación de harina de cáscara de naranja sobre las propiedades físico-químicas, texturales y sensoriales de salchichas cocidas. *Nacameh*. 41(1):23-36.
 22. HWANG, K.E.; KIM, T.K.; KIM, H.W.; SEO, D.H.; KIM, Y.B.; JEON, K.H.; CHOI, Y.S. 2018. Effect of natural pre-converted nitrite sources on color development in raw and cooked pork sausages. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 31(8):1358-1365. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0767>
 23. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIONES, ICONTEC. 2008. Food industries. Non-canned processed meat products – NTC 1325. Bogotá, Colombia. Available from Internet in: https://www.academia.edu/38931022/NORMA_TÉCNICA_NTC_COLOMBIANA_1325.
 24. JIN, S.K.; CHOI, J.S.; YANG, H.S.; PARK, T.S.; YIM, D.G. 2018. Natural curing agents as nitrite alternatives and their effects on physicochemical, microbiological properties and sensory evaluation of sausages during storage. *Meat Science*. 146:34-40. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.032>
 25. KE, P.I.; WOYEWODA, A.D. 1979. Microdetermination of thiobarbituric acid values in marine lipids by a direct spectrophotometric method with a monophasic reaction system. *Analytica Chimica Acta*. 106(2):279-284. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(01\)85011-X](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(01)85011-X)
 26. LOPERA MESA, M.M.; HOMEZ, J.O.; ORDOÑEZ ERAZO, M.M.; PABÓN, H.; MARTÍNEZ, Á.M.; FIGUEROA CASAS, A.; PROBST, R.; PAEZ, Y.; MORENO, G.; BUSTAMANTE, C. PINZÓN, F. 2009. Guía Ambiental Hortofrutícola de Colombia. -ASOHOFRUCOL. Bogotá, D.C. Colombia. 92p. Available from Internet in: <https://logihortifrutic.unibague.edu.co/documentacion-bpa/43-04-biblioteca-30-guiahortifruticultura-1/file>
 27. MARCHETTI, L.; ARGEL, N.; ANDRES, S.C.; CALIFANO, A.N. 2015. Sodium-reduced lean sausages with fish oily optimized by a mixture design approach. *Meat Science*. 104:67-77. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.02.005>
 28. ORDOÑEZ-SANTOS, L.E.; HURTADO-AGUILAR, P.; RÍOS-SOLARTE, O.D.; ARIAS-JARAMILLO, M.E. 2014. Concentración de carotenoides totales en residuos de frutas tropicales. *Producción + Limpia*. 9(1):91-98.
 29. ORDOÑEZ-SANTOS, L.E.; PINZÓN-ZÁRATE, L.X.; GONZÁLEZ-SALCEDO, L.O. 2015. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of total carotenoids from peach palm (*Bactris gasipaes*) by-products with sun flower oil using response surface methodology. *Ultrasonics Sonochemistry*. 27:560-566. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.04.010>
 30. OSAWA, C.C.; GUARALDO GONÇALVES, L.A.; RAGAZZI, S. 2008. Evaluation of the quality of pet foods using fast techniques and official methods. *Food Science and Technology*. 28:223-230. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000500034>
 31. OVANDO-MARTÍNEZ, M.; LÓPEZ-TEROS, M.; TORTOLEDO-ORTIZ, O.; ASTIAZARÁN-GARCÍA, H.; AYALA-ZAVALA, J.F.; VILLEGAS-OCHOA, M.A.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G.A. 2018. Effect of ripening on physico-chemical properties and bioactive compounds in papaya pulp, skin and seeds. *Indian Journal of Natural Products and Resources*. 9(1):47-59.
 32. OZAKI, M.M.; MUNEKATA, P.E.; DE SOUZA LOPEZ, A.; DA SILVA DO NASCIMENTO, M.; PATEIRO, M.; LORENZO, J.M.; RODRIGUES POLLONIO, M.A. 2020. Using chitosan and radish powder to improve stability of fermented cooked sausages. *Meat Science*. 167:108165. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108165>
 33. PATHAK, P.D.; MANDAVGANE, S.A.; KULKARNI, B.D. 2019. Waste to wealth: a case of study of papaya peel. *Waste Biomass Valorization*. 10:1755-1766. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0181-x>
 34. PIETZSCH, T.; PREIBISCH, S.; TOMANČÁK, P.; SAALFELD, S. 2012. ImgLib2 - Generic image processing in Java. *Bioinformatics*. 28(22):3009-3011. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts543>
 35. PINZÓN-ZÁRATE, L.X.; HLEAP-ZAPATA, J.I.; ORDOÑEZ-SANTOS, L.E. 2015. Color parameters analysis in frankfurter sausages with addition of oily extract of peach palm (*Bactris gasipaes*) by-products. *Inf. Tecn. (Chile)*. 26(5):45-55. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000500007>
 36. RIAZI, F.; ZEYNALI, F.; HOSEINI, E.; BEHMADI, H.; SAVADKOOHI, S. 2016. Oxidation phenomena and color properties of grape pomace on the nitrite-reduced

- meat emulsion systems. *Meat Science*. 121:350-358. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.07.008>
37. RIEL, G.; BOULAABA, A.; POPP, J.; KLEIN, G. 2017. Effects of parsley extract powder as an alternative for the direct addition of sodium nitrite in the production of mortadella-type sausages – Impact on microbiological, physicochemical and sensory aspects. *Meat Science*. 131:166-175. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.05.007>
38. RODRÍGUEZ-LEYTON, M. 2019. Challenges for the consumption of fruits and vegetables. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*. 19(2):105-112. <https://doi.org/10.25176/RFMH.v19.n2.2077>
39. ROSERO-CHASOY, G.; HLEAP-ZAPATA, J.I.; AYALA-APONTE, A.A.; GIRALDO-GÓMEZ, G.I.; SERNA-COCK, L. 2018. Formulation of frankfurter-type sausage with yacon peel flour as non-conventional linker. *Advance Journal of Food Science and Technology*. 16:244-250. <https://doi.org/10.19026/ajfst.16.5962>
40. SAVADKOOHI, S.; HOOGENKAMP, H.; SHAMSI, K.; FARAHNAKY, A. 2014. Color sensory and textural attributes of beef frankfurter, beef ham and meat-free sausage containing tomato pomace. *Meat Science*. 97(4):410-418. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.03.017>
41. ŠOJIC, B.; PAVLIĆ, B.; IKONIĆ, P.; TOMOVIĆ, V.; IKONIĆ, B.; ZEKOVIĆ, Z.; KOCIĆ-TANACKOV, S.; JOKANOVIĆ, M.; ŠKALJAC, S.; IVIĆ, M. 2019. Coriander essential oil as natural food additive improves quality and safety of cooked pork sausages with different nitrite levels. *Meat Science*. 157:107879. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107879>
42. SUCU, C.; TURP, G.Y. 2018. The investigation of the use of beetroot powder in Turkish fermented beef sausage (sucuk) as nitrite alternative. *Meat Science*. 140:158-166. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.03.012>
43. TOLEDO, O.; CENTURIÓN, D.; FRAGOSO, M. 2016. Effect on instrumental texture when oleogel was employed as fat replacer in cooked sausages. *Nacameh*. 10(1):17-26.
44. VELASCO-ARANGO, V.A.; SOTELO-BARBOSA, J.E.; ORDÓÑEZ-SANTOS, L.E.; HLEAP-ZAPATA, J.I. 2019. Characterization of functional components flour epicarp papaya (*Carica papaya* L.) as a source of natural pigments. *Respuestas Journal of Engineering Sciences*. 24(2):39-48. <https://doi.org/10.22463/0122820X.1829>
45. WANG, L.; GUO, H.; LIU, X.; JIANG, G.; LI, C.; LI, X.; LI, Y. 2019. Roles of Lentinula edodes as the pork lean meat replacer in production of the sausage. *Meat Science*. 156:44-51. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.05.016>
46. WEN, R.; HU, Y.; ZHANG, L.; WANG, Y.; CHEN, Q.; KONG, B. 2019. Effect of NaCl substitutes on lipid and protein oxidation and flavor development of Harbin dry sausage. *Meat Science*. 156:33-43. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.05.011>
47. XIANG, R.; CHENG, J.; ZHU, M.; LIU, X. 2019. Effect of mulberry (*Morus alba*) polyphenols as antioxidant on physicochemical properties, oxidation and bio-safety in Cantonese sausages. *LWT-Food Sci. Technol*. 116:108504. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108504>
48. ZAHARAN, D.A.; KASSEM, G.M.A. 2011. Residual nitrite in some Egyptian meat products and the reduction effect of electron beam irradiation. *Advance Journal of Food Science and Technology*. 3(5):376-380.



Effect of applications of 1-MCP and ethylene on the ripening and degreening process of banana fruits cv. Barranquillo

Efecto de la aplicación de 1-MCP y etileno en la maduración y proceso de desverdizado de frutos de banano cv. Barranquillo

Edwin Yobany Valbuena-Tellez¹ ; John Edisson Patiño-Guio¹ ; Helber Enrique Balaguera-López^{2*} 

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: edwin.valbuena02@uptc.edu.co; john.patino@uptc.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de Investigación Horticultura. Bogotá, Colombia; e-mail: hebalagueral@unal.edu.co

*corresponding author: hebalagueral@unal.edu.co

How to cite: Valbuena-Tellez, E.Y.; Patiño-Guio, J.E.; Balaguera-López, H.E. 2023. Effect of applications of 1-MCP and ethylene on the ripening and degreening process of banana fruits cv. Barranquillo. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e1978. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.1978>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

Received: June 8, 2021 **Accepted:** April 11, 2023 **Edited by:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

ABSTRACT

The banana cv. Barranquillo (*Musa acuminata*, AAA, 'Gros Michel') is a highly desired fruit because of its productive potential and organoleptic quality but various aspects of the ripening process are unknown. The objective of this research was to evaluate the effect of applications of 1-MCP and ethylene on the ripening and degreening process. Two experiments were carried out at room temperature with fruits harvested at commercial maturity. The first four treatments evaluated maturation: control, ethylene, 1-MCP, and 1-MCP + ethylene. In the second experiment, different concentrations of ethylene based on ethephon (0, 100, 500 and 1000 $\mu\text{L L}^{-1}$) were evaluated. The fruits treated with 1-MCP decreased the ripening process, and 1-MCP was a good alternative for conserving the fruits; the ethylene had opposite results. The color index of the skin, weight loss, firmness, total soluble solids, and maturity ratio had changes associated with the presence of ethylene. In the second experiment, the ethylene applications between 100 and 500 $\mu\text{L L}^{-1}$ sufficiently stimulated degreening but accelerated the ripening process.

Keywords: Ethephon; Plant hormone; Plant physiology; Postharvest; Skin color.

RESUMEN

El banano cv. Barranquillo (*Musa acuminata*, AAA, 'Gros Michel') es un fruto muy apetecido por su potencial productivo y calidad organoléptica, pero se desconocen varios aspectos del proceso de maduración. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de 1-MCP y etileno en la maduración y en el proceso de desverdizado. Se realizaron dos experimentos a temperatura ambiente y con frutos cosechados en madurez comercial; en el primero, se evaluaron cuatro tratamientos, para entender la regulación de la maduración, estos fueron: testigo, etileno, 1-MCP y 1-MCP+etileno. En el segundo experimento, se evaluaron diferentes concentraciones de etileno, a base de etefon (0, 100, 500 y 1000 $\mu\text{L L}^{-1}$). Los frutos tratados con 1-MCP presentaron una disminución en el proceso de maduración, por tanto, el 1-MCP, se convierte en una buena alternativa de conservación, mientras que con etileno, el proceso fue opuesto. Se evidenció que el índice de color de la epidermis, la pérdida de peso, la firmeza, los sólidos solubles totales y la relación de madurez se consideran cambios asociados a la presencia de etileno. En el segundo experimento se encontró que, aplicaciones de etileno entre 100 y 500 $\mu\text{L L}^{-1}$, se consideran suficientes para estimular el desverdizado, pero aceleran el proceso de maduración.

Palabras clave: Color de la epidermis; Etefon; Fisiología vegetal; Hormonas vegetales; Poscosecha.

INTRODUCTION

The banana (*Musa acuminata*, group AAA) is one of the most cultivated fruit crops in the world (Pérez & Torres-Bazurto, 2020). Banana is a tropical fruit with a high nutritional value that is widely consumed around the world because of its pleasant aroma and flavor (Khawas *et al.* 2014; Zhu *et al.* 2018). Colombia is one of the more important countries for banana export production. Antioquia, Magdalena, and La Guajira are the departments with the highest production in the country. In 2021, this country produced 2,413,769t in 101,890 ha, of which 2.103.076 t were exported (FAO, 2023). The banana is a typical climacteric fruit, and its ripening is closely associated with a strong increase in ethylene production (Zhu *et al.* 2015). It has a high respiratory rate after harvest, which makes it highly perishable and prone to postharvest losses (Brat *et al.* 2020).

One way to reduce postharvest losses of fruits is to know what processes are associated with ethylene during ripening, as a basis for the use of different technologies that reduce the biosynthesis and action of this hormone (Mariño-González *et al.* 2019). This is because ethylene is the hormone responsible for triggering physiological, biochemical, and molecular processes (An *et al.* 2020). Therefore, ethylene guarantees the ripening of different fruits but also induces senescence, an important cause of nutritional, physical and economic losses in agricultural products (Bapat *et al.* 2010; Pareek, 2016). Several studies have methodologically reported on applications of ethylene and 1-methylcyclopropene (1-MCP) in climacteric fruits to determine the role of endogenous ethylene in ripening (Mariño-González *et al.* 2019; González *et al.* 2021), including in bananas (Golding *et al.* 1998; Zhu *et al.* 2015).

1-MCP is a maturity retardant that irreversibly occupies the membrane ethylene receptors and is the main inhibitor compound of the action of ethylene (In *et al.* 2013) but also inhibits the biosynthesis of this hormone (Balaguera-López *et al.* 2021). In banana cv. Fenjiao, 1-MCP decreased the activity of ethylene synthesis enzymes (Zhu *et al.* 2020). 1-MCP has important effects on delaying ripening in banana fruits (Botondi *et al.* 2014; Li *et al.* 2023). However, the concentration and timing of treatments could affect normal ripening (Zhu *et al.* 2015). Bananas treated with 1-MCP remained green or ripen with an uneven color (Harris *et al.* 2000). In banana cv. 'Brazil', a combination of 50 $\mu\text{L L}^{-1}$ ethephon with 400 nL L^{-1} 1-MCP (16 h) was the most appropriate treatment, which significantly delayed ripening and maintained the commercial value of the fruits without negatively affecting normal ripening (Zhu *et al.* 2015).

On the other hand, bananas are commonly harvested at commercial maturity, in a pre-climacteric phase, just before ripening begins. For this reason, artificial ripening treatments with exogenous ethylene are often necessary to ensure that bananas have an ideal yellow color and are ready to eat in local and export markets (Pongprasert *et al.* 2020). The effects of ethylene involve both the synthesis and

accumulation of pigments, such as anthocyanins and carotenoids, and the decomposition of chlorophyll; the latter is critical in industrial treatments for the degreening of various fruit, crops such as citrus, banana and mango before marketing (Xie *et al.* 2016; Li *et al.* 2019a). However, this process is unknown in cv. Barranquillo, a material with very good productive and quality characteristics.

Therefore, this research aimed: a) to study the effect of applications of 1-MCP and ethylene on the postharvest ripening process and b) to evaluate the effectiveness of different concentrations of ethylene on the degreening process in banana fruits cv. Barranquillo (*Musa acuminata*, AAA, 'Gros Michel').

MATERIALS AND METHODS

Plant material and location. The study was carried out in the Plant Physiology laboratory of the Faculty of Agricultural Sciences of the Pedagogical and Technology University of Colombia, Tunja-Boyacá. 160 fruits (182 ± 7.9 g) without phytosanitary or mechanical damage were collected at harvest maturity (color index of -3.06) from commercial bananas cv. Barranquillo (*Musa acuminata*, AAA, 'Gros Michel') in the municipality of Miraflores-Boyacá, coordinates $5^{\circ}11'49''$ N and $73^{\circ}8'47''$ W, located at an altitude of 1432m a.s.l. with an average temperature of 24 °C.

Experiment 1. Effect of 1-MCP and ethylene. The fruits were separated into 4 groups: T1: control without applications, T2: Ethylene ($1000 \mu\text{L L}^{-1}$), T3: 1-MCP (0.35 mg L^{-1}), and T4: 1-MCP (0.35 mg L^{-1}) + Ethylene ($1000 \mu\text{L L}^{-1}$). This experiment was carried out with a completely randomized design with 4 repetitions, and each experimental unit consisted of 5 fruits.

For the ethylene applications, 3 L containers were used, in which the required solution was prepared from ethephon commercial formula of 48 % and the fruits were left immersed for 10 minutes. The 1-MCP was applied in liquid form with the same immersion time. After the treatments, the fruits were left on absorbent paper until they were completely dry, and then they were placed in polystyrene trays to evaluate maturation at room temperature (16 °C, 75 % RH). In the 1-MCP + Ethylene treatment, ethylene was applied 5 days after the 1-MCP was applied.

Experiment 2. Degreening with ethylene. Using a completely randomized design, 4 treatments based on ethephon (chemical ethylene liberator) were evaluated: 0, 100, 500 and $1000 \mu\text{L L}^{-1}$. Each treatment had 4 repetitions with 5 fruits. The application and storage conditions were the same as in experiment 1.

Variables. The following parameters were determined for 19 days and 12 days in experiment 1 and 2, respectively.

The weight loss (%) was determined from the difference in the fresh mass of the fruits measured on a digital scale. For the color of the epidermis, the parameters of the CIELab system "L*", "a*" and "b*" were determined in three equidistant points of the fruits using a CR-20 digital colorimeter (Konica Minolta). Then,

the color index was calculated following the methodology used by Pinzón-Sandoval *et al.* (2022). The firmness (N) was measured in the equatorial zone of fruits with epidermis with a PCE-PTR200 penetrometer. Then, a pulp sample was extracted to estimate the total soluble solids (TSS; °Brix) with a digital refractometer (Hanna brand, Woonsocket, RI) and the total titratable acidity (TTA; % of malic acid) with acid-base titration from 0.1 N NaOH using a digital buret. The maturity ratio (MR) was calculated as the ratio between the TSS and TTA.

Statistical analysis. Tests of normality (Shapiro-Wilk test) and homogeneity of variances (Levene’s test) were carried out, followed by analysis of variance and Tukey’s mean comparison test ($p \leq 0.05$) with SPSS v.19.

RESULTS AND DISCUSSION

Experiment 1. The fruits treated with ethylene and the control fruits presented a more accelerated ripening process than the fruits treated with 1-MCP alone or in combination with ethylene. The former had a postharvest duration of 12 days at room temperature,

while the 1-MCP fruits were still green at the end of the experiment (19 days) without reaching consumption maturity. These results confirmed the results reported by Zhu *et al.* (2015) and Li *et al.* (2023) in banana cv. Brazil, where 1-MCP delayed the ripening process and lengthened the postharvest life.

The epidermis color index increased as a function of storage; it was higher in the fruits treated with ethylene ($p < 0.01$), followed by the control fruits, and was lower in the fruits with applications of 1-MCP and 1-MCP + ethylene throughout the experiment (Figure 1a and b). At the end of the experiment, the fruits in the last two treatments still had a green epidermis, as indicated by the negative values of the color index (Figure 1b). The increase in the color index observed in the banana fruits was due to the unmasking of carotenoids (β -carotene and β -cryptoxanthin) and the degradation of chlorophylls by enzymatic activity (Zhou *et al.* 2010; Thompson, 2011). This process would be slower with the application of 1-MCP. It has been reported that 1-MCP decreases the degradation rate of chlorophylls while maintaining the functionality of chloroplasts (Rodrigo *et al.* 2013).

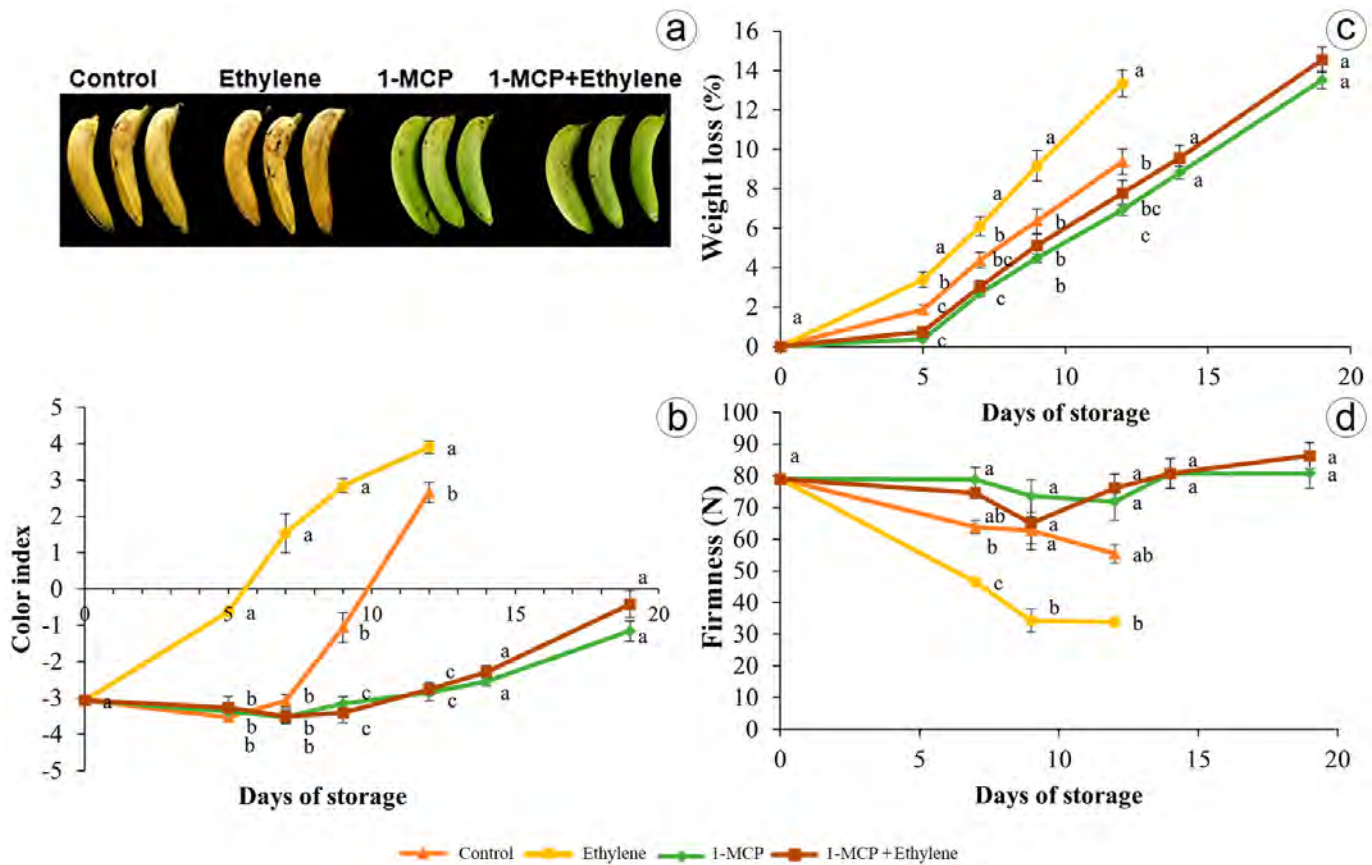


Figure 1. Effect of postharvest applications of 1-MCP and ethylene on: a) epidermis color at 12 days; b) epidermis color index; c) Weight loss; d) Firmness of banana fruits cv. Barranquillo. The vertical bars in each mean indicate the standard error (n = 4). The means followed by different letters in each measurement indicate statistical differences according to Tukey’s test ($p < 0.05$).

Zhu *et al.* (2020) studied the Fenjiao banana, found that the control fruits rapidly increased the color index until consumption maturity, and in turn found that the treatment with 1-MCP drastically delayed the ripening process, which coincides with that found in the bananas cv. Barranquillo. This may be correlated with the non-expression of genes that code for the enzymes that participate in the degradation of chlorophylls and the unmasking of carotenes. However, these effects on delayed maturation may be reversible since the application of 1-MCP does not necessarily block all ethylene receptors. However, the fruits treated with 1-MCP + ethylene did not show changes in color up to 19 days of storage (Figure 1), perhaps because the fruits treated with 1-MCP did not promote new receptors because of the signal blocking, preventing the binding of ethylene to a greater number of receptors (Feygenberg *et al.* 2012).

Statistical differences were found for weight loss between days 5 and 12 of the storage ($p < 0.01$). The weight loss increased continuously in all treatments, was always higher in the fruits with ethylene (13.35 ± 0.67 %) and was lower in the fruits in the two treatments with 1-MCP. At the end of the study, these treatments showed the greatest weight loss but lasted the longest (Figure 1c). The banana has respiration and transpiration processes that lead to a reduction in weight (Thompson, 2011; Li *et al.* 2019b). Bananas treated with 1-MCP would present less activity in these processes. Chiabrande & Giacalone (2011) obtained less weight loss with $0.3 \mu\text{L L}^{-1}$ per 24h of 1-MCP in blueberries.

The greater weight loss seen with ethylene indicated a greater loss of water from tissue, leading to higher rates of ripening and deterioration. The result is a reduction in quality and value, indicating that water plays an important role in fruit shelf-life, quality, and market price (Cosme *et al.* 2017). A lower weight loss is essential, and these results showed that 1-MCP is effective at minimizing water loss during storage.

Firmness presented significant differences from 7 to 12 days. A continuous and gradual loss in firmness was observed in the control fruits and fruits with ethylene, the latter decreased rapidly, reaching the lowest levels during the experiment and at the maturity of consumption, 33.8 ± 1.2 N. The fruits treated with 1-MCP and 1-MCP + ethylene maintained almost constant firmness, with values around 80N (Figure 1d). These results are similar to those found in the Brazil cv. by Zhu *et al.* (2015) and Li *et al.* (2023), where 1-MCP delayed loss of firmness.

Firmness is an important attribute that determines postharvest life and quality since it has a direct impact on the export and commercialization of the product. In fruits, softening occurs due to the deterioration of structural and non-structural carbohydrates in the cell wall and hydrolysis of starch (Cosme *et al.* 2017). Some enzymes that intervene in the degradation of the cell wall are pectin methyl esterase, polygalacturonase, β -galactosidase, and endo-1,4- β -d-glucanase, among others (Maduwanthi & Marapana, 2019). It is probable that these enzymes increase activity in banana fruits with applications of ethylene and inhibit activity in the presence of 1-MCP, as reported in other studies (Zhu *et al.* 2015; Baswal *et al.* 2020; Li *et al.* 2023).

The TSS content increased during the storage period for the banana fruits with the ethylene treatment, which presented a value of 23.6 ± 0.3 °Brix at consumption maturity. The fruits in the control treatment increased the TSS starting at 7 days of storage and, at 12 days, reached TSS of 20 ± 1 °Brix. The fruits with 1-MCP alone or in combination had TSS that were practically unchanged during storage, and, in all samplings, they were significantly lower ($p \leq 0.01$) with values < 8 °Brix (Figure 2a).

Similar results have been reported in bananas, such as those of Thakur *et al.* (2019), where the control fruits reached values around 20.5 °Brix after 8 days of storage. An increase in TSS may be associated with starch degradation and dehydration of bananas during storage. Starch is the main form of carbon reserve in green banana fruits, so, during ripening, this phenomenon is mainly explained by the hydrolysis of starch and other carbohydrates that lead to the production of soluble sugars such as glucose, sucrose, and fructose (Li *et al.* 2019b); this hydrolysis is accelerated in the presence of ethylene. In banana cv. Barranquillo, applications of 1-MCP delayed increases in TSS, as reported in cv. Gros Michel by Ketsa *et al.* (2013). This is because 1-MCP decreases the degradation of starch in bananas, possibly as the result of a decrease in respiratory metabolism. Soluble sugars were inhibited in bananas cv Fenjiao in the presence of 1-MCP (Zhu *et al.* 2020).

The total titratable acidity did not present significant differences and increased during the post-harvest of the bananas. At the end of storage, the fruits with 1-MCP alone or in combination presented an acidity of around 0.6% (Figure 2b). This behavior was partially like that reported by Thakur *et al.* (2019), where acidity increased to a maximum peak and then decreased. These authors indicated that the increase in acidity was attributed to a higher activity of malate synthase and phosphoenolpyruvate carboxylase, which apparently, in banana fruits cv. Barranquillo, were not affected by ethylene and 1-MCP. Therefore, TTA changes are not clearly associated with the presence of ethylene, as was the case with the previous variables.

The maturity ratio behaved similarly to the TSS. In the treatments with 1-MCP, this parameter was significantly lower and constant during storage with values around 12, while the fruits with ethylene increased the MR from the beginning of storage, and the control did so from day 7. At the end of the storage, the values were 54.7 ± 3.1 and 46.9 ± 2.1 , respectively (Figure 2c). Ketsa *et al.* (2013) found that the MR remained lower when bananas were treated with 1-MCP and packed in a modified atmosphere. The maturity ratio indicates the balance between sugars and acids and is related to the taste and acceptability of the product by consumers. In the control fruits and with ethylene, this acceptability was achieved more quickly, mainly as a result of the increase in TSS. The banana fruits treated with 1-MCP were affected by the inhibiting action of endogenous ethylene, completely decreasing the maturity ratio during the storage period, even after the application of exogenous ethylene, also indicating the high efficiency of 1-MCP and the low response to the generation of new ethylene receptors.

The 1-MCP results coincide with the report by Zhu *et al.* (2015), who indicated that this compound is a tool to further investigate

the role of ethylene in ripening and senescence and is a commercial technology to improve product quality maintenance. Another important aspect is that the fruits treated with 1-MCP alone or in combination with ethylene did not ripen in the 19 days. Therefore, a study with a longer evaluation time and lower doses of 1-MCP or prior applications of ethylene is recommended because there are reports that 1-MCP can generate incomplete or uneven yellowing of the epidermis (Harris *et al.* 2000).

Experiment 2. It was found that the color index of the epidermis increased throughout the 12 days that the experiment lasted. There were statistical differences ($p < 0.01$) from 5 to 12 days. In all cases,

the control fruits presented the lowest color index, while with 500 and 1000 $\mu\text{L L}^{-1}$ of ethylene. The color change was greater and much faster starting at 5 days of storage; an effect was already evident, and consumption maturity was observed at 7 days (Figure 3a and b). However, at 12 days, the ethylene doses saw the same response (Figure 3b). These results coincide with the report by Du *et al.* (2016) who indicated that bananas respond to treatments with ethylene, which induce rapid color changes from green to yellow through rapid degradation of chlorophyll in the epidermis and carotenoid synthesis.

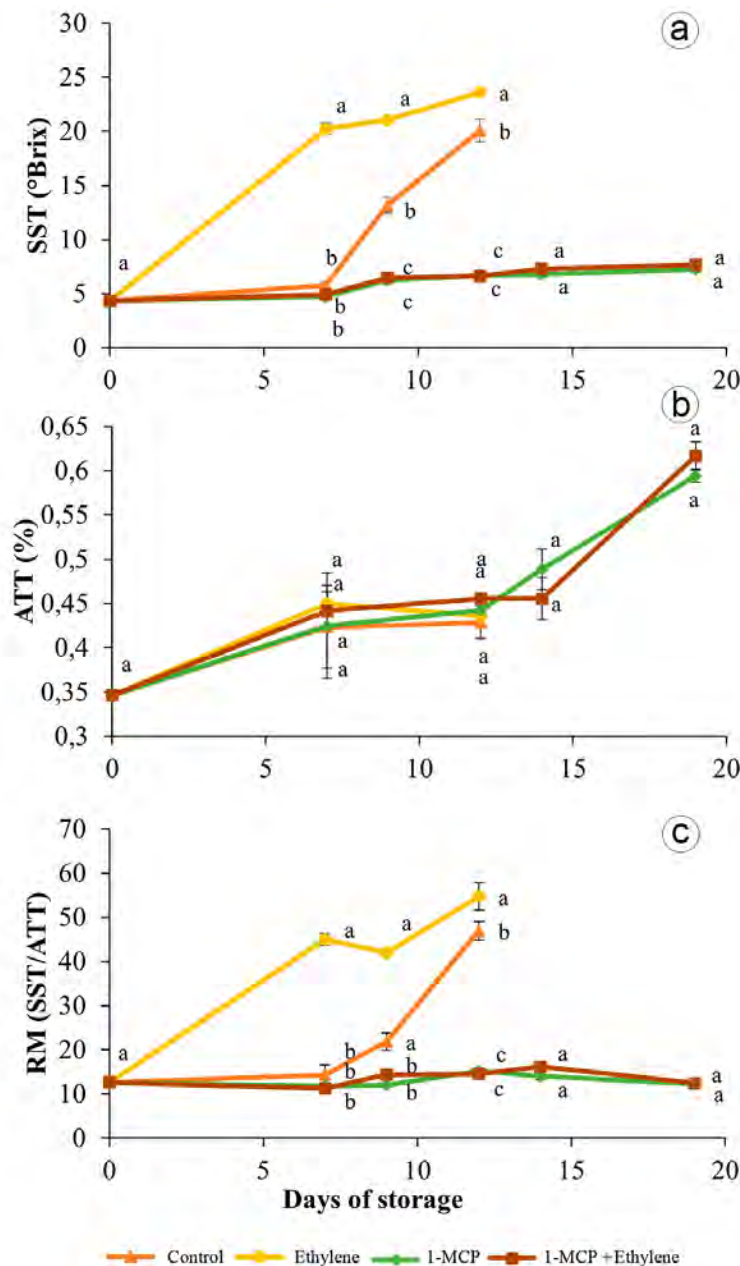


Figure 2. Effect of the postharvest applications of 1-MCP and ethylene on: a) total soluble solids; b) total titratable acidity; c) maturity ratio of banana fruits cv. Barranquillo. The vertical bars in each mean indicate the standard error (n = 4). The means followed by different letters in each measurement indicate statistical differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

The weight loss presented statistical differences starting at the fifth day of storage. The maximum weight loss was recorded in the fruits subjected to ethylene concentrations of $1000 \mu\text{L L}^{-1}$ with a loss of $20.79 \pm 0.59\%$. On the contrary, the minimum weight loss ($11.06 \pm 0.58\%$) was recorded in the control fruits (Figure 3c). These

results indicated that, although ethylene stimulates the degreening process, it also affects other metabolic processes that accelerate maturation. In this case, respiration and transpiration increased, as the main determining processes of weight loss (Li *et al.* 2019b).

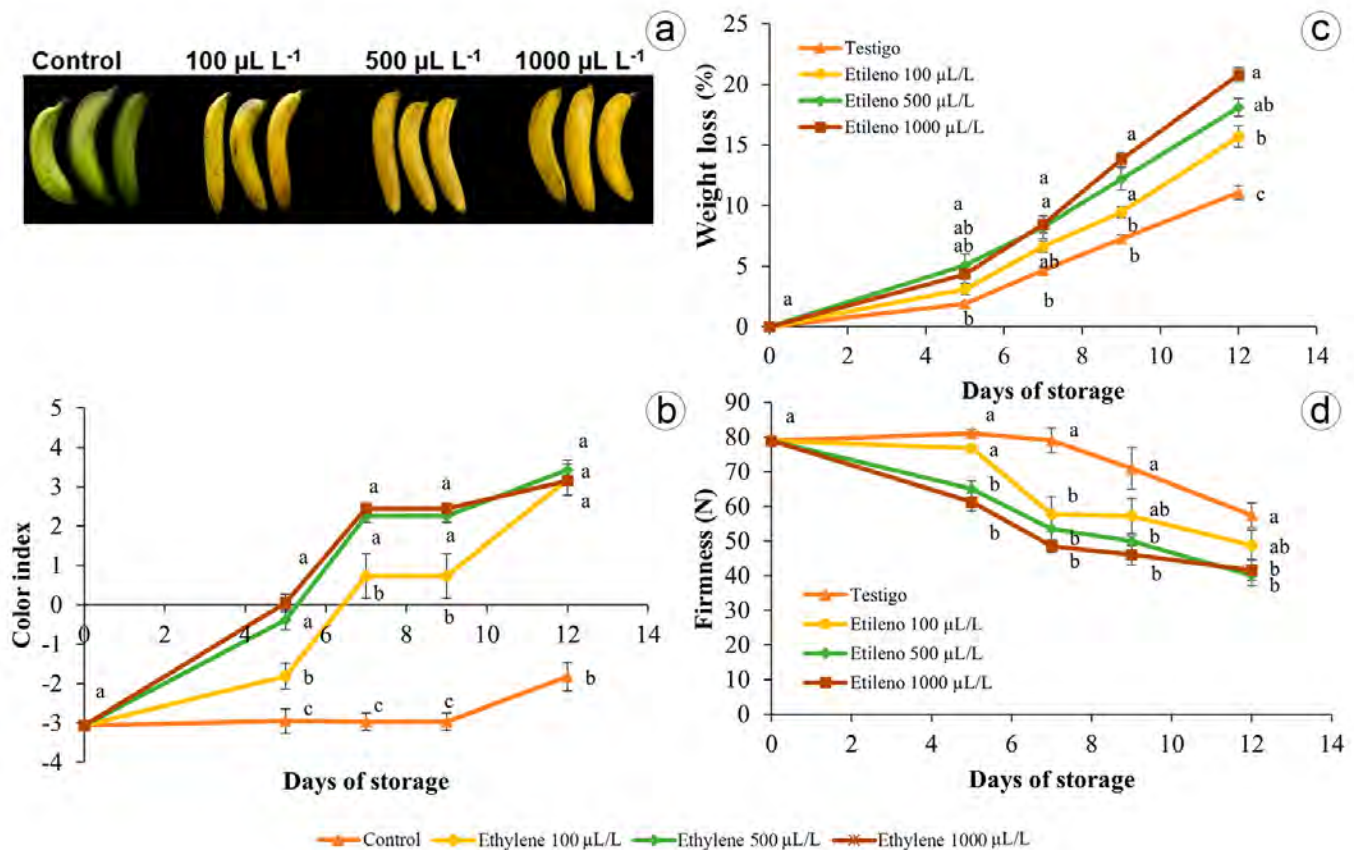


Figure 3. Effect of different ethylene concentrations on: a) epidermis color at 7 days; b) epidermis color index; c) weight loss; d) firmness of banana fruits cv. Barranquillo. The vertical bars in each mean indicate the standard error ($n = 4$). The means followed by different letters in each measurement indicate statistical differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

Statistical differences in firmness were found from 5 days until the end of the experiment. The control fruits reported a greater firmness throughout the study with a value of $57.5 \pm 3.6\text{N}$. On the other hand, the fruits with higher concentrations of ethylene presented lower firmness with values around 40 N at 12 days of storage (Figure 3d), indicating important changes in the softening to guarantee the maturity of consumption. Du *et al.* (2016) found that there is a group of enzymes involved in cell wall metabolism that increases in bananas treated with exogenous applications of ethylene. An increase in these enzymes could explain the significant loss of firmness in the banana fruits cv. Barranquillo.

In total soluble solids, significant differences were found from day 5 of storage to the end of storage, where it was observed that the fruits

subjected to the ethylene treatments had a higher concentration of TSS. At the end of storage, the fruits with ethylene applications reached approximate values of 23°Brix , and the control fruits were close to 17°Brix (Figure 4a). The results indicated that the conversion of starch to sugars was faster in the fruits treated with ethylene, probably because of the rapid induction of climacteric and metabolic pathways of starch hydrolysis. Similar results were found by Pongprasert *et al.* (2020) in cv. Cavendish, where ethylene applied in microbubbles accelerated the effect, and the soluble solids of the fruits increased. It has been indicated that bananas treated with ethylene increased starch metabolism enzymes, such as α - and β -amylases (Du *et al.* 2016).

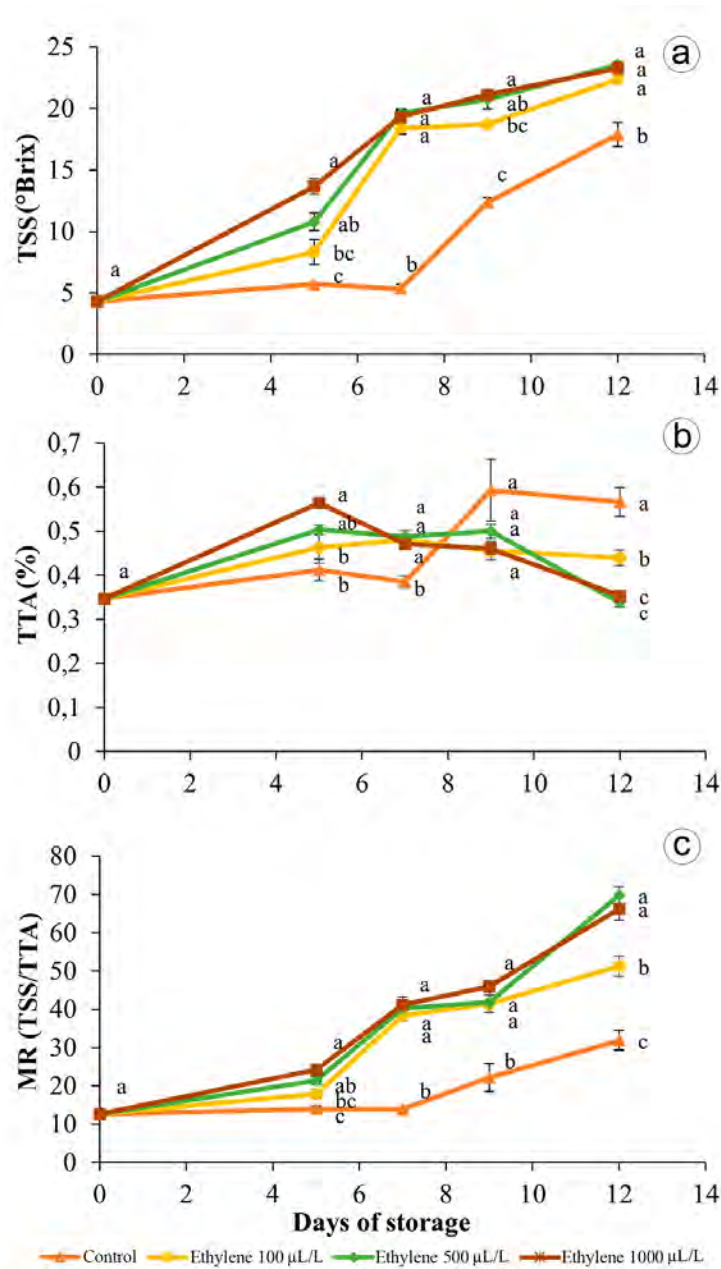


Figure 4. Effect of different concentrations of ethylene on: a) total soluble solids; b) total titratable acidity; c) ripeness ratio of banana fruits cv. Barranquillo. The vertical bars in each mean indicate the standard error (n = 4). The means followed by different letters in each measurement indicate statistical differences according to Tukey's test (p < 0.05).

Statistical differences were found in the total titratable acidity at 5, 7 and 12 days of storage. The trend in almost all treatments was a rapid increase in the first 5 days, followed by a slight decrease in acidity. The control fruits had an increase as time elapsed and presented the highest TTA with 0.56 ± 0.03 % on day 12. The fruits subjected to the ethylene treatments 500 and 1000 $\mu\text{L L}^{-1}$ reported the lowest TTA at the end of the experiment (Figure 4b). Organic acids in banana pulp can increase at the beginning of ripening as a result of the metabolism of starch reserves, which are used as respiratory substrates. Therefore, TTA decreases during the ripening process (Ge *et al.* 2017), and, since ethylene stimulates

increased respiration (Brat *et al.* 2020), this may explain the greater change in TTA in fruits treated with ethylene.

The maturity ratio increased as a function of time as a result of the increase in TSS and the TTA reduction at the end. Statistical differences were presented from 5 days to 12 days. Applications of 500 to 1000 $\mu\text{L L}^{-1}$ generated the highest maturity ratio throughout the experiment (Figure 4c).

The results showed that exogenous applications of ethylene considerably increase the advance of maturation mainly because it

stimulates a greater autocatalytic synthesis of ethylene, which in turn triggers higher respiratory rates and greater metabolic activity related to maturation (Brat *et al.* 2020), which, in this case, was reflected in the MR.

The results indicated that ethylene concentrations from 100 to 1000 $\mu\text{L L}^{-1}$ in banana cv. Barranquillo can generate degreening, but also accelerate the metabolism that leads to a much faster and more uniform ripening, as the market requires. In addition, ethephon is a source of liquid applications that favor degreening treatments mainly for small producers. It is also important to note that the applications were only 10 minutes, as compared to fumigation with ethylene gas, which requires a longer time (Pongprasert *et al.* 2020). Wills *et al.* (2014) confirmed these results by reporting that increasing the ethylene concentration from 0.0001 to 1 $\mu\text{L L}^{-1}$ accelerated ripening but also decreased postharvest life.

The results led to the conclusion that 1-MCP delayed the ripening process of the banana fruits cv. Barranquillo, and its efficiency as a maturity retardant for the conservation of this fruit was demonstrated. On the contrary, the exogenous ethylene accelerated the ripening, and, therefore, epidermis color index, weight loss, firmness, TSS and MR changes are associated with ethylene. The exogenous applications of ethephon as an ethylene source accelerated the degreening process but also the general ripening process. Concentrations between 100 and 500 $\mu\text{L L}^{-1}$ are sufficient to achieve degreening. These applications are easy to carry out and can be made by producers or marketers.

Acknowledgment. The authors would like to thank Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia for allowing the use of the Plant Physiology laboratory for conducting this study. **Conflict of interests:** The manuscript was prepared and reviewed with the participation of all authors, who declare that no conflict of interest exists that would put at risk the validity of these results. **Authors contribution:** Project administration by Yobany Valbuena and Jhon Patiño. Writing review and editing by Helber Balaguera, Yobany Valbuena and John Patiño. Conceptualization, supervision, and writing by Helber Balaguera.

REFERENCIAS

- AN, J.; ALMASAUD, R.A.; BOUZAYEN, M.; ZOUINE, M.; CHERVIN, C. 2020. Auxin and ethylene regulation of fruit set. *Plant Science*. 292:110381. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110381>
- BALAGUERA-LÓPEZ, H.E.; ESPINAL-RUIZ, M.; RODRÍGUEZ-NIETO, J.M.; HERRERA-ARÉVALO, A.; ZACARÍAS, L. 2021. 1-Methylcyclopropene inhibits ethylene perception and biosynthesis: a theoretical and experimental study on cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits. *Postharvest Biology and Technology*. 174:111467. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111467>
- BAPAT, V.A.; TRIVEDI, P.K.; GHOSH, A.; SANE, V.A.; GANAPATHI, T.R.; NATH, P. 2010. Ripening of fleshy fruit: Molecular insight and the role of ethylene. *Biotechnology Advances*. 28:94-107. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.10.002>
- BASWAL, A.K.; DHALIWAL, H.S.; SINGH, Z.; MAHAJAN, B.V.C.; GILL, K.S. 2020. Postharvest application of methyl jasmonate, 1-methylcyclopropene and salicylic acid extends the cold storage life and maintain the quality of 'Kinnow' mandarin (*Citrus nobilis* L. X *C. deliciosa* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 161:111064. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111064>
- BOTONDI, R.; DE SANCTIS, F.; BARTOLONI, S.; MENCARELLI, F. 2014. Simultaneous application of ethylene and 1-MCP affects banana ripening features during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 94:2170-2178. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6599>
- BRAT, P.; BAGAUD, C.; GUILLERMET, C.; SALMON, F. 2020. Review of banana green life throughout the food chain: From auto-catalytic induction to the optimization of shipping and storage conditions. *Scientia Horticulturae*. 262:109054. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109054>
- CHIABRANDO, V.; GIACALONE, G. 2011. Shelf-life extension of highbush blueberry using 1-methylcyclopropene stored under air and controlled atmosphere. *Food chemistry*. 126:1812-1816. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.032>
- COSME, G.M.; SILVA, W.B.; MEDEIROS, D.B.; SALVADOR, A.R.; MENEZES CORDEIRO, M.H.; DA SILVA, N.M.; BORTOLINI SANTANA, D.; MIZOBUTSI, G.P. 2017. The chitosan affects severely the carbon metabolism in mango (*Mangifera indica* L. cv. Palmer) fruit during storage. *Food Chemistry*. 237:372-378. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.123>
- DU, L.; SONG, J.; FORNEY, C.; CAMPBELL, L.; FILLMORE, J.; ZHANG, Z. 2016. Proteome changes in banana fruit peel tissue in response to ethylene and high-temperature treatments. *Horticulture Research*. 3:16012. <https://doi.org/10.1038/hortres.2016.12>
- FEYGENBERG, O.; BEN-ARIE, R.; PESIS, E. 2012. Postharvest application of 1-MCP to green or yellow banana for extending storability and shelf-life. *Acta Horticulturae*. 928:219-225. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.928.27>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FAO. 2023. Crops and livestock products. Faostat. Available from Internet in: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/TCL> (with access on 31/03/2023).





12. GE, Y.; HU, K.D.; WANG, S.S.; HU, L.Y.; CHEN, X.Y.; LI, Y.H.; YANG, Y.; YANG, F.; ZHANG, H. 2017. Hydrogen sulfide alleviates postharvest ripening and senescence of banana by antagonizing the effect of ethylene. *Plos One*. 12(6):e0180113. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180113>
13. GOLDING, J.; SHEARER, D.; WYLLIE, S.; MCGLASSON, W. 1998. Application of 1-MCP and propylene to identify ethylene-dependent ripening processes in mature banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 14:87-98. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00032-5)
14. GONZÁLEZ, A.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, L.; CÓRDOBA, L.; RINCÓN, A.; BALAGUERA-LÓPEZ, H. 2021. Regulating the postharvest life of *Campomanesia lineatifolia* R. & P. fruits through the in-teraction of ethylene, 1-methylcyclopropene and low temperatures. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 15(2):e12499. <https://doi.org/10.17584/rcch.2021v15i2.12499>
15. HARRIS, D.R.; SEBERRY, J.A.; WILLS, R.B.H.; SPOHR, L.J. 2000. Effect of fruit maturity on efficiency of 1-methylcyclopropene to delay the ripening of bananas. *Postharvest Biology and Technology*. 20:303-308. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00150-2)
16. IN, B.C.; STRABLEA, J.; BINDER, B.M.; FALBEL, T.G.; PATTERSON, S.E. 2013. Morphological and molecular characterization of ethylene binding inhibition in carnations. *Postharvest Biology and Technology*. 86:272-279. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.07.007>
17. KETSA, S.; WISUTIAMONKUL, A.; VAN DOORN, W.G. 2013. Apparent synergism between the positive effects of 1-MCP and modified atmosphere on storage life of banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 85:173-178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.05.009>
18. KHAWAS, P.; DAS, A.J.; SIT, N.; BADWAIK, L.S.; DEKA, S.C. 2014. Nutritional composition of culinary *Musa ABB* at different stages of development. *American Journal of Food Science and Technology*. 2(3):80-87. <http://dx.doi.org/10.12691/ajfst-2-3-1>
19. LI, R.; WANG, Y.; LI, W.; SHAO, Y. 2023. Comparative Analyses of Ripening, Texture Properties and Cell Wall Composition in Three Tropical Fruits Treated with 1-Methylcyclopropene during Cold Storage. *Horticulturae*. 9:126. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020126>
20. LI, S.J.; XIE, X.L.; LIU, S.C.; CHEN, K.S.; YIN, X.R. 2019a. Auto-and mutual regulation between two CitERFs contribute to ethylene-induced citrus fruit degreening. *Food Chemistry*. 299:125163. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125163>
21. LI, J.; SUN, Q.; SUN, Y.; CHEN, B.; WU, X.; LE, T. 2019b. Improvement of banana postharvest quality using a novel soybean protein isolate/cinnamaldehyde/zinc oxide bionanocomposite coating strategy. *Scientia Horticulturae*. 258:0304-4238. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108786>
22. MADUWANTHI, S.D.T.; MARAPANA, R.A.U.J. 2019. Induced ripening agents and their effect on fruit quality of banana. *International Journal of Food Science*. 2019(2):1-8. <https://doi.org/10.1155/2019/2520179>
23. MARIÑO-GONZÁLEZ, L.; BUITRAGO, C.; BALAGUERA-LÓPEZ, H.; MARTÍNEZ-QUINTERO, E. 2019. Effect of 1-methylcyclopropene and ethylene on the physiology of peach fruits (*Prunus persica* L.) cv. Dorado during storage. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 13(1):46-54. <https://doi.org/10.17584/rcch.2019v13i1.8543>
24. PAREEK, S. 2016. *Postharvest Ripening Physiology of Crops*. 1st ed. Taylor & Francis Group, London, United Kingdom. 620p.
25. PÉREZ, W.A.; TORRES-BAZURTO, J. 2020. Carbon-nitrogen ratio in soils with fertilizer applications and nutrient absorption in banana (*Musa* spp.) cv. Williams. *Agronomía Colombiana*. 38(2):253-260. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v38n2.78075>
26. PINZÓN-SANDOVAL, E.H.; BALAGUERA-LÓPEZ, H.E.; BECERRA-GONZALEZ, M.E. 2022. Phenological and physicochemical changes during fruit development in two peach cultivars in the high tropics. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 25(1):e1942. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n1.2022.1942>
27. PONGPRASERT, N.; SRILAONG, V.; SUGAYA, S. 2020. An alternative technique using ethylene micro-bubble technology to accelerate the ripening of banana fruit. *Scientia Horticulturae*. 272:109566. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109566>
28. RODRIGO, M.J.; ALQUÉZAR, B.; ALÓS, E.; LADO, J.; ZACARÍAS, L. 2013. Biochemical bases and molecular regulation of pigmentation in the peel of Citrus fruit. *Scientia Horticulturae*. 163:46-62. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.08.014>
29. THAKUR, R.; PRISTIJONO, P.; BOWYER, M.; SINGH, S.P.; SCARLETT, C.J.; STATHOPOULOS, C.E.; VUONG, Q.V. 2019. A starch edible surface coating delays banana fruit ripening. *LWT -Food Science and Technology*. 10:341-347. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.055>

30. THOMPSON, A.K. 2011. Banana (*Musa* spp.). In: Yahia, E.M. (Ed.), Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. p.216-244.
31. WILLS, R.B.H.; HARRIS, D.R.; SPOHR, L.J.; GOLDING, J.B. 2014. Reduction of energy usage during storage and transport of bananas by management of exogenous ethylene levels. *Postharvest Biology and Technology*. 89:7-10. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.11.002>
32. XIE, X.L.; YIN, X.R.; CHEN, K.S. 2016. Roles of APETALA2/Ethylene responsive factors in regulation of fruit quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 35:120-130. <https://doi.org/10.1080/07352689.2016.1213119>
33. ZHOU, J.Y.; SUN, C.D.; ZHANG, L.L.; DAI, X.; XU, C.J.; CHEN, K.S. 2010. Preferential accumulation of orange-colored carotenoids in Ponkan (*Citrus reticulata*) fruit peel following postharvest application of ethylene or ethephon. *Scientia Horticulturae*. 126:229-235. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.07.019>
34. ZHU, X.; LUO, J.; LI, Q.; LI, J.; LIU, T.; WANG, R.; CHEN, W.; LI, X. 2018. Low temperature storage reduces aroma-related volatiles production during shelf-life of banana fruit mainly by regulating key genes involved in volatile biosynthetic pathways. *Postharvest Biology and Technology*. 146:68-78. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.08.015>
35. ZHU, X.; SHEN, L.; FU, D.; SI, Z.; WU, B.; CHEN, W.; LI, X. 2015. Effects of the combination treatment of 1-MCP and ethylene on the ripening of harvested banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 107:23-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.04.010>
36. ZHU, X.; SONG, Z.; LI, Q.; LI, J.; CHEN, W.; LI, X. 2020. Physiological and transcriptomic analysis reveals the roles of 1-MCP in the ripening and fruit aroma quality of banana fruit (Fenjiao). *Food Research International*. 130:108968. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108968>



Carotenogénesis y pigmentos en *Cucurbita* spp.

Carotenogenesis and pigments in *Cucurbita* spp.

Robert Augusto Rodríguez-Restrepo¹ ; Magda Piedad Valdés-Restrepo^{2*} ; Juan José Ortiz-López¹ ; Sanin Ortiz-Grisales¹ 

¹Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: rarodriguezre@unal.edu.co; jjortizl@unal.edu.co; sortizg@unal.edu.co

²Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: magda.valdes@unad.edu.co

*autor para correspondencia: magda.valdes@unad.edu.co

Cómo citar: Rodríguez-Restrepo, R.A.; Valdés-Restrepo, M.P.; Ortiz-López, J.J.; Ortiz-Grisales, S. 2023. Carotenogénesis y pigmentos en *Cucurbita* spp. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2218. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2218>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: marzo 1 de 2022

Aceptado: mayo 24 de 2023

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Los carotenoides son pigmentos orgánicos que el organismo no puede sintetizar y deben ser suministrados en la dieta humana. Este artículo de revisión tiene por objetivo abordar la ruta carotenogénica y los pigmentos predominantes en la pulpa de cucurbitáceas, siendo una de las hortalizas con mayor contenido de carotenoides, de tonalidades amarillo y naranja. Se recopiló literatura relevante sobre la temática proveniente de libros y de artículos científicos, identificando que el género *Cucurbita*, por ser de naturaleza alogama, expresa alta variabilidad fenotípica y genotípica, que es afectada por el ambiente y, ello, supone alta variabilidad en la composición de carotenoides del fruto, tanto cuantitativa como cualitativamente. Los carotenoides son los responsables de dar color característico a las flores y a los frutos; los apocarotenoides son conocidos por dar aromas, fragancias y sabores. El almacenamiento y la biosíntesis de los carotenoides se genera en los plastidios, estos pigmentos se pueden sintetizar por la ruta del metileritritol difosfato (MEP) hasta licopeno, donde se bifurca a α -caroteno y β -caroteno y, posteriormente, mediante hidroxilaciones, se generan las xantofilas. Su importancia en la acumulación de carotenoides en frutos radica en las múltiples funciones y beneficios en plantas, animales y humanos, como fotoreceptores y fotoprotectores de luz, colorantes agroindustriales, antioxidantes, reducción de enfermedades crónicas, precursores de vitamina A, entre otros beneficios, cabe destacar el alto contenido de carotenos totales en cucurbitáceas encontrándose en *Cucurbita moschata* más de 600 $\mu\text{g/g}$ en genotipos mejorados.

Palabras clave: Antioxidantes; Carotenoides; Zapallo; α -caroteno; β -caroteno.

ABSTRACT

Carotenoids are organic pigments that the body cannot synthesize and must be supplied in the human diet. This review article aims to approach the carotenogenic route and the predominant pigments in the fruits of Cucurbits, as this is one of the vegetables with the highest content of carotenoids of yellow and orange tones. Relevant literature on the subject was collected from scientific books and articles, identifying that the genus *Cucurbita*, being cross-pollinated in nature, expresses high phenotypic and genotypic variability, which is affected by the environment and, this implies high variability in the carotenoid composition of the fruit, both quantitatively and qualitatively. Carotenoids are responsible for giving characteristic color to flowers and fruits, apocarotenoids are known to give aromas, fragrances, and flavors. The biosynthesis and storage of carotenoids are generated in the plastids, the pathway of methylerythritol diphosphate (MEP) to lycopene can synthesize these pigments where it bifurcates to α -carotene and β -carotene and later, by hydroxylations, xanthophylls are generated. Its importance in the accumulation of carotenoids in fruits lies in the multiple functions and benefits in plants, animals, and humans as photoreceptors and photoprotectors of light, agroindustrial colorants, antioxidants, reduction of chronic diseases, precursors of vitamin A, among other benefits. Highlighting the high content of total carotenoids in Cucurbits, with more than 600 $\mu\text{g/g}$ in *Cucurbita moschata* found in improved genotypes.

Keywords: Antioxidants; Butternut squash; Carotenoids; α -carotene; β -carotene.

INTRODUCCIÓN

La familia Cucurbitaceae, se caracteriza por su alta diversidad botánica, con alrededor de 825 especies y 118 géneros, de los cuales, *Citrulus*, *Cucumis*, *Sechium*, *Lagenaria*, *Luffa* y *Cucurbita* son los más relevantes y *Cucurbita*, el más importante. En este género se destacan las especies domesticadas: *Cucurbita argyrosperma* Huber, *C. ficifolia* Bouché, *C. maxima* Duchesne, *C. pepo* L. y *C. moschata* (Duchesne ex lam) Duchesne ex Por, donde *C. moschata* es la más extendida en América tropical, desde México hasta el Perú (Rodríguez R. *et al.* 2018).

C. moschata se conoce como zapallo o ahuyama, una hortaliza que presenta frutos carnosos tipo baya (baciforme), su pulpa es anaranjada, con altos contenidos de vitamina A, en forma de carotenos totales α y β (535 $\mu\text{g/g}$), contenido alto de proteína cruda (14,5 %) y minerales, como calcio, hierro y fósforo, características atractivas en términos nutricionales, tanto para consumo humano como fruto fresco y como fruto procesado en el diseño de raciones para animales (Ortiz Grisales *et al.* 2013). Este fruto presenta un alto número de semillas, que varía entre 300 a 700 semillas (Ortiz Grisales *et al.* 2015), las cuales, se pueden considerar como oleaginosas, ya que alcanzan un 43 % de grasa bruta (Ortiz Grisales *et al.* 2009), mostrando contenidos de aceite, que van desde el 30 al 50 %, según la especie (Singh & Kumar, 2021; Valdés Restrepo *et al.* 2014). Son fuente de proteína y grasa poliinsaturada, que estimulan el metabolismo de las grasas acumuladas (Achilonu *et al.* 2018). Se suelen emplear como diurético, vermífugo, tónico estomacal, antihelmíntico, para curar asma bronquial y algunas enfermedades de la piel (Ortiz Grisales *et al.* 2015).

El color del mesocarpio en las cucurbitáceas es un rasgo agronómico importante para determinar el contenido de carotenoides (Luo *et al.* 2021), los cuales, se presentan en una alta concentración en estas plantas, especialmente, el α y β caroteno. Los carotenos son importantes en la dieta humana, debido a que se ha demostrado que bajos contenidos de carotenoides, en especial, α -caroteno aumenta el riesgo de asma en niños (Khalil *et al.* 2021).

Según el anuario estadístico de la Faostat para el 2020, a nivel mundial, se produjo un total de 28 millones de toneladas de cucurbitáceas, incluyendo, zapallos, calabazas y calabacines, donde el 60 % de la producción mundial se registró en Asia, con una participación 7.433.743 t, 5.113.692 t y 1.268.270 t, proveniente de China, India y Ucrania, respectivamente, seguido de Europa con un 17,5 % y América con 11,9 % donde Colombia participa con 147.684 t, aproximadamente (FAOSTAT, 2020).

En Colombia, la mejor producción de zapallo se encuentra en Santander, con 15.089,50 t, seguido de Cesar, con 10.256 t, Valle del Cauca, con 8.551,85 t, Huila, con 7.368,50 t y Bolívar, con 5.698 t, alcanzándose rendimientos de 17 t/ha (Agronet, 2018), cuyo valor estimado en el mercado por tonelada en 2016 fue de 345 USD (FAOSTAT, 2020).

En el Valle del Cauca, cerca del 80 % de los cultivos de zapallo son establecidos con variedades mejoradas, como el cultivar “Unapal-Bolo Verde”, ampliamente conocido por agricultores y comercializadores; los frutos de esta variedad, en el momento de la cosecha, alcanzan un peso entre 2,5-4,0 kg, con un rendimiento de 30 t/ha (Estrada S. *et al.* 2004); no obstante, investigaciones del programa de hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia generaron otras cuatro variedades con características agronómicas sobresalientes, “Unapal-Llanogrande”, con rendimientos experimentales de 18,9 \pm 6 kg/planta (Estrada Salazar *et al.* 2010), “Unapal-Dorado”, de rendimiento 15 kg/planta, contenido de materia seca mayor al 16 % (Vallejo C. *et al.* 2010), “Unapal-Mandarino”, con rendimiento de 4 kg/planta y “Unapal Abanico 75”, cuya producción por planta oscila en 29 a 32 kg/planta, peso promedio del fruto entre 5-6 kg, materia seca 24-26 % (Baena García *et al.* 2010).

Algunas especies, como *C. moschata*, *C. máxima* y *C. pepo*, presentan tonalidades de colores que van del amarillo intenso al naranja, lo que ha revelado altos niveles de carotenoides, principalmente, α y β -caroteno, β -criptoxantina, luteína y zeaxantina (Rodríguez-Amaya *et al.* 2008; Jaeger de Carvalho *et al.* 2012). Su importancia va más allá de alimentación humana; los residuos de zapallo o ahuyama son empleados para alimentación animal por su contenido nutricional, antioxidantes y pigmentos, que podrían mejorar la calidad de la carne, la leche y los huevos, que contribuyen a la nutrición (Valdez-Arjona & Ramírez-Mella, 2019), debido a que los animales no pueden sintetizar carotenoides y deben obtenerlos de los alimentos (Cho *et al.* 2018).

Por la anterior, esta revisión estudia la ruta carotenogénica y los pigmentos predominantes en la pulpa de zapallo, por ser esta una de las hortalizas con mayor contenido de carotenoides.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión documental que permitió reunir lo más reciente sobre el estudio de carotenogénesis y pigmentos en cucurbitáceas; una temática que causa interés debido a su importancia en la ruta metabólica de varios procesos de síntesis. Se consultaron libros y artículos científicos en áreas de estudio, como ciencia, tecnología e ingeniería, en una franja comprendida entre el 2004 y 2022, que abarca literatura sobre la historia de las cucurbitáceas, cultivares en Colombia, importancia de los carotenoides, especialmente, de α y β caroteno, así como la acumulación y la regulación de la biosíntesis de carotenoides; la información se ordenó, de acuerdo con los aspectos más relevantes para la temática siguiente, un patrón lógico de trazabilidad. Se consultaron base de datos, como Scopus, Google académico, ScienceDirect y SciELO, las cuales, fueron seleccionadas de acuerdo con los apartados, palabras clave y relevancia en la temática; en la relevancia de los textos se tuvo en cuenta la argumentación e información científica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Importancia de los carotenoides. El color del fruto u hortaliza es un indicador sensorial fundamental, como estándar de calidad

para consumo en fresco, tanto para su comercialización como para el consumidor (Lado *et al.* 2018; Abbas *et al.* 2020); el color de los frutos está determinado, principalmente, por la composición de los carotenoides, presentes en los tejidos fotosintéticos de las plantas y contribuyen a las funciones de fotorrecepción de luz, mediante la absorción, en el rango de 450-570 nm (Ruiz-Sola & Rodríguez Concepción, 2012) y fotoprotección contra el exceso de luz; sirven para mejorar la eficiencia de las reacciones de luz fotosintética, que absorben fotones en la región azul-verde del espectro solar y transfieren la energía absorbida a la clorofila (Hashimoto *et al.* 2016). Además, los carotenoides actúan como precursores de moléculas de señalización y forman fitohormonas, como el ácido abscísico y estrigolactonas, que regulan el desarrollo y la interacción de las plantas con su entorno (Giuliano, 2014). A su vez, los carotenoides son precursores de moléculas, como los apocarotenoides, importantes en las interacciones entre planta y ambiente, contribuyen al sabor, aroma de las flores y frutos, características que pueden cambiar dependiendo del cultivar y de la especie (Ortiz Grisales *et al.* 2020), participan en la atracción de polinizadores, agentes de dispersión de semillas y en la defensa contra patógenos y herbívoros, siendo el licopeno, el β -caroteno y la zeaxantina los principales precursores de la apocarotenoides (Moreno Beltran & Stange, 2016).

En los tejidos animales también están presentes, donde actúan como antioxidantes y ayudan a reducir enfermedades crónicas, cardiovasculares, oculares y cáncer (Fiedor & Burda, 2014). Además, son precursores para la biosíntesis de vitamina A; según Thorne-Lyman & Fawzi (2012), la deficiencia de esta vitamina aumenta el riesgo de contraer enfermedades infecciosas, como el sarampión, la malaria y la diarrea, siendo más común en niños y puede causar ceguera (Jang *et al.* 2016). Por esta razón, los carotenoides se emplean como colorantes en la industria alimentaria, aditivos para raciones de animales (dietas para salmónidos y camarones) y nutracéuticos de uso animal y humano (Zhang *et al.* 2016).

Fisiología de la ruta fotosintética hasta α - y β -carotenos. En las plantas, la luz destinada para el proceso fotosintético es absorbida por dos tipos de pigmentos: clorofilas y carotenoides, el espectro de absorción de este último oscila entre 400 y 500 nm. (Azcon-Bieto & Talón, 2008). Los carotenoides están compuestos por cuarenta átomos de carbono (C40), son una clase de isoprenoides, en su mayoría terpenoides, son moléculas lipofílicas que proporcionan a los frutos y vegetales el color rojo, naranja y amarillo (Yuan *et al.* 2015; Sun *et al.* 2022), se sintetizan mediante una ruta lineal, desde fitoeno a licopeno y se bifurca en α - y β -carotenos ciclados (Alagoz *et al.* 2018), pueden estar asociados a ácidos grasos, proteínas, azúcares y otros compuestos, que hace que influyan en sus funciones biológicas (Rodríguez-Concepción *et al.* 2018). La biosíntesis y almacenamiento de los carotenoides ocurre en los plastidios y existen varios tipos de plastidios, como los proplastidos, etioplastos, cloroplastos, amiloplastos y cromoplastos, todos tienen la capacidad de producir carotenoides, excepto los proplastidos (Li *et al.* 2016; Feder *et al.* 2019).

En los carotenoides cuando se presenta un grupo oxigenado, se denominan xantofilas, mientras que, en los hidrocarburos sin oxígeno, carotenos. Los principales carotenoides presentes en el cloroplasto son el α -caroteno, el β -caroteno y cinco xantofilas: luteína, violaxantina, anteraxantina, zeaxantina y neoxantina (Azcón-Bieto & Talon, 2008). La biosíntesis de los carotenoides empieza en la ruta del metileritritol difosfato (MEP), en donde la fitoeno sintasa (PSY) es una importante enzima limitante de la velocidad en la ruta biosintética de carotenoides, siendo la primera enzima comprometida en la carotenogénesis (Cao *et al.* 2019). Posteriormente, las desaturaciones e isomerizaciones de la SPY producen licopeno de color rojo, que se cicla y forma β y α carotenos, que se metabolizan a xantofilas (Moise *et al.* 2014).

Regulación de la biosíntesis de los carotenoides. La biosíntesis de los carotenoides ocurre en los plastidios de las plantas, involucrados en su estabilidad, actividad carotenogénica y diversidad de pigmentos (Sun *et al.* 2017). Se sintetizan por dos vías independientes: la vía del ácido mevalónico (MVA) y la vía plastidios o metileritritol difosfato (MEP). En la vía MEP (Figura 1), mediante enlaces carbono, se produce el isopentenil difosfato (IPP) y su isómero dimetil-alil difosfato (DMAPP), como molécula iniciadora y la enzima geranylgeranyl difosfato sintetasa (GGPS); la sintetasa condensa tres moléculas de IPP y forma, como producto, geranylgeranyl difosfato (GGPP), siendo el punto de inicio de la ruta de biosíntesis de los carotenoides (Camagna *et al.* 2019). A partir de ahí la enzima fitoeno sintetasa (PSY) cataliza la condensación de dos moléculas de GGPP, que produce 15-*cis*-fitoeno, siendo un caroteno lineal incoloro (primer caroteno C40); posteriormente, suceden una serie de reacciones de desaturación e isomerización (cuatro en total), catalizadas por la enzima fitoeno desaturasa (PDS); a través de la desaturación, se produce 9, 15,9' tri-*cis*- ζ -caroteno. Posteriormente, se presenta una isomerización causada por ζ -caroteno isomerasa (Z-ISO), a la forma *trans*, que genera 9,9' di-*cis*- ζ -caroteno, de nuevo actúa otra enzima ζ -Caroteno desaturasa (ZDS) introduce dobles enlaces en forma *cis* en los carbonos 7 y 7' que va a formar prolicopeno (7,9,7',9'-tetracis-licopeno) y, por último, la enzima caroteno isomerasa CRTISO convierte la configuración *cis* a la configuración *trans*. que generará la molécula de licopeno, propiamente *trans*-licopeno de color rojo (Giuliano, 2014).

La ciclación del licopeno por la enzima ϵ -licopeno ciclasa (LcyE) y la β -licopeno ciclasa (LcyB) produce las ramas de α -caroteno y β -caroteno de color naranja, carotenoides precursores de vitamina A, abundantes en frutas y en hortalizas, como zanahoria, batata, zapallo, melón y naranja (Yuan *et al.* 2015); posteriormente, se presenta una hidroxilación en cada rama de α -caroteno y β -caroteno, por dos hidroxilasas diferentes: las hidroxilasas de tipo CHYB (BCH), que hidroxila el anillo β de los carotenos cíclicos y el tipo citocromo P450. De este último, se desprenden las hidroxilasas ϵ -OHasa y β -OHasa, que hidroxilan los anillos β y ϵ , respectivamente, lo que genera xantofilas amarillas (Neuman *et al.* 2014). En la rama de α -caroteno de color naranja es catalizado

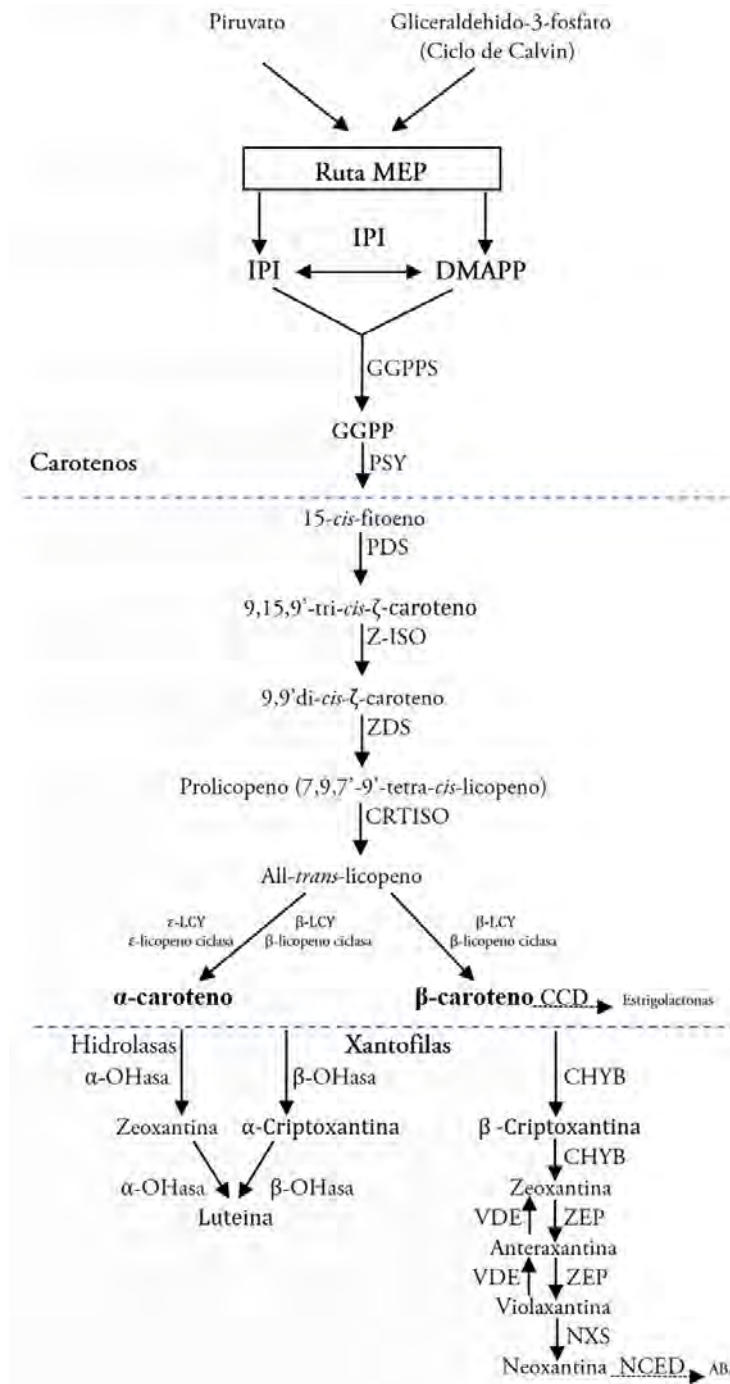


Figura 1. Esquema de la vía metabólica del carotenoide. Adaptado a partir de Yuan *et al.* (2015) y Sun *et al.* (2017).

por hidroxilasas de tipo α -OHasa para producir luteína de color amarillo, abundante en las flores amarillas, como la caléndula (*Calendula* spp.) y el narciso (*Narcissus* spp.) y en vegetales de hoja verde oscuro; en la rama de β -caroteno de color naranja es hidrolizado por CHYB, para producir zeaxantina amarilla; esta es epoxidada por la enzima zeaxantina epoxidasa (ZEP), para producir antheraxantina y luego violaxantina y, finalmente, a través de la enzima neoxantina sintetasa (NXS), en neoxantina (Yuan *et al.* 2015). La violaxantina se puede convertir de nuevo en zeaxantina,

por medio de la violaxantina desoxidasa (VDE) (Neuman *et al.* 2014; Sun *et al.* 2017). La violaxantina es utilizada para sintetizar el ácido abscísico, a través de la escisión oxidativa catalizada por 9-cisepoxicarotenoide dioxigenasa (NCED) (Tuan *et al.* 2019).

Acumulación de carotenoides en cucurbitáceas. La acumulación de carotenoides es un proceso dinámico, a nivel transcripcional de las proteínas estructurales, vías biosintéticas y de degradación, influenciados por la expresión génica y condiciones ambientales

(Lu *et al.* 2017). Una de sus funciones en la planta es intervenir en la recepción de luz, como también elementos de señalización, sus interacciones y la acumulación de carotenoides en diferentes órganos de las plantas (Llorente *et al.* 2016); a su vez, una de las principales funciones biológicas de los carotenoides está asociada con la protección contra el daño oxidativo (Widomska *et al.* 2019). Los déficits hídricos al igual que otro tipo de estrés ambiental, tienden a desviar el potencial redox celular a un estado más oxidativo y aumentar la concentración de radicales libres o especies reactivas del oxígeno (ROS) (Radical superóxido, Radical oxidrilo y el peróxido de hidrógeno); la toxicidad de ROS, se debe a sus reacciones con numerosos componentes celulares, que causan una cascada de reacciones oxidativas y la consiguiente inactivación de enzimas, peroxidación lipídica, degradación de proteínas y daño en el ADN (Wang *et al.* 2012); sin embargo, la planta posee mecanismos antioxidantes, que equilibran la producción de ROS, tales como los compuestos que contienen tiol (glutaciona) y ascorbato; vitaminas solubles en grasa (α -tocopherol y β -caroteno) y antioxidantes enzimáticos, como las catalasas, superóxido dismutasa y glutatión peroxidasa (Azcón-Bieto & Talon, 2008). El daño oxidativo se puede estimar midiendo el contenido de prolina, carotenos y clorofila a y b, porque altas cantidades de este osmolito y pigmentos pueden proteger a las plantas del estrés, mediante la desintoxicación de ROS, como también, evidencian el posible daño al aparato fotosintético (Volkov, 2015). Esta resistencia al daño oxidativo, probablemente, varíe según el genotipo, como lo expresan Sarabi *et al.* (2017), quienes concluyen que las variedades Iranés “Suski-e-Sabz” y “Ghobadlu” de Melón, presentan mecanismos fisiológicos y bioquímicos frente al estrés por salinidad, mostrando buen contenido relativo de agua (81,52 y 82,55 %), alto índice de estabilidad de la membrana (72,60 y 71,95 %), alta densidad de estomas y tricomas, área foliar, biomasa y concentración de potasio en hojas y tallos; sin embargo, estos genotipos sufren daño oxidativo, dado que producen cantidades bajas de carotenoides (0,07 $\mu\text{g/g}$) y de clorofila a y b, conforme la concentración de sales en la solución del suelo se incrementa; por otra parte, la enzima catalasa muestra un incremento respecto al testigo, manteniendo bajo al peróxido de hidrógeno.

La acumulación de carotenoides en zapallos puede variar dependiendo del genotipo o del grado de rusticidad del cultivar (Ortiz Grisales *et al.* 2015). En el caso de las calabazas silvestres, que se producen en la naturaleza y su potencial como fuente de provitamina A, se investiga para ser utilizado en programas convencionales de fitomejoramiento o biofortificación, con el objetivo de aumentar el contenido total de carotenoides y β -caroteno. Jaeger de Carvalho *et al.* (2012) evaluaron el contenido de carotenoides totales, el α -caroteno, el β -caroteno y sus isómeros, en dos muestras locales A y B de zapallos *Cucurbita moschata*, para verificar su potencial de producción de semillas. Los resultados mostraron un contenido medio de carotenoides totales de 404,98 $\mu\text{g/g}$, en la muestra A y 234,21 $\mu\text{g/g}$, en la muestra B; el contenido de α -caroteno varió de 67,06 a 72,99 $\mu\text{g/g}$ en las muestras A y B, respectivamente; el β -caroteno fue el isómero más abundante encontrado, variando de 244,22 a 141,95 $\mu\text{g/g}$ en las muestras A y B, respectivamente. El contenido de β -caroteno en la muestra

cruda A demostró ser prometedor para la producción de semillas para cultivo y consumo. Otros dos genotipos rústicos de *C. moschata*, “Ariel y Plutón” fueron caracterizados en la investigación de Armesto *et al.* (2020), con el fin de comparar su desempeño en función del manejo agronómico (convencional y orgánico); las diferencias más importantes se obtuvieron entre los dos cultivares en condiciones de cultivo orgánico, encontrándose que la variedad Ariel posee los niveles más altos de carotenoides (39,53 $\mu\text{g/g}$), evidenciándose una fuerte correlación entre el color y el contenido de carotenoides.

Ortiz Grisales *et al.* (2015) evaluaron introducciones de *C. moschata* a libre polinización S_0 y sus líneas S_1 y S_2 en dos localidades y encontraron un contenido de 600 $\mu\text{g/g}$ de carotenos totales y determinaron que existe una correlación inversa entre materia seca y carotenos totales; a menor contenido de materia seca mayor contenido de carotenos totales.

Las condiciones para el almacenamiento de los frutos son factores clave en la preservación de los carotenoides, donde el principal factor dañino es la temperatura. Al respecto, Song *et al.* (2018) concluyen que la temperatura de almacenamiento incide sobre la conservación de los carotenoides en productos deshidratados de zapallo, dando como resultado una composición y distribución diferente de los isómeros de carotenoides. El almacenamiento a 4 °C provoca mayor retención de β -caroteno e induce solo ligeros cambios en la distribución de los isómeros. El almacenamiento a 40 °C tiene mayor efecto sobre la pérdida de caroteno y la isomerización de todos los β -carotenos, en comparación con otras condiciones de almacenamiento; la luteína se degradó en menor medida que el β -caroteno y el α -caroteno, en zapallos deshidratados. Según Dutta *et al.* (2006) concluyen que la temperatura de cocción incide en la degradación, tanto del β -caroteno como del color visual del puré de zapallo, sometido a una temperatura de 60 a 100 °C, durante un período de 0 y 2 horas, presentándose un cambio en el color visual, como manifestación directa del cambio en el contenido de β -caroteno. Esta misma respuesta la reportan Gomes Ribeiro *et al.* (2015), para la pulpa de zapallo cultivado en Brasil, cocinado a diferentes temperaturas, encontrando una disminución de carotenos en pulpa inversamente proporcional al incremento de la temperatura, disminuyendo la bioaccesibilidad de β -caroteno y α -caroteno. Mendelova *et al.* (2017) encontraron que el contenido total de carotenoides varía entre los genotipos Liscia, Orange, Hannah, UG 201 F1, Waltham y Serpentine, después del tratamiento térmico de la pulpa; el valor más alto de carotenos lo presenta la variedad Orange, con 97,67 $\mu\text{g/g}$ y el más bajo, Liscia, con 39,01 $\mu\text{g/g}$. A su vez, el mayor contenido de carotenoides totales se encuentra en el genotipo Hannah, con 9,42 $\mu\text{g/g}$ y el más bajo, UG 205 F1 56,55 $\mu\text{g/g}$; después del tratamiento térmico, se encontró cierta disminución en los carotenoides totales, polifenoles y también en la actividad antioxidante.

La extracción de carotenoides comprende el uso de solventes orgánicos habitualmente combinados con solventes tóxicos; en vista de la creciente preocupación ambiental sobre el uso de solventes orgánicos en la extracción de productos naturales, hay un

progresivo interés en la tecnología de separación “verde” (Gueye Rokhaya *et al.* 2017). Los carotenoides son normalmente extraídos con solventes orgánicos miscibles en agua, como acetona, metanol o etanol; sin embargo, con la introducción de la cromatografía líquida de alto desempeño (HPLC) en el análisis de carotenoides, el tetrahidrofurano está siendo muy utilizado, aunque el método tradicional para separar estos compuestos es la cromatografía descendente en columna (flujo por gravedad auxiliado con trompa de vacío), llamada cromatografía en columna abierta (CCA) (Rodríguez, 2015). Recientemente, se ha experimentado con la extracción con fluido de CO₂ supercrítico (SC-CO₂), utilizado como un método alternativo a la extracción con solventes orgánicos tradicionales, para extraer carotenoides de materiales agrícolas, debido a sus ventajas, tales como: residuos no tóxicos, procesos no inflamables y ambientalmente aceptables con alta selectividad. Al respecto, Shi *et al.* (2013) estudiaron el efecto de la extracción supercrítica de CO₂ (SC-CO₂), en el rendimiento y en la actividad antioxidante de carotenoides de zapallo, encontrando que no existen cambios significativos en las propiedades antioxidantes de los carotenoides extraídos a 50 °C; asimismo, se encontró que la temperatura de funcionamiento de SC-CO₂ influye notablemente en la selectividad de los carotenoides, en especial, con la relación de β -caroteno/carotenoides totales; sin embargo, la actividad antioxidante del extracto de carotenoides disminuye después de modificar la temperatura entre 50 a 80 °C. Martínez-Valdivieso *et al.* (2014) evaluaron el potencial de la espectroscopia de reflectancia del infrarrojo cercano (NIRS), para predecir el contenido total de carotenoides, luteína y β -caroteno, en la piel y pulpa de los frutos de *Cucurbita pepo*, encontrando que el contenido total de carotenoides y luteína varió de 68 a 428 $\mu\text{g/g}$, de peso seco y 53 a 421,7 $\mu\text{g/g}$, de peso seco, respectivamente, en la pulpa de los frutos de *C. pepo*. El contenido de β -caroteno varió de 1,3 a 23,9 $\mu\text{g/g}$ de peso seco en la pulpa de *C. pepo*.

Dado que la técnica de extracción de superficie de respuesta (RSM) optimiza el tiempo de tratamiento y la energía, alcanzando un mejor rendimiento en carotenoides al utilizar menos disolvente, Benmeziene *et al.* (2018) compararon los métodos de extracción de carotenos convencional versus extracción por ultrasonido (EAU), optimizada por la metodología de superficie de respuesta (RSM), de carotenoides en cáscaras de melón, encontraron que los principales carotenoides identificados fueron luteína (63,24 $\mu\text{g/g}$) y β -caroteno (56,43 $\mu\text{g/g}$); los resultados de RSM mostraron que el contenido de carotenoides del extracto fue de 124,61 $\mu\text{g/g}$, mostrándose como un método eficaz para la extracción de carotenoides de los desechos de melón, por lo que se puede concluir, que los residuos de la fruta del melón se pueden utilizar para obtener una serie de compuestos promotores para la salud, los cuales, tienen múltiples usos en la industria alimentaria, como aditivos, edulcorantes, o harina para sopas; en la farmacéutica, como antioxidantes y vitamina A o en la cosmética en, por ejemplo, la elaboración de cremas.

Carotenoides como antidepresivos. En 1964, se evidenciaba que la imipramina y otros antidepresivos tricíclicos eran capaces de inhibir la recaptación presináptica de la noradrenalina (Davinelli *et al.* 2018); luego, Joseph J. Schildkraut (1965) planteó que la

catecolamínica de los trastornos afectivos está relacionada con la noradrenalina (Nad), en la aparición de los cuadros depresivos (Chen & Kotani, 2016). En Inglaterra, el grupo de Copen, en 1972, planteó la hipótesis indolamínica de la depresión, donde destacan el rol de la serotonina como agente regulador principal de este trastorno (Grimmig *et al.* 2017). En la búsqueda de antidepresivos más seguros, el desarrollo de los inhibidores selectivos de la recaptación de serotonina, tales como fluoxetina, fluvoxamina, paroxetina, citalopram, sertralina, representan un avance significativo, donde, recientemente, se reportan una serie de antidepresivos que mejoran los perfiles de efectos secundarios, con mayor especificidad sobre los distintos sistemas neurotransmisores; no obstante, estos efectos secundarios, como presión alta, hepatotoxicidad, excitabilidad, agitación, insomnio, cuadros confusionales, aumento de apetito, aumento de peso, impotencia y disminución de la libido, sequedad de boca, visión borrosa, retención urinaria, hipotensión ortostática y vértigo (Xuan *et al.* 2016; Kim & Kim, 2018; Saha *et al.* 2017), aparte de una incomodidad, representan también una amenaza a la salud del paciente, por tanto, las investigaciones actuales tienen como objeto encontrar alternativas terapéuticas, con menores efectos adversos, en el tratamiento de la depresión.

Kim *et al.* (2016) encontraron que el β -caroteno de zapallo, empleado en el antidepresivo Sweetme sweet pumpkin (SSP), redujo significativamente los niveles de la noradrenalina (Nad) y un incremento de serotonina en el cerebro de ratones, lo que podría indicar un efecto antidepresivo de SSP y del β -caroteno; asimismo, Dhingra & Bansal (2014) evaluaron la actividad antidepresiva del β -caroteno en ratones albinos machos jóvenes suizos, sometidos a un estrés leve e impredecible crónico, administrando β -caroteno (50 y 100 mg/kg) e imipramina (15 mg/kg), durante 21 días. La mayor dosis (100 mg/kg) de β -caroteno e imipramina disminuyó significativamente el período de inmovilidad de los ratones en la prueba de suspensión de la cola. Estos compuestos restauraron significativamente la preferencia reducida por la sacarosa en ratones estresados. El β -caroteno revirtió significativamente el aumento inducido por el estrés en la catalasa cerebral, monoamino oxidasa (MAO-A), sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico; por lo tanto, el β -caroteno, mostró una actividad similar a la de un antidepresivo en ratones estresados y no estresados, probablemente, a través de la inhibición de MAO-A y el estrés oxidativo. Su actividad antidepresiva en ratones estresados también se podría deber a la disminución de los niveles plasmáticos de corticosterona.

Brown *et al.* (2018) sugieren que los β -carotenos y la trans astaxantina pueden afectar al sistema serotoninérgico, pero no al sistema de noradrenalina, incrementando los niveles de serotonina en el hipocampo, la corteza frontal, el estriado y el hipotálamo.

La biosíntesis y acumulación en frutos, como el tomate y cítricos, son afectados por la genética y los factores ambientales, pero es determinante factores, como la luz y la temperatura (Lado *et al.* 2018); sin embargo, hay un principio para la composición de los carotenoides y es que el α -caroteno y el β -caroteno son precursores de provitamina A, mientras que la luteína y la zeaxantina son pigmentos macular de la retina (Norshazila *et al.* 2014).

La biosíntesis de los carotenoides podría estar relacionada con factores agroambientales (Tuan *et al.* 2019). Según los estudios realizados por diferentes investigadores, la cantidad de carotenoides es variable; Azevedo-Meleiro & Rodríguez-Amaya (2007), evaluando los principales carotenoides en tres especies de *Cucurbita*, identificaron que los principales carotenoides en *C. moschata* fueron β -caroteno y α -caroteno, mientras que la luteína y el β -caroteno predominan en las especies *C. maxima* y *C. pepo*, en donde al parecer, la hidroxilación es un punto de control en la biosíntesis de carotenoides. Nakkanong *et al.* (2012) identificaron que la especie *C. moschata* acumulaba β -caroteno y α -caroteno y la especie *C. maxima*, acumulaba violaxantina y luteína de color amarillo en frutos maduros y en concentraciones iguales, debido a la expresión de los genes CHYB y ZEP.

El β -caroteno es considerado el principal carotenoide en la mayoría de las especies, con concentraciones superiores a 70 $\mu\text{g/g}$ (Provesi & Amante, 2015); sin embargo, la sobreexpresión de la enzima *PSY* mejora el contenido de carotenoides totales y aumenta la síntesis de β -caroteno (Welsch *et al.* 2010).

La importancia de los carotenoides radica en la participación en diversos procesos fotosintéticos y funciones biológicas; no obstante, los efectos benéficos para la salud y los múltiples usos agroalimentarios, los convierten en un importante aliado para tratar enfermedades degenerativas, como el cáncer; de ahí la investigación y mejoramiento de las cucurbitáceas, como fuente importante de carotenos, las cuales, poseen una amplia variabilidad de colores que van del amarillo al naranja y dependiendo del genotipo y nivel de mejoramiento, varía el contenido de α y β carotenos, siendo los carotenoides predominantes en esta hortaliza.

Agradecimientos. A la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira y a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, por su colaboración y disposición para la ejecución del manuscrito. **Conflictos de intereses:** El artículo fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución autores:** Robert Augusto Rodríguez Restrepo, Magda Piedad Valdés Restrepo y Juan José Ortiz López realizaron la búsqueda de artículos científicos en bases de datos y análisis para la escritura del borrador del manuscrito y Sanin Ortiz Grisales lideró la contextualización y metodología del manuscrito. Todos los autores participaron en la redacción, revisión, edición del manuscrito y aprueban la versión final.

REFERENCIAS

1. ABBAS, H.M.K.; HUANG, H.X.; WANG, A.J.; WU, T.Q.; XUE, S.D.; AHMAD, A.; XIE, D.S.; LI, J.X.; ZHONG, Y.J. 2020. Metabolic and transcriptomic analysis of two *Cucurbita moschata* germplasm throughout fruit development. BMC Genomics. 21(1):365. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-6774-y>
2. ACHILONU, M.C.; NWAFOR, I.C.; UMESIOBI, D.O.; SEDIBE, M.M. 2018. Biochemical proximates of pumpkin (*Cucurbita* spp.) and their beneficial effects on the general well-being of poultry species. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. 102(1):5-16. <https://doi.org/10.1111/jpn.12654>
3. AGRONET. 2018. Estadísticas agrícolas nacionales. Disponible desde Internet en: www.agronet.gov.co
4. ALAGOZ, Y.; NAYAK, P.; DHAMI, N.; CAZZONELLI, C.I. 2018. cis-carotene biosynthesis, evolution and regulation in plants: the emergence of novel signaling metabolites. Archives of Biochemistry and Biophysics. 654(1):172-184. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2018.07.014>
5. ARMESTO, J.; ROCCHETTI, G.; SENIZZA, B.; PATEIRO, M.; BARBA, F.J.; DOMÍNGUEZ, R.; LUCINI, L.; LORENZO, J.M. 2020. Nutritional characterization of Butternut squash (*Cucurbita moschata* D.): Effect of variety (Ariel vs. Pluto) and farming type (conventional vs. organic). Food Research International. 132(1):109052. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109052>
6. AZCÓN-BIETO, J.; TALON, M. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. segunda edición. Ed. McGraw-Hill (España). 669p.
7. AZEVEDO-MELEIRO, C.H.; RODRIGUEZ-AMAYA, D.B. 2007. Qualitative and quantitative differences in carotenoid composition among *Cucurbita moschata*, *Cucurbita maxima* and *Cucurbita pepo*. Journal of Agricultural and Food Chemistry 55(10):4027-4033. <https://doi.org/10.1021/jf063413d>
8. BAENA GARCÍA, D.; ORTIZ GRISALES, S.; VALDÉS RESTREPO, M.P.; ESTRADA SALAZAR, E.I.; VALLEJO CABRERA, F.A. 2010. UNAPAL –Abanico 75: Nuevo cultivar de zapallo con alto contenido de materia seca en el fruto para fines agroindustriales. Acta Agronómica. 59(3):285-292.
9. BENMEZIANE, A.; BOULEKBACHE-MAKHOUL, L.; MAPELLI-BRAHM, P.; KHODJA, N.K.; REMINI, H.; MADANI, K.; MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, A.J. 2018. Extraction of carotenoids from cantaloupe waste and determination of its mineral composition. Food Research International. 111(1):391-398. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.044>
10. BROWN, D.R.; GOUGH, L.A.; DEB, S.K.; SPARKS, S.A.; MCNAUGHTON, L.R. 2018. Astaxanthin in Exercise Metabolism, Performance and Recovery: A Review. Frontiers in Nutrition. 4(1):76. <https://doi.org/10.3389/fnut.2017.00076>

11. CAMAGNA, M.; GRUNDMANN, A.; BÄR, C.; KOSCHMIEDER, J.; BEYER, P.; WELSCH, R. 2019. Enzyme fusion removes competition for geranylgeranyl diphosphate in carotenogenesis. *Plant Physiology*. 179(3):1013-1027.
<https://doi.org/10.1104/pp.18.01026>
12. CAO, H.; LUO, H.; YUAN, H.; EISSLER, M.A.; THANNHAUSER, T.W.; WELSCH, R.; HAO, Y.J.; CHENG, L.; LI, L. 2019. A neighboring aromatic-aromatic amino acid combination governs activity divergence between tomato phytoene synthases. *Plant Physiology*. 180(4):1988-2003.
<https://doi.org/10.1104/pp.19.00384>
13. CHEN, J.T.; KOTANI, K. 2016. Astaxanthin as a potential protector of liver function: A Review. *Journal of Clinical Medicine Research*. 8(10):701-704.
<https://doi.org/10.14740/jocmr2672w>
14. CHO, K.S.; SHIN, M.; KIM, S.; LEE, S.B. 2018. Recent advances in studies on the therapeutic potential of dietary carotenoids in neurodegenerative diseases. *Oxidative medicine and cellular longevity*. 2018:4120458.
<https://doi.org/10.1155/2018/4120458>
15. DAVINELLI, S.; NIELSEN, M.E.; SCAPAGNINI, G. 2018. Astaxanthin in skin health, repair, and disease: A comprehensive review. *Nutrients*. 10(4):522.
<https://doi.org/10.3390/nu10040522>
16. DHINGRA, D.; BANSAL, Y. 2014. Antidepressant-like activity of beta-carotene in unstressed and chronic unpredictable mild stressed mice. *Journal of Functional Foods*. 7(1):425-434.
<https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.01.015>
17. DUTTA, D.; DUTTA, A.; RAYCHAUDHURI, U.; CHAKRABORTY, R. 2006. Rheological characteristics and thermal degradation kinetics of beta-carotene in pumpkin puree. *Journal of Food Engineering*. 76(4):538-546.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.056>
18. ESTRADA S., E.I.; GARCÍA D., M.A.; GUTIÉRREZ F., A.; CARDOZO C., C.I.; SÁNCHEZ, M.S.; BAENA G., D.; VALLEJO C., F.A. 2004. Cultivo de zapallo. Variedad UNAPAL bolo verde y UNAPAL mandarino. Segunda Edición. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. (Colombia). 19p.
19. ESTRADA SALAZAR, E.I.; VALLEJO CABRERA, F.A.; BAENA GARCÍA, D.; ORTIZ GRISALES, S.; ZAMBRANO BLANCO, E. 2010. Unapal-Llanogrande, nuevo cultivar de zapallo adaptado a las condiciones del valle geográfico del río Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*. 59(2):135-143.
20. FAOSTAT. 2020. Base de datos, cultivos (producción). Food and agriculture Organization of the United Nations. Disponible desde Internet en:
<https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize>
21. FEDER, A.; CHAYUT, N.; GUR, A.; FREIMAN, Z.; TZURI, G.; MEIR, A.; SAAR, U.; OHALI, S.; BAUMKOLER, F.; GAL-ON, A.; SHNAIDER, Y.; WOLF, D.; KATZIR, N.; SCHAFFER, A.; BURGER, J.; LI, L.; TADMOR, Y. 2019. The role of carotenogenic metabolic flux in carotenoid accumulation and chromoplast differentiation: Lessons from the melon fruit. *Frontiers in Plant Science*. 10:1250.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01250>
22. FIEDOR, J.; BURDA, K. 2014. Potential role of carotenoids as antioxidants in human health and disease. *Nutrients*. 6(2):466-488.
<https://doi.org/10.3390/nu6020466>
23. GIULIANO, G. 2014. Plant carotenoids: genomics meets multi-gene engineering. *Current Opinion in Plant Biology*. 19(1):111-117.
<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2014.05.006>
24. GOMESRIBEIRO, E.M.; CHITCHUMROONCHOKCHAI, C.; JAEGER DE CARVALHO, L.M.; DE MOURA, F.F.; VIANA DE CARVALHO, J.L.; FAILLA, M.L. 2015. Effect of style of home cooking on retention and bioaccessibility of pro-vitamin A carotenoids in biofortified pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.). *Food Research International*. 77(3):620-626.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.08.038>
25. GRIMMIG, B.; KIM, S.H.; NASH, K.; BICKFORD, P.C.; SHYTLER, R.D. 2017. Neuroprotective mechanisms of astaxanthin: a potential therapeutic role in preserving cognitive function in age and neurodegeneration. *Geroscience*. 39(1):19-32.
<https://doi.org/10.1007/s11357-017-9958-x>
26. GUEYE ROKHAYA, S.; DOSSA, M.E.M.; MAMADOU, B.; CHEIKH, S.; YORO T.; DIEDHIOU, A.; IDRISSE, N.; MOUSTAPHA, T.; ROKHAYA, G.; MATAR, S.; DJIBRIL, F.; ALASSANE, W. 2017. Analysis of minerals in watermelon (*Citrullus lanatus*). *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 9(2):19-24.
27. HASHIMOTO, H.; URAGAMI, C.; COGDELL, R.J. 2016. Carotenoids and photosynthesis. En: Stange, C. (ed). *Carotenoids in nature. Subcellular Biochemistry*. Volumen 79. Springer. (Suiza). p.111-139.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-39126-7_4
28. JAEGER DE CARVALHO, L.; BARROS GOMES, P.; DE OLIVEIRA GODOY, R.; PACHECO, S.; FERNANDES DO MONTE, P.; VIANA DE CARVALHO, J.; NUTTI,

- M.; LIMA NEVES, A.; RODRIGUES ALVES VIEIRA, A.; RAMALHO RAMOS, S. 2012. Total carotenoid content, α -carotene and β -carotene, of landrace pumpkins (*Cucurbita moschata* Duch): A preliminary study. Food Research International. 47(2):337-340. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.07.040>
29. JANG, H.A.; UTOMO, S.D.; KWON, S.Y.; HA, S.H.; XING-GUO, Y.; CHOI, P.S. 2016. Production of transgenic cucumber expressing phytoene synthase-2A carotene desaturase gene. Journal of Plant Biotechnology. 43(3):341-346. <https://doi.org/10.5010/JPB.2016.43.3.341>
30. KHALIL, A.; TAZEDDINOVA, D.; ALJOUAAA, K.; KAZHMUKHANBETKYZY, Z.A.; ORAZOV, A.; TOSHEV, A.D. 2021. Carotenoids: Therapeutic strategy in the battle against viral emerging diseases, COVID-19: An overview. Preventive Nutrition and Food Science. 26(3):241-261. <https://doi.org/10.3746/pnf.2021.26.3.241>
31. KIM, N.R.; KIM, H.Y.; KIM, M.H.; KIM, H.M.; JEONG, H.J. 2016. Improvement of depressive behavior by Sweetme Sweet Pumpkin™ and its active compound, β -carotene. Life sciences. 147(1):39-45. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2016.01.036>
32. KIM, S.H.; KIM, H. 2018. Inhibitory effect of astaxanthin on oxidative stress-induced mitochondrial dysfunction-a mini-review. Nutrients. 10(9):1137. <https://doi.org/10.3390/nu10091137>
33. LADO, J.; GAMBETTA, G.; ZACARIAS, L. 2018. Key determinants of citrus fruit quality: Metabolites and main changes during maturation. Scientia Horti. 233(1):238-248. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.055>
34. LI, L.; YUAN, H.; ZENG, Y.; XU, Q. 2016. Plastids and carotenoid accumulation. En: Stange, C. (eds). Carotenoids in Nature. Subcellular Biochemistry. Volumen 79. Springer. (Suiza). p.273-293. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39126-7_10
35. LLORENTE, B.; D'ANDREA, L.; RUIZ-SOLA, M.A.; BOTTERWEG, E.; PULIDO, P.; ANDILLA, J.; LOZA-ALVAREZ, P.; RODRIGUEZ-CONCEPCION, M. 2016. Tomato fruit carotenoid biosynthesis is adjusted to actual ripening progression by a light-dependent mechanism. The Plant journal: for cell and molecular biology. 85(1):107-119. <https://doi.org/10.1111/tpj.13094>
36. LU, P.J.; WANG, C.Y.; YIN, T.T.; ZHONG, S.L.; GRIERSON, D.; CHEN, K.S.; XU, C.J. 2017. Cytological and molecular characterization of carotenoid accumulation in normal and high-lycopene mutant oranges. Scientific Reports. 7(1):761. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00898-y>
37. LUO, Y.; WANG, C.; WANG, M.; WANG, Y.; XU, W.; HAN, H.; WANG, Z.; ZHONG, Y.; HUANG, H.; QU, S. 2021. Accumulation of carotenoids and expression of carotenoid biosynthesis genes in fruit flesh during fruit development in two *Cucurbita maxima* inbred lines. Horticultural Plant Journal. 7(6):529-538. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2020.07.006>
38. MARTÍNEZ-VALDIVIESO, D.; FONT, R.; BLANCO-DÍAZ, M.T.; MORENO-ROJAS, J.M.; GÓMEZ, P.; ALONSO-MORAGA, A.; DEL RÍO-CELESTINO, M. 2014. Application of near-infrared reflectance spectroscopy for predicting carotenoid content in summer squash fruit. Computers and Electronics in Agriculture. 108:71-79. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.07.003>
39. MENDELOVA, A.; MENDEL, L.; FIKSELOVÁ, M.; MAREČEK, J.; VOLLMANNOVA, A. 2017. Winter squash (*Cucurbita moschata* Duch) fruit as a source of biologically active components after its thermal treatment. Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. 11(1):489-495. <https://doi.org/10.5219/788>
40. MOISE, A.R.; AL-BABILI, S.; WURTZEL, E.T. 2014. Mechanistic aspects of carotenoid biosynthesis. Chemical Reviews. 114(1):164-193. <https://doi.org/10.1021/cr400106y>
41. MORENO BELTRAN, J.C.; STANGE, C. 2016. Apocarotenoids: A New Carotenoid-Derived Pathway. Subcellular Biochemistry. 79:239-272. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39126-7_9
42. NAKKANONG, K.; YANG, J.H.; ZHANG, M.F. 2012. Carotenoid accumulation and carotenogenic gene expression during fruit development in novel interspecific inbred squash lines and their parents. Journal of Agricultural Food Chemistry. 60(23):5936-5944. <https://doi.org/10.1021/jf3007135>
43. NEUMAN, H.; GALPAZ, N.; CUNNINGHAM, F.X.; ZAMIR, D.; HIRSCHBERG, J. 2014. The tomato mutation *nxd1* reveals a gene necessary for neoxanthin biosynthesis and demonstrates that violaxanthin is a sufficient precursor for abscisic acid biosynthesis. The Plant journal: for cell and molecular biology. 78(1):80-93. <https://doi.org/10.1111/tpj.12451>
44. NORSHAZILA, S.; IRWANDI, J.; OTHMAN, R.; YUMI ZUHANIS, H.H. 2014. Carotenoid content in different locality of pumpkin (*Cucurbita moschata*) in Malaysia. International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences. 6(3):29-32.
45. ORTIZ GRISALES, S.; PASOS LÓPEZ, S.C.; RIVAS ABADÍA, X.C.; VALDÉS RESTREPO, M.P.; VALLEJO,

- F.A. 2009. Extracción y caracterización de aceite de semillas de zapallo. *Acta Agronómica*. 58(3):145-151.
46. ORTIZ GRISALES, S.; VALDÉS RESTREPO, M.P.; VALLEJO CABRERA, F.A.; BAENA GARCÍA, D. 2015. Genetic correlations and path analysis in butternut squash *Cucurbita moschata* Duch. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 68(1):7399-7409. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47827>
47. ORTIZ GRISALES, S.; VALDÉS-RESTREPO, M.P.; VALLEJO CABRERA, F.A. 2020. Efecto de la endocría sobre habilidad combinatoria del rendimiento y calidad en zapallo (*Cucurbita moschata* Duchesne). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 23(1):1:e1176. <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n1.2020.1176>
48. ORTIZ GRISALES, S.; VALLEJO CABRERA, F.A.; BAENA GARCÍA, D.; ESTRADA SALAZAR, E.I.; VALDÉS RESTREPO, M.P. 2013. Zapallo para consumo en fresco y fines agroindustriales: Investigación y desarrollo. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. Santiago de Cali, Feriva. Colombia. 250p.
49. PROVESI, J.G.; AMANTE, E.R. 2015. Chapter 9 - Carotenoids in pumpkin and impact of processing treatments and storage. En: Preedy, V. *Processing and impact on active components in food*. Academic Press. p.71-80. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404699-3.00009-3>
50. RODRÍGUEZ, A.D. 2015. Food Carotenoids: Chemistry, Biology, and Technology. 308p. <https://doi.org/10.1002/9781118864364.ch3>
51. RODRÍGUEZ-AMAYA, D.B.; KIMURA, M.; GODOY, H.T.; AMAYA-FARFAN, J. 2008. Updated Brazilian database on food carotenoids: Factors affecting carotenoid composition. *Journal of Food Composition and Analysis*. 21(6):445-463. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.04.001>
52. RODRÍGUEZ-CONCEPCIÓN, M.; AVALOS, J.; BONET, M.L.; BORONAT, A.; GOMEZ-GOMEZ, L.; HORNERO-MENDEZ, D.; LIMON, M.C.; MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, A.J.; OLMEDILLA-ALONSO, B.; PALOU, A.; RIBOT, J.; RODRIGO, M.J.; ZACARIAS, L.; ZHU, C. 2018. A global perspective on carotenoids: Metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health. *Progress in Lipid Research*. 70:62-93. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2018.04.004>
53. RODRÍGUEZ R., R.; VALDÉS R., M.P.; ORTIZ G., S. 2018. Características agronómicas y calidad nutricional de los frutos y semillas de zapallo *Cucurbita* sp. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*. 10(1):86-97. <https://doi.org/10.24188/recia.v10.n1.2018.636>
54. RUIZ-SOLA, M.Á.; RODRÍGUEZ-CONCEPCIÓN, M. 2012. Carotenoid biosynthesis in Arabidopsis: A colorful pathway. *The arabidopsis book*. 10:e0158. <https://doi.org/10.1199/tab.0158>
55. SAHA, S.K.; LEE, S.B.; WON, J.; CHOI, H.Y.; KIM, K.; YANG, G.M.; DAYEM, A.A.; CHO, S.G. 2017. Correlation between Oxidative Stress, Nutrition, and Cancer Initiation. *International Journal of Molecular Sciences*. 18(7):1544 <https://doi.org/10.3390/ijms18071544>
56. SARABI, B.; BOLANDNAZAR, S.; GHADERI, N.; GHASHGHAIE, J. 2017. Genotypic differences in physiological and biochemical responses to salinity stress in melon (*Cucumis melo* L.) plants: Prospects for selection of salt tolerant landraces. *Plant physiology and biochemistry*. 119:294-311. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.09.006>
57. SCHILDKRAUT, J.J. 1965. The catecholamine hypothesis of affective disorders: a review of supporting evidence. *The American Journal of Psychiatry*. 122(5):509-22. <https://doi.org/10.1176/ajp.122.5.509>
58. SHI, X.; WU, H.; SHI, J.; XUE, S.J.; WANG, D.; WANG, W.; CHENG, A.; GONG, Z.; CHEN, X.; WANG, C. 2013. Effect of modifier on the composition and antioxidant activity of carotenoid extracts from pumpkin (*Cucurbita maxima*) by supercritical CO₂. *LWT - Food Science and Technology*. 51(2):433-440. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.003>
59. SINGH, A.; KUMAR, V. 2021. Nutritional, phytochemical, and antimicrobial attributes of seeds and kernels of different pumpkin cultivars. *Food Frontiers*. 3(1):182-193. <https://doi.org/10.1002/fft.2.117>
60. SONG, J.; WEI, Q.; WANG, X.; LI, D.; LIU, C.; ZHANG, M.; MENG, L. 2018. Degradation of carotenoids in dehydrated pumpkins as affected by different storage conditions. *Food Research International*. 107:130-136. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.024>
61. SUN, T.; RAO, S.; ZHOU, X.; LI, L. 2022. Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. *Molecular Horticulture*. 2(3). <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2>
62. SUN, T.; YUAN, H.; CAO, H.; YAZDANI, M.; TADMOR, Y.; LI, L. 2017. Carotenoid metabolism in plants: the role of plastids. *Molecular Plant*. 11(1):58-74. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.09.010>
63. THORNE-LYMAN, A.; FAWZI, W.W. 2012. Vitamin D during pregnancy and maternal, neonatal and infant health outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Paediatric*

- and Perinatal Epidemiology. 26(Suppl 1):75-90.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3016.2012.01283.x>
64. TUAN, P.A.; LEE, J.; PARK, C.H.; KIM, J.K.; NOH, Y.H.; KIM, Y.B.; KIM, H.R.; PARK, S.U. 2019. Carotenoid biosynthesis in oriental melon (*Cucumis melo* L. var. makuwa). Foods. 8(2):77.
<https://doi.org/10.3390/foods8020077>
65. VALDÉS RESTREPO, M.P.; ORTIZ GRISALES, S.; VALLEJO CABRERA, F.A.; BAENA GARCÍA, D. 2014. Variabilidad en frutos y semillas de *Cucurbita moschata* Duch. y *Cucurbita argyrosperma* subsp. *sororia* L.H. Bailey Merrick & D.M. Bates. Acta Agronómica. 63(2):282-293.
<https://doi.org/10.15446/acag.v63n3.41052>
66. VALDEZ-ARJONA, L.P.; RAMÍREZ-MELLA, M. 2019. Pumpkin waste as livestock feed: impact on nutrition and animal health and on quality of meat, milk, and egg. Animals. 9(10):769.
<https://doi.org/10.3390/ani9100769>
67. VALLEJO C., F.A.; BAENA G., D.; ORTIZ G., S.; ESTRADA S., E.I. TOBAR T., D.E. 2010. Unapal-Dorado, nuevo cultivar de zapallo con alto contenido de materia seca para consumo en fresco. Acta Agronómica. 59(2):127-134.
68. VOLKOV, V. 2015. Salinity tolerance in plants. Quantitative approach to ion transport starting from halophytes and stepping to genetic and protein engineering for manipulating ion fluxes. Frontiers in Plant Science. 6:873.
<http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2015.00873>
69. WANG, Q.; WU, C.; XIE, B.; LIU, Y.; CUI, J.; CHEN, G.; ZHANG, Y. 2012. Model analysing the antioxidant responses of leaves and roots of switchgrass to NaCl-salinity stress. Plant Physiology Biochemistry. 58:288-296.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.06.021>
70. WELSCH, R.; ARANGO, J.; BÄR, C.; SALAZAR, B.; AL-BABILI, S.; BELTRÁN, J.; CHAVARRIAGA, P.; CEBALLOS, H.; TOHME, J.; BEYER P. 2010. Provitamin A accumulation in cassava (*Manihot esculenta*) roots driven by a single nucleotide polymorphism in a phytoene synthase gene. The Plant Cell. 22(10):3348-3356.
<https://doi.org/10.1105/tpc.110.077560>
71. WIDOMSKA, J.; WELC, R.; GRUSZECKI, W.I. 2019. The effect of carotenoids on the concentration of singlet oxygen in lipid membranes. Biochim. Biophys. Acta (BBA) - Biomembranes. 1861(4):845-851.
<https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2019.01.012>
72. XUAN, R.R.; NIU, T.T.; CHEN, H.M. 2016. Astaxanthin blocks preeclampsia progression by suppressing oxidative stress and inflammation. Molecular Medicine Reports. 14(3):2697-2704.
<https://doi.org/10.3892/mmr.2016.5569>
73. YUAN, H.; ZHANG, J.; NAGESWARAN, D.; LI, L. 2015. Carotenoid metabolism and regulation in horticultural crops. Horticulture Research. 2:15036.
<https://doi.org/10.1038/hortres.2015.36>
74. ZHANG, Y.; NAVARRO, E.; CÁNOVAS-MÁRQUEZ, J.T.; ALMAGRO, L.; CHEN, H.; CHEN, Y.Q.; ZHANG, H.; TORRES-MARTÍNEZ, S.; CHEN, W.; GARRE, V. 2016. A new regulatory mechanism controlling carotenogenesis in the fungus *Mucor circinelloides* as a target to generate β -carotene over-producing strains by genetic engineering. Microb Cell Fact. 15:99.
<https://doi.org/10.1186/s12934-016-0493-8>

Evaluación de la dinámica de impregnación al vacío de cogollos de palma de iraca

Evaluation of the dynamics of vacuum impregnation of iraca palm buds

Misael Cortes-Rodríguez¹ ; Rodrigo Hoyos-Sánchez² ; Leidy Areiza-Restrepo³ ; Cristian Camilo Ossa-Cardona^{1*} 

¹Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: mcortesro@unal.edu.co; ccossac@unal.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo Biotecnología Vegetal. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: rhoyos@unal.edu.co

³Universidad Nacional de Colombia. Medellín - Antioquia, Colombia; email: lareizar@unal.edu.co

*autor de correspondencia: ccossac@unal.edu.co

Cómo citar: Cortes-Rodríguez, M.; Hoyos-Sánchez, R.; Areiza-Restrepo, L.; Ossa-Cardona, C.C. 2023. Evaluación de la dinámica de impregnación al vacío de cogollos de palma de iraca. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2380. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2380>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: julio 29 de 2022

Aceptado: junio 21 de 2023

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Aunque los cogollos de la palma de iraca pueden ser empleados como fuente para la alimentación humana, la mayoría de la información disponible es para la producción de artesanías. Se evaluó la respuesta a la impregnación al vacío (IV) de cogollos frescos de palma de iraca (CFPI), con una solución isotónica de NaCl (0,6 %). Se utilizó la metodología de superficie de respuesta, con un diseño central compuesto ($\alpha=1$), considerando las siguientes variables independientes: el diámetro de los cogollos (10-15 mm), el tiempo en la etapa de vacío T1 (3-5 minutos) a presión de vacío (4.1 kPa) y el tiempo en la etapa a presión atmosférica local (85,32 kPa), T2 (3-5 min). Las variables dependientes que se tomaron en cuenta fueron fracción volumétrica de impregnación en la etapa de vacío (X1), deformación volumétrica final (g), fracción volumétrica final (X) y porosidad eficaz (Ee). La dinámica de la IV del CFPI identificó que el proceso comporta una expansión volumétrica en la matriz, la cual, finalmente, contribuye a la transferencia de masa del líquido isotónico al interior de la estructura. La microestructura porosa del CFPI es compatible con el proceso de IV, permitiendo los siguientes parámetros de impregnación: g1 (0,451%), X1 (11,457%), g (2,569%), X (17,386%) y Ee (17,036%). La respuesta a la IV en los CFPI identifica a esta matriz alimentaria como adecuada, para la incorporación de componentes fisiológicamente activos.

Palabras clave: Alimentos funcionales; Alimentos mejorados; *Carludovica palmata*; Componentes fisiológicamente activos; Ingeniería de matrices.

ABSTRACT

Although the buds of the iraca palm could be employed as a source of human food, most of the information available is to produce handicrafts. The response to vacuum impregnation (VI) was evaluated in fresh iraca palm buds (FIPB) with an isotonic NaCl solution (0.6 %). The response surface methodology was obtained, with a central compound design ($\alpha=1$), considering the following independent variables: The diameter of the buds (10-15 mm), the time in the vacuum stage T1 (3-5 minutes) at vacuum pressure (4.1 kPa) and the time in the stage at local atmospheric pressure (85.32 kPa), T2 (3-5 min). The dependent variables considered were the volumetric fraction of impregnation in the vacuum stage (X1), the final volumetric deformation (g), the final volumetric fraction (X), and the effective porosity (Ee). FIPB VI dynamics identified that the process involves a volumetric expansion in the matrix, which ultimately contributes to the mass transfer of the isotonic liquid into the structure. The porous microstructure of the FIPB is compatible with the VI process, allowing the following impregnation parameters: g1 (0.451 %), X1 (11.457 %), g (2.569 %), X (17.386%), and Ee (17.036 %). The response to VI in FIPB identifies this food matrix as suitable for the incorporation of physiologically active components.

Keywords: *Carludovica palmata*; Functional foods; Improved foods; Matrix engineering; Physiologically active components.

INTRODUCCIÓN

La palma de Iraca (*Carludovica palmata*), también conocida como paja toquilla, lucaica, jipijapa, lucualahuma o anacuma (Jiménez-Méndez *et al.* 2023), es una planta de la familia de las Cyclanthaceae, con una altura aproximada entre 1,5 y 4,0 m y aprovechada, principalmente, para la producción de artesanías (Becerra *et al.* 2004); sin embargo, los cogollos frescos de la palma de Iraca (CFPI) son comestibles, cuando los tallos están alrededor de 0,5 a 0,7 m. Su uso alimenticio se compara con los palmitos y espárragos y representa un alimento ancestral con muchas alternativas, para el desarrollo de nuevos alimentos innovadores (Becerra *et al.* 2004).

Los alimentos con características funcionales han tomado gran interés en pro de proveer dietas energéticamente complementarias y saludables que, sin cambiar, en gran medida, sus propiedades sensoriales, promuevan la absorción de componentes fisiológicamente activos (CFA) (Salvatori *et al.* 1998). Así, los estudios en impregnación a vacío (IV) utilizan soluciones isotónicas con actividad de agua, similar a la de la matriz alimentaria, ya que garantiza una apropiada transferencia de masa entre la matriz y la solución, al mismo tiempo, que funciona como vehículo para el transporte de otras sustancias (Ossa Montoya *et al.* 2023).

La ingeniería de matrices utiliza la técnica de IV, como mecanismo de incorporación de componentes, como los CFA, al interior de los alimentos porosos (Derossi *et al.* 2012), aprovechando la composición y la estructura de la matriz, de manera que se puedan obtener alimentos mejorados, modificando su composición para proveerles, tanto propiedades funcionales como sensoriales, de una manera rápida y simple, sin la ruptura de la estructura celular (Mierzwa *et al.* 2023). El proceso IV consiste en el intercambio del gas o del líquido ocluido en los poros o espacios extracelulares por una disolución externa, mediante la acción del mecanismo hidrodinámico (MHD) (Fito *et al.* 1996), debido a la diferencia de presiones que se presentan en el sistema, que provocan la expansión del gas y el ingreso de un considerable volumen de solución a la estructura del alimento (Fito & Pastor, 1994). El sistema durante la acción del MHD experimenta cambios estructurales y fisiológicos, indicando que, conjuntamente, se pueden presentar.

La IV está afectada por diversos factores: composición del tejido, la estructura del tejido (tamaño y distribución de poros), el tiempo de relajación de la matriz sólida, el tamaño y forma de la muestra y de la velocidad de flujo del gas y del líquido durante la acción del MHD que, a su vez, depende de la estructura del tejido y de la viscosidad de la solución (Thakur & Modi, 2020). La IV promueve cambios composicionales muy rápidos en frutas y vegetales por adición a la solución de impregnación de componentes, que aseguran una mejor estabilidad del producto, al disminuir el pH y la incorporación de agentes antimicrobianos o antiparadeantes (Thakur & Modi, 2020; Rezende Abrahão & Gomes Corrêa, 2021; Cortez-Latorre *et al.* 2021; Santarelli *et al.* 2021) o la mejora de algunos atributos de calidad (Derossi *et al.* 2012; Assis *et al.* 2019; Luo *et al.* 2019; Derossi *et al.* 2021). La IV promueve, igualmente, cambios en las propiedades mecánicas, estructurales, ópticas y

térmicas, que afectan la calidad del producto final (Neri *et al.* 2019; Panayampadan *et al.* 2022). Cambios estructurales en fresa, en piña y en otras frutas promovidas por la IV han sido reportados por Duarte-Correa *et al.* (2020).

La IV ha sido aplicada con resultados positivos en procesos de fortificación de frutas y hortalizas con CFA hidrosolubles y liposolubles (Derossi *et al.* 2012; Assis *et al.* 2019; Cortez-Latorre *et al.* 2021; Panayampadan *et al.* 2022; Kręcisiz *et al.* 2023), en procesos de salado de quesos (Gonzalez *et al.* 1999; Pavia *et al.* 2000; González-Martínez *et al.* 2002; Le & Konsue, 2021), en productos cárnicos (Aykın-Dinçer, 2021; Chiralt *et al.* 2001; Ramírez *et al.* 2021) y en pescados (Tomac *et al.* 2020; Marchetti *et al.* 2022). La IV, como proceso previo a la deshidratación osmótica, aporta cambios estructurales en el tejido y modificaciones en la transferencia de masa (Le & Konsue, 2021; Mierzwa *et al.* 2022) y, además, la incorporación de crioprotectores, a partir de la IV en el proceso de congelación, contribuye a la reducción de los cambios de textura estructural y composición química (Pandiselvam *et al.* 2022; Panayampadan *et al.* 2022). Bajo este contexto, el objetivo de la investigación fue evaluar la respuesta a la IV del cogollo de la palma de Iraca, utilizando una solución isotónica a la matriz alimentaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron CFPI extraídos de 50 plantas cultivadas en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (6°15'44" N 75°34'37" O, altitud 1.495 m s.n.m., a una temperatura promedio entre 28 /17 °C y 65,0 % de HR). Se seleccionaron tallos de 0,5 a 0,7 m de longitud, tomadas desde la parte basal del tallo halando hacia arriba, para no provocar rupturas en los cogollos tiernos, que fueron recortados con una altura de 0,04 m, para las pruebas de impregnación, tomando de cada tallo solo un cogollo. La preparación de la solución isotónica de impregnación se preparó con NaCl (0,6 %p/p), que corresponde a una actividad de agua (a_w), similar a los cogollos. Los diámetros se codificaron en tres rangos de tamaños: 1) 10,0 - <11,6 mm, 2) >11,6 - < 13,3 mm y 3) >13,3 - 15,0 mm.

Caracterización del CFPI. El contenido de humedad (X_w) fue determinado según el método descrito por la AOAC (1990), secando las muestras en una estufa de aire forzado, a una temperatura 105 °C, hasta alcanzar peso constante, aproximadamente, 24 horas después. Actividad de agua (a_w): se determinó con un higrómetro con punto de rocío, a 25 °C (marca Aqualab Decagón modelo CX3±0.03, Pullman, WA, USA). °Brix: se determinó según el método AOAC (1990), en un refractómetro (Atago, Tokyo, Japón), a 20 °C.

Proceso de impregnación al vacío. El proceso de IV fue realizado en una cámara de impregnación en acero inoxidable, que cuenta con una bomba de vacío Dosivac DVR 140. El proceso, se llevó a cabo con una presión de vacío de 4,06 kPa (P_1) y una presión barométrica, para la ciudad de Medellín, correspondiente a 85,32 kPa (P_2) y la evolución del peso de la muestra durante todo el

proceso se registró con una balanza con una precisión de $\pm 0,01g$. El proceso IV consistió en sumergir la muestra en la solución isotónica de NaCl al 0,6% p/p; luego, el sistema fue sometido a la P₁ durante el tiempo aplicado en la etapa de vacío, de 3 - 5 minutos; posteriormente, se restableció la P₂, manteniéndose sumergidas durante el tiempo aplicado en esta etapa, de 3 - 5 minutos.

Los CFPI impregnados fueron caracterizados en función de los parámetros de IV y de acuerdo con el proceso de transferencia de masa, descrito según el modelo matemático, propuesto por Fito (1994) y Fito *et al.* (1996). La determinación experimental de los parámetros de impregnación se realizó según la metodología descrita por Martínez Navarrete *et al.* (1998) y el proceso de transferencia de masa de los PI, se realizó teniendo en cuenta el modelo matemático descrito por Fito *et al.* (1996), expresado en las ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5 (X₁, g₁, X, g y Ee, respectivamente).

$$X_1 = (m_1 - m_0) / (\rho_{SI} / V_0) \quad \text{ecuación 1}$$

$$g_1 = (V_1 - V_0) / V_0 \quad \text{ecuación 2}$$

$$X = (m_2 - m_0) / (\rho_{SI} / V_0) \quad \text{ecuación 3}$$

$$g = (V_2 - V_0) / V_0 \quad \text{ecuación 4}$$

$$Ee = ((X - g) r + g_1) / (r - 1) \quad \text{ecuación 5}$$

Donde, m₀ (kg) es la masa inicial del CFPI; m₁ (kg), la masa del líquido impregnado del CFPI al final de la etapa de vacío; m₂ (kg), la masa de líquido impregnado en el CFPI al final del proceso de IV; ρ_{SI} (kg/m³) es la densidad de la solución hipotónica de impregnación; V₀, el volumen inicial de la muestra; V₁ (m³) es el volumen de la muestra al final de la etapa de vacío; V₂ (m³), el volumen del CFPI al final del proceso de IV y r, la relación de compresión ($r = P_2 / P_1$).

Los resultados se analizaron a partir del análisis de la varianza ANOVA, aplicando el método LSD (mínimas diferencias significativas), con un nivel de significancia del 95 % ($\alpha=0,05$) (15 experimentos) y se utilizó el paquete estadístico Statgraphics Centurión XVII. Las variables dependientes asociadas a la IV se reportaron como valores medios más la desviación estándar, a partir de 3 repeticiones. Se aplicó una optimización experimental de múltiples respuestas para definir el rango de diámetro y los tiempos óptimos, lo que permitió obtener una mejor respuesta a la impregnación al vacío.

Las variables dependientes se modelaron mediante un modelo polinomial de segundo orden (ecuación 6), donde Y es la variable dependiente, β_0 es constante y β_A , β_B y β_C son los coeficientes lineales; β_{AB} , β_{AC} y β_{BC} son los coeficientes de interacción de los factores lineales y β_A^2 , β_B^2 y β_C^2 son los coeficientes cuadráticos. El modelo se ajustó mediante el método de falta de ajuste y el coeficiente de regresión (R²). Las variables dependientes para cada experimento se obtuvieron por triplicado. Por otro lado, se realizó una optimización experimental de múltiples respuestas, teniendo en cuenta los resultados del ANOVA y fijando criterios, pesos e

impactos en las variables dependientes que favorezcan la calidad. La validación de los modelos se realizó a partir del error medio relativo (EMR) (Ecuación 7), comparando los valores de la variable dependiente predicha y la experimental a la condición óptima. Los valores experimentales, en condiciones óptimas, se obtuvieron de 3 repeticiones.

$$Y = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_C C + \beta_{AB} AB + \beta_{AC} AC + \beta_{BC} BC + \beta_A^2 A^2 + \beta_B^2 B^2 \quad \text{ecuación 6}$$

$$EMR = \frac{\text{valor teórico} - \text{valor experimental}}{\text{valor teórico}} \times 100 \quad \text{ecuación 7}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del cogollo fresco. Las características fisicoquímicas del CFPI presentaron valores de Xw de $93,0 \pm 1,1$ %; a_w: $0,993 \pm 0,001$ y °Brix = $4,6 \pm 0,1$ %, pH= $5,8 \pm 0,0$. Estos resultados demuestran que la matriz de estudio presenta altos niveles de Xw, lo cual, es correspondiente a un alto valor de a_w, que la hace un sustrato favorable al crecimiento microbiológico, que se favorece por ser un producto con un pH de baja acidez. El contenido de sólidos solubles fue bajo y es conferido, principalmente, por carbohidratos solubles y sales minerales presentes.

Proceso de impregnación al vacío. La tabla 1 presenta los valores medios y la desviación estándar de los parámetros de IV (X₁, g₁, X, g y Ee) del proceso de IV del CFPI. Los resultados del ANOVA se resumen como sigue: g₁ presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) respecto a las variables independientes T1 y T2 y con las interacciones lineales diámetro-T1 y diámetro-T2; la X₁ presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) con respecto a la interacción lineal T1-T2; la g presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) respecto a la variable independiente T2 y con las interacciones lineales diámetro-T2 y T1-T2; la Ee presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) respecto a la interacción lineal de las variables independientes T1-T2. Por otro lado, la X no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) respecto a ninguna de las variables independientes, ni con las interacciones lineales o cuadráticas.

En general, se observa una influencia importante de las variables independientes seleccionadas sobre la matriz porosa CFPI. La variable g₁ presentó fluctuaciones entre -1,5 y 1,8 %; sin embargo, los resultados identifican que durante la etapa de vacío a P₁ se ejerce, principalmente, una expansión volumétrica (valores positivos) en el CFPI, debido a que la fuerza externa aplicada genera un incremento en mayor o menor medida del volumen de la estructural y, por ende, de la porosidad. Esta expansión volumétrica dependerá de la resistencia mecánica (firmeza) que ofrece la estructura durante el tiempo de aplicación en la etapa de vacío (T1) o del estado de maduración del CFPI. Los valores medios de X₁ fluctuaron entre 2,5 y 13,0%, lo que denota ingreso de la solución isotónica de impregnación en la etapa de vacío. Este ingreso de líquido es la resultante entre las fuerzas capilares que actúan hacia el interior de la estructura, la cual, ahora, se comporta con mayor porosidad, debido a la expansión volumétrica y la fuerza que actúa en sentido contrario, hacia el exterior debido al vacío a P₁.

La figura 1 presenta los gráficos volumen de respuesta de la g_1 y X_1 , que muestran que no existe una tendencia definida de g_1 con respecto a T_1 y T_2 ; existe una dependencia de estas con el diámetro, generando una interacción diámetro- T_1 positiva y una interacción diámetro- T_2 negativa. Esto implica que, la g_1 se incrementa a T_1

bajos y este disminuye cuando T_1 es alto; mientras que, g_1 a T_2 bajos disminuye y a T_2 altos incrementa. En la figura 1, también se identifica el efecto de la interacción negativa T_1 - T_2 sobre la X_1 , observándose una tendencia de mayor ingreso de líquido de impregnación a bajos T_1 y altos T_2 .

Tabla 1. Resultados del proceso de IV de los cogollos frescos de palma de iraca (CFPI).

Experimento	Diámetro (mm)	T1 (min)	T2 (min)	g_1 (%)	X_1 (%)	g (%)	X (%)	E_e (%)
1	14,17	5	3	1,79±1,63	7,24±2,15	1,60±0,71	12,70±1,70	12,98±2,78
2	10,83	4	4	1,11±0,45	13,03±3,17	2,60±0,91	17,64±3,65	17,39±4,66
3	12,50	4	3	1,48±0,79	7,54±0,837	2,51±0,73	12,56±1,59	11,72±1,12
4	12,50	3	4	0,96±0,52	8,77±0,96	2,78±0,06	14,88±0,69	14,00±0,79
5	14,17	4	4	0,96±1,04	3,34±1,51	2,32±0,39	8,00±2,43	6,65±2,56
6	10,83	5	5	0,85±0,06	8,54±1,93	4,50±2,33	14,48±1,73	11,55±4,64
7	12,50	4	4	1,18±0,70	6,00±3,74	2,39±0,96	13,69±4,26	13,12±3,99
8	10,83	3	3	1,24±0,37	8,35±2,55	2,69±0,70	16,17±2,72	15,62±2,52
9	14,17	3	5	-1,48±1,91	2,45±7,28	0,95±1,19	10,19±1,89	10,36±1,37
10	12,50	4	4	1,67±0,13	8,10±1,22	2,71±0,25	14,47±1,96	13,71±2,48
11	12,50	4	4	0,65±0,06	8,30±0,64	2,69±0,24	14,36±0,38	13,46±0,16
12	12,50	4	4	1,18±0,72	9,95±1,09	2,83±1,35	17,83±1,43	17,35±1,28
13	12,50	4	5	1,32±0,65	8,39±1,42	2,54±1,35	13,64±1,62	12,91±0,73
14	12,50	4	4	1,20±0,31	9,09±2,08	2,38±0,59	15,13±1,32	14,77±2,22
15	12,50	5	4	0,61±0,20	6,67±0,47	2,16±0,46	13,85±1,02	13,48±1,52

Los valores presentados son la media \pm desviación estándar.

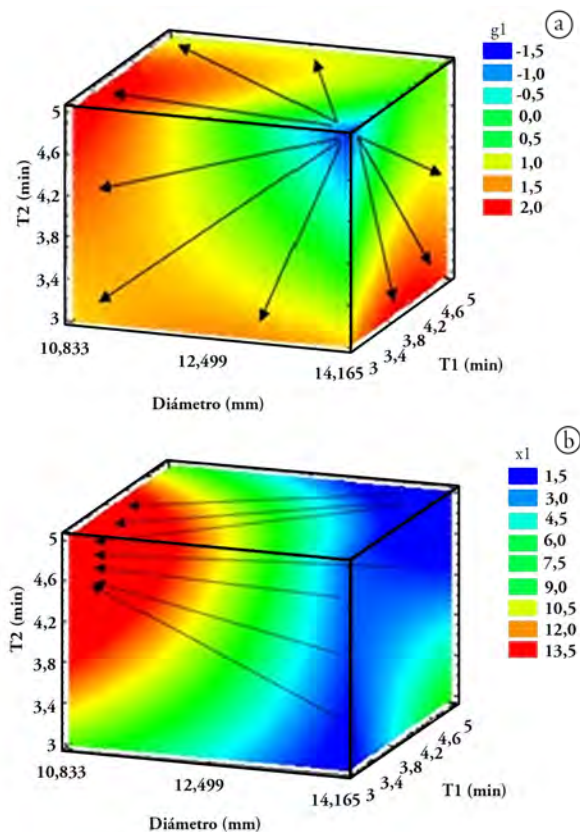


Figura 1. Respuesta en el proceso de impregnación de vacío (IV) de los cogollos frescos de palma de iraca (CFPI). a) g_1 ; b) X_1 .

Dentro de los criterios favorables para la aplicación de la técnica de IV en una matriz porosa, se desea que los niveles de g_1 y g sean lo menor posible; sin embargo, para este caso al ser g_1 positivo y el valor de X_1 positivo, implica que la deformación volumétrica favorece la transferencia de masa hacia el interior en la etapa de vacío; por lo que, un criterio óptimo podría ser un valor intermedio, que contribuya un ingreso y deformación intermedio.

Bajo este contexto, el gráfico de volumen de respuesta identifica la zona verde, donde $g_1 = 0,1535$; además, se observa que la dirección de las flechas identifica el comportamiento que experimenta la estructura, yendo desde una contracción hacia una expansión volumétrica. Por otro lado, el gráfico de volumen de respuesta identifica la zona roja, como es espacio operativo más favorable para X_1 , donde esta se maximiza y, al mismo tiempo, contribuye a una mayor transferencia de masa del líquido de impregnación. Esta condición operativa a menores diámetros del CFPI, T_2 mayores a 3,4 min y T_1 entre 3,0 y 4,6 min. Este comportamiento afianza lo mencionado inicialmente; el impacto de la fuerza hacia el exterior que experimenta el CFPI durante la etapa de vacío, produce un ablandamiento considerable e incremento de la porosidad de estructura, que termina expandiendo la matriz, principalmente, cuando el sistema opera a T_2 altos, debido a que, en esta etapa, la presión positiva del líquido de impregnación contribuye a la mayor expansión y el mayor ingreso del líquido en la estructura.

Los valores medios de g fluctuaron entre 4,5 y 1 %, lo que denota un incremento de la expansión volumétrica del CFPI, lo cual, se atribuye al cambio de presión en la etapa a la P_2 , que acelera el líquido hacia el interior y al acoplamiento del MHD y los fenómenos de deformación-relajación (FDR) que ocurren en un estado de equilibrio al final del proceso, como consecuencia del estrés mecánico ante el ΔP , en el proceso IV (Fito et al. 1996). Los valores medios de X fluctuaron entre 8,0 y 17,8 %, lo cual, indica que la estructura del CFPI es adecuada para la incorporación del líquido isotónico, causado exclusivamente por el MHD, impuesto por los cambios de presión, que induce a los procesos de transferencia de masa en ambas etapas. Se aclara que este argumento se soporta, debido a que la solución isotónica garantiza que no haya otros mecanismos de transferencia de masa, por ejemplo, aquellos debido a la diferencia del potencial químico del agua entre los CFPI y el líquido de impregnación.

La figura 2 presenta los gráficos de volumen de respuesta de g y X , donde se identifica un efecto importante de T_2 , sin llegar a estar bien definido su comportamiento, sino que existe una dependencia con respecto con diámetro y T_1 , lo cual, se refleja por la interacción negativa diámetro- T_2 y por interacción positiva T_1 - T_2 . La mayor expansión del CFPI ($> g$) se potencia cuando la interacción diámetro- T_2 ocurre con mayor diámetro y menor T_2 ; mientras que, con la interacción T_1 - T_2 ocurre a menores T_1 y T_2 . Esta complejidad en la dinámica de la IV sobre los cambios volumétricos se explica por diversos factores, que incluyen la misma naturaleza porosa y firmeza de la estructura, el tamaño y la distribución de los poros al interior de la estructura, el tamaño de la muestra y la velocidad de ingreso del líquido de impregnación (Duarte-Correa et al. 2020).

En el contexto de un producto impregnado, una g mínima garantiza un menor stress mecánico y una estructura similar al producto original, lo que contribuye a una mayor retención del líquido incorporado en su interior; sin embargo, para el CFPI, al presentar g y X_1 valores positivos, resulta favorable a la transferencia de masa hacia su interior, por lo que un criterio óptimo para esta matriz resulta un valor intermedio (2,73 %). Bajo esta circunstancia, el gráfico de volumen de respuesta identifica la zona de color verde cuando g es 2,73 %, ubicándose, principalmente, en rangos de diámetros entre 10,8 - 12,5 mm, T_1 entre 3 - 4 min y en todo rango de T_2 .

La X , a pesar de no presentar diferencias estadísticas, es uno de los parámetros más importantes en los procesos IV, ya que está directamente relacionado con el líquido de impregnación que se incorpora al interior de la estructura; en la figura 2, se ilustra el comportamiento general de la X , donde se observa que una mayor X se alcanza cuando el sistema opera con diámetros de CFPI bajos, en todo el rango de T_1 y T_2 .

Finalmente, los resultados de la E_e fueron coherentes con los resultados encontrado en la X , fluctuando los valores medios entre 6,7 y 17,4%, lo cual, garantiza la eficacia del proceso IV, ya que representa el porcentaje volumétrico disponible para el proceso IV (Kręcisz et al. 2023). En este contexto, la figura 3 presenta los gráficos de superficie y volumen de respuesta de la E_e del CFPI, durante el proceso IV. Los efectos individuales de T_1 y T_2 son dependientes, que hace que la interacción lineal observada de T_1 - T_2 fue negativa, donde los mayores valores se observan a T_1 bajos y T_2 altos y a T_1 altos y T_2 bajos. El efecto de las tres variables independiente se observa mejor en el gráfico de volumen de respuesta, similar al comportamiento de X , lo cual, revalida los mayores valores de E_e , cuando el sistema opera con diámetros bajos y en todo el rango de T_1 y T_2 .

Optimización del proceso IV. La optimización experimental de múltiples respuestas del proceso IV del CFPI se realizó con base en los resultados estadísticos y fijando ciertos criterios que favorezcan los atributos de calidad del cogollo impregnado. La tabla 2 resume las condiciones fijadas de las variables dependientes, bajo las cuales, se realizó la optimización; además, los pesos y el impacto dado a cada variable dependiente, donde el valor de deseabilidad fue del 89,6 %, donde se buscó maximizar X , X_1 y E_e , con el fin de aumentar la cantidad de líquido impregnado y retenido. La aplicación del Software Statgraphics Centurión XV I.I generó, como condiciones óptimas del proceso de impregnación del CFPI, con solución isotónica de NaCl: diámetro 10,83, T_1 : 4,47 min y T_2 : 3,97 min, donde los modelos matemáticos definieron los valores teóricos. Adicionalmente, los valores teóricos obtenidos a las condiciones óptimas fueron: g_1 0,45 %, X_1 11,46 %, g 2,57 %, X 17,39 % y E_e 17,04 %. Los valores experimentales reales bajo las condiciones óptimas fueron: g_1 0,51 %, X_1 17,03 %, g 1,40 %, X 19,15 % y E_e 20,40 %, siendo estos valores similares a los teóricos.

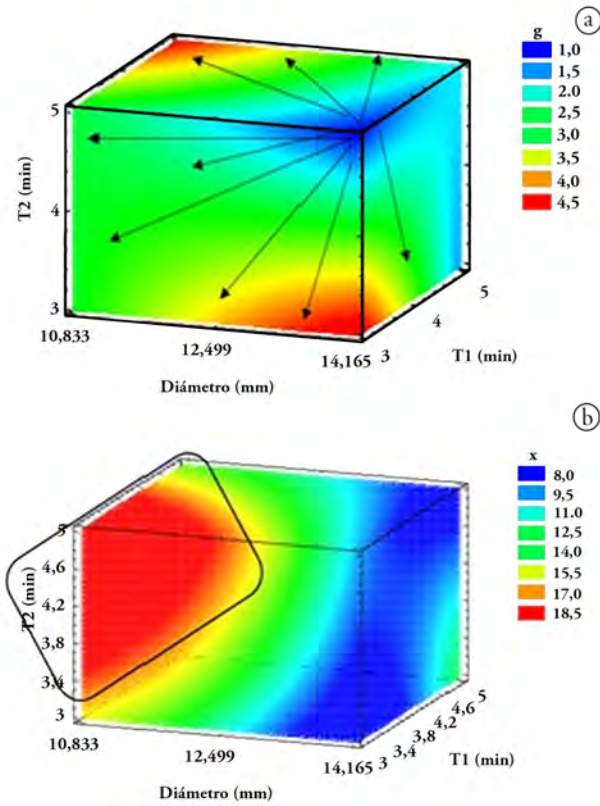


Figura 2. Respuesta en el proceso de impregnación de vacío (IV) de los cogollos frescos de palma de iraca (CFPI). a) g ; b) X .

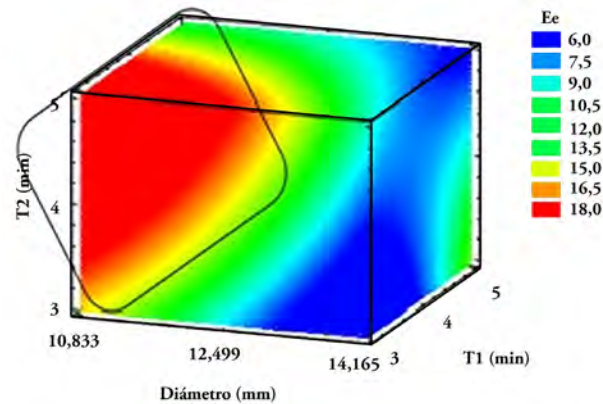


Figura 3. Respuesta de la E_e en el proceso de impregnación de vacío IV de los cogollos frescos de palma de iraca CFPI.

Tabla 2. Optimización experimental del proceso de impregnación de cogollos frescos de palma de iraca CFPI.

<i>Variable dependiente</i>	Criterio	Impacto	Peso	Valor teórico	Valor experimental
g_1 (%)	0,15	4,0	1,0	0,45	0,51
X_1 (%)	Maximizar	4,0	1,0	11,46	17,03
G (%)	2,73	4,0	1,0	2,57	1,39
X (%)	Maximizar	5,0	1,5	17,39	19,14
E_e (%)	Maximizar	5,0	1,5	17,04	20,40

La tabla 3 presenta los coeficientes de regresión estimados del modelo polinómico cuadrático y sus respectivos R^2 . Se observa que los valores R^2 , para la mayoría de las variables, fueron relativamente altos, siendo los valores mostrados superiores a 83,3 %, mientras que, la prueba de falta de ajuste permitió determinar que el modelo

muestra una aceptabilidad, para predecir la variación de estas. Además de lo anterior, los resultados no mostraron significancia estadística relevante ($p>0,05$) en las variables dependientes, lo que indica que el modelo es adecuado para describir el comportamiento de los datos experimentales.

Tabla 3. Coeficientes de los modelos de regresión de las variables dependientes del proceso de impregnación de CFPI.

Fuente	g1	X1	g	X	Ee
Constante	-12,09	-63,43	-20,58	-38,33	-22,04
A: Diámetro	2,21	1,82	3,51	5,03	2,06
B: T1	-4,02	5,75	-1,76	-4,37	-3,58
C: T2	4,16	34,18	2,92	24,10	24,86
AA	-0,08	-0,12	-0,03	-0,40	-0,44
AB	0,50	0,94	-0,17	0,96	1,36
AC	-0,54	-1,37	-0,55	-0,43	0,06
BB	-0,49	-0,79	-0,07	0,43	0,50
BC	0,37	-3,05	1,02	-2,87	-4,41
CC	0,13	-0,55	-0,01	-0,83	-0,92
R^2	93,2	90,1	97,7	83,70	83,30
Falta de ajuste (p-value)	0,67	0,79	0,59	0,27	0,27

Los resultados permiten concluir que la aplicación de la ingeniería de matrices utilizando la técnica de IV identificó al CFPI como una estructura alimentaria adecuada y efectivas, para permitir la incorporación de diversos componentes en los espacios intercelulares, contribuyendo a la generación de valor de la agrocadena de la Palma de Iraca, como producto mínimamente procesado. Por otro lado, la dinámica de la IV del CFPI está influenciada por las variables independientes seleccionadas (diámetro, T_1 , T_2) y por sus interacciones lineales. Se resalta, principalmente, que el proceso de IV del CFPI comporta una expansión volumétrica durante todo el proceso, la cual, finalmente, contribuye al proceso de transferencia de masa del líquido isotónico al interior de la estructura. La microestructura porosa del CFPI es muy compatible con el proceso de IV, permitiendo valores altos de X y Ee. Los resultados alcanzados son 100% satisfactorios para la proyección futura de incorporación de los componentes activos de interés seleccionados, para la continuación de la investigación. Por otro lado, se provee un buen resultado de la integración del proceso IV y liofilización, lo que fortalecerá, aún más, la generación de valor con productos innovadores que ofrecen potenciales beneficios a los consumidores.

Agradecimientos. Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y a la Universidad Nacional de Colombia, por la financiación del macroproyecto, que permitió el desarrollo de la presente investigación.

REFERENCIAS

- ASSIS, F.R.; RODRIGUES, L.G.G.; TRIBUZI, G.; DE SOUZA, P.G.; CARCIOFI, B.A.M.; LAURINDO, J.B. 2019. Fortified apple (*Malus* spp., var. Fuji) snacks by vacuum impregnation of calcium lactate and convective drying. LWT. 113:108298. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108298>
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. 1990. Official methods of analysis. 15th edition. Association of Official Analytical Chemists. Association of Official Analytical Chemist (Washington). 1298p.
- AYKIN-DINÇER, E. 2021. Application of ultrasound-assisted vacuum impregnation for improving the diffusion of salt in beef cubes. Meat Science. 176:108469. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108469>
- BECERRA, J.; ESCOBAR, R.; SERNA, Y. 2004. Estudio del cultivo bajo cubierta de cuatro especies vegetales de la huerta Chocoana en el municipio de Quibdó. Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó. 21:24-28.
- CHIRALT, A.; FITO, P.; BARAT, J.M.; ANDRÉS, A.; GONZÁLEZ MARTÍNEZ, C.; ESCRICHE, I.; CAMACHO, M.M. 2001.

- Use of vacuum impregnation in food salting process. *Journal Food Engineering*. 49:129-135. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00219-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00219-3)
6. CORTEZ-LATORRE, J.D.; FAICÁN, M.; PIROVANI, M.; PIAGENTINI, A. 2021. Improving fresh-cut apple quality and healthy potential-related attributes through mild vacuum impregnation process. *Journal of Food Processing and Preservation*. 45(12):e15995. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15995>
 7. DEROSI, A.; DE PILLI, T.; SEVERINI, C. 2012. The Application of vacuum impregnation techniques in food industry. En: Valdez, B. *Scientific, Health and Social Aspects of the Food Industry*. IntechOpen. p.26-56. <https://doi.org/10.5772/31435>
 8. DEROSI, A.; FRANCAVILLA, M., MONTELEONE, M.; CAPORIZZI, R.; SEVERINI, C. 2021. From biorefinery of microalgal biomass to vacuum impregnation of fruit. A multidisciplinary strategy to develop innovative food with increased nutritional properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 70:102677. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102677>
 9. DUARTE-CORREA, Y.; GRANDA-RESTREPO, D.; CORTÉS, M.; VEGA-CASTRO, O. 2020. Potato snacks added with active components: effects of the vacuum impregnation and drying processes. *Journal of Food Science and Technology*. 57:1523-1534. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04188-5>
 10. FITO, P.; PASTOR, R. 1994. Non-diffusional mechanism occurring during vacuum osmotic dehydration (VOD). *Journal of Food Engineering*. 21: 513-519. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90070-1)
 11. FITO, P. 1994. Modelling of vacuum osmotic dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*. 22:313-328. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90037-X)
 12. FITO, P.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A.; PARDO, P. 1996. Coupling of hydrodynamic mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems. *Journal of Food Engineering*. 27:229-240. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00005-4](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00005-4)
 13. GONZALEZ, CH.; FUENTES, C.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A.; FITO, P. 1999. Effectiveness of vacuum impregnation brining of Manchego-type curd. *International Dairy Journal*. 9:143-148.
 14. GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; CHAFER, M.; FITO, P.; CHIRALT, A. 2002. Development of salt profiles on Manchego type cheese during brining. Influence of vacuum pressure. *Journal of Food Engineering*, 53:67-63. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00141-8)
 15. JIMÉNEZ-MÉNDEZ, G.; GAMARRA-PÉREZ, A.; TRONCOSO-PALACIO, A. 2023. Aplicando control calidad en la manufactura de manteles individuales de palma de iraca. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*. 5(1):28-39. <https://doi.org/10.17981/bilo.5.1.2023.03>
 16. KRĘCISZ, M.; KOLNIAK-OSTEK, J.; ŁYCZKO, J.; STĘPIEŃ, B. 2023. Evaluation of bioactive compounds, volatile compounds, drying process kinetics and selected physical properties of vacuum impregnation celery dried by different methods. *Food Chemistry*. 413:135490. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135490>
 17. LE, D.; KONSUE, N. 2021. Mass transfer behavior during osmotic dehydration and vacuum impregnation of “phulae” pineapple and the effects on dried fruit quality. *Current Research in Nutrition and Food Science*. 9(1):308–319. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.9.1.29>
 18. LUO, W.; TAPPI, S.; PATRIGNANI, F.; ROMANI, S.; LANCIOTTI, R.; ROCCULI, P. 2019. Essential rosemary oil enrichment of minimally processed potatoes by vacuum-impregnation. *Journal of Food Science and Technology*. 56(10):4404–4416. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03935-y>
 19. MARCHETTI, M.D.; TOMAC, A.; YEANNES, M.I.; GARCIA LOREDO, A.B. 2022. Comprehensive analysis of vacuum application in desalting lean white fish to develop a highly acceptable ready-to-use product. *LWT*. 163:113527. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113527>
 20. MARTÍNEZ NAVARRETE, N.; ANDRÉS GRAU, A.; CHIRALT BOIX, A.; MAUPOEY, P.F. 1998. *Termodinámica y cinética de sistemas alimento y entorno*. Universidad Politécnica de Valencia. 374p.
 21. MIERZWA, D.; SZADZIŃSKA, J.; GAPIŃSKI, B.; RADZIEJEWSKA-KUBZDELA, E.; BIEGAŃSKA-MARECIK, R. 2022. Assessment of ultrasound-assisted vacuum impregnation as a method for modifying cranberries' quality. *Ultrasonics Sonochemistry*. 89:106117. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106117>
 22. MIERZWA, D.; SZADZIŃSKA, J.; RADZIEJEWSKA-KUBZDELA, E.; LENARTOWICZ, T. 2023. Effect of ultrasound on mass transfer during vacuum impregnation of low-porous food materials on the example of potato (*Solanum Tuberosum* L.). *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 188:109375. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109375>

23. NERI, L.; SANTARELLI, V.; DI MATTIA, C.D.; SACCHETTI, G.; FAIETA, M.; MASTROCOLA, D.; PITTIA, P. 2019. Effect of dipping and vacuum impregnation pretreatments on the quality of frozen apples: A comparative study on organic and conventional fruits. *Journal of Food Science*. 84(4):798-806. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14489>
24. OSSA MONTOYA, V.; GIL, M.; CORTÉS, M. 2023. Impregnación al vacío y sus parámetros operativos: una revisión. *Tecnológicas*. 26(56):e2605. <https://doi.org/10.22430/22565337.2605>
25. PANAYAMPADAN, A.S.; ALAM, M.S.; ASLAM, R.; KAUR, J. 2022. Vacuum impregnation process and its potential in modifying sensory, physicochemical and nutritive characteristics of food products. *Food Engineering Reviews*. 14(2):229-256. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09312-4>
26. PANDISELVAM, R.; TAK, Y.; OLUM, E.; SUJAYASREE, O.J.; TEKĞÜL, Y.; ÇALIŞKAN KOÇ, G.; KAUR, M.; NAYI, P.; KOTHAKOTA, A.; KUMAR, M. 2022. Advanced osmotic dehydration techniques combined with emerging drying methods for sustainable food production: Impact on bioactive components, texture, color, and sensory properties of food. *Journal of Texture Studies*. 53(6):737-762. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12643>
27. PAVIA, M.; TRUJILLO, A.J.; SENDRA, E.; GUAMIS, B.; FERRAGUT, V. 2000. Free fatty acid content of Manchego-type cheese salted by brine vacuum impregnation. *International Dairy Journal* 10:563-568. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(00\)00083-2](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(00)00083-2)
28. RAMÍREZ, N.; VEGA-CASTRO, O.; SIMPSON, R.; RAMIREZ, C.; NUÑEZ, H. 2021. Effect of pulsed vacuum and laser microperforations on the potential acceleration of chicken meat marination. *Journal of Food Process Engineering*. 44(3):e13627. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13627>
29. REZENDE ABRAHÃO, F.; GOMES CORRÊA, J.L. 2021. Osmotic dehydration: More than water loss and solid gain. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 63(17). <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1983764>
30. SALVATORI, D.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A.; FITO, P. 1998. THE Response of some properties of fruits to vacuum impregnation. *Journal of Food Process Engineering*. 21(1):59-73. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1998.tb00439.x>
31. SANTARELLI, V.; NERI, L.; MOSCETTI, R.; DI MATTIA, C.D.; SACCHETTI, G.; MASSANTINI, R.; PITTIA, P. 2021. Combined use of blanching and vacuum impregnation with trehalose and green tea extract as pre-treatment to improve the quality and stability of frozen carrots. *Food and Bioprocess Technology*. 14(7):1326-1340. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02637-8>
32. THAKUR, M.; MODI, V.K. 2020. Emerging technologies in food science. Focus on the developing world. Springer Singapore. 287. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-2556-8>
33. TOMAC, A.; RODRÍGUEZ MALLO, S.; PÉREZ, S.; GARCÍA LOREDO, A.; YEANNES, M.I. 2020. Salado húmedo de filetes de merluza mediante impregnación al vacío. *La Industria Cárnica Latinoamericana*. 215:56-61.

Caracterización de compost de residuos sólidos orgánicos urbanos de seis distritos de la provincia Leoncio Prado, Perú

Characterization of urban organic solid waste compost from six districts of the Leoncio Prado province, Peru

Emilio Anthony Ríos-Velasquez¹, Nelino Florida-Rofner^{*1}, Demetrio Angelo Lama-Isminio¹

¹Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Departamento de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua. Tingo María, Perú; e-mail: emilio.rios@unas.edu.pe; nelinof@hotmail.com; angelo.unas@gmail.com

*autor de correspondencia: nelinof@hotmail.com

Cómo citar: Ríos-Velasquez, E.A.; Florida-Rofner, N.; Lama-Isminio, D.A. 2023. Caracterización de compost de residuos sólidos orgánicos urbanos de seis distritos de la provincia Leoncio Prado, Perú. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2371. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2371>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: octubre 19 de 2022 **Aceptado:** abril 25 de 2023 **Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

En Perú, al 2019, solo el 6,4 % de los distritos disponen sus residuos urbanos en rellenos sanitarios, los cuales, están en situación de colapso, lo que exige buscar alternativas para mejorar la gestión de estos residuos y, frente a ello, el compostaje se perfila como una tecnología simple y económica, empleada para el tratamiento del componente orgánico, para reducir daños a la salud y al ambiente, sin embargo, la falta de criterios técnicos en su aplicación está afectando la calidad del compost final. El objetivo de esta investigación fue evaluar los criterios técnicos de procesamiento y la calidad del compost, a través de residuos sólidos urbanos en los distritos de la provincia Leoncio Prado. La investigación identificó los distritos que aplican el compostaje a sus residuos y evaluó la técnica de procesamiento, indicadores fisicoquímicos y determinó la calidad con base en normas técnicas internacionales. Los resultados muestran que seis de diez distritos aplican el compostaje y los indicadores fisicoquímicos contrastados con los criterios de calidad de la norma técnica chilena (NCH 2880), colombiana 5167 y de la OMS, corresponden a compost de calidad intermedia (Clase B). Los compost evaluados no representan riesgo ambiental y pueden ser utilizados como enmienda en la mejora del suelo y los cultivos con algunas restricciones, por presentar valores elevados de humedad, pH y bajos niveles de P, Ca, Mg y K.

Palabras clave: Abonos orgánicos; Calidad compost; Caracterización fisicoquímica; Residuos domésticos; Tratamiento de desechos orgánicos.

ABSTRACT

At 2019, in Peru, only 6.4 % of the districts dispose of their urban waste in sanitary landfills, which are in a situation of collapse, therefore is needed looking for alternatives to improve the management of this waste, facing this, composting is emerging as a simple and economical technology used for the treatment of the organic component, thus, reducing damage to health and the environment, however, the lack of technical criteria in its application is affecting the quality of the final compost. The objective of this research was to evaluate the technical criteria for processing and the quality of compost based on municipal solid waste in the districts of Leoncio Prado province. The research identified the districts that apply composting to their waste and evaluated the processing technique, physicochemical indicators and determined the quality based on international technical standards. The results show that six out of ten districts apply composting, and the physicochemical indicators contrasted with the quality criteria of the Chilean technical standard (NCH 2880), Colombian 5167 and WHO, correspond to intermediate quality compost (Class B). The evaluated compost does not represent an environmental risk and can be used as an amendment in soil and crop improvement with some restrictions, since it has high moisture, pH and low levels of P, Ca, Mg and K.

Keywords: Compost quality; Domestic waste; Organic fertilizers; Organic waste treatment; Physicochemical characterization.

INTRODUCCIÓN

Las estadísticas del Ministerio del Ambiente MINAM (2021) del Perú reportan que la generación de residuos sólidos municipales al 2021 alcanzan las 8.214.355,9 t y solo el 54,94 % de estos residuos son dispuestos en rellenos sanitarios que, a su vez, presentan deficiencias en su funcionamiento y se encuentran en situación de colapso. Los residuos sólidos orgánicos municipales representan el 69,03 % del total de residuos sólidos generados (Quillos Ruiz *et al.* 2018) y su tratamiento, a través del compostaje, es realmente una alternativa viable y segura (Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020).

El compostaje es la tecnología más empleada para tratar los residuos sólidos orgánicos urbanos; no obstante, su implementación es deficiente (Oviedo-Ocaña *et al.* 2017), a pesar de ser sencilla, económica y con capacidad de aprovechar diversos residuos biodegradables que, usualmente, se convierten en contaminantes (Florida Rofner & Reategui Díaz, 2019; Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020). Este tipo de tratamiento genera empleos, ingresos monetarios, emprendimientos rentables y sostenibles, reducción del volumen de los residuos dispuestos en rellenos sanitarios al transformar los residuos orgánicos en un producto utilizable en la agricultura (Widman Aguayo *et al.* 2005; Huamaní Montesinos *et al.* 2020); sin embargo, el compost producido a base de residuos orgánicos urbanos genera debate respecto a su aplicación, por los posibles daños al suelo y a los cultivos por presencia de metales pesados y microorganismos patógenos (Rosal *et al.* 2007).

La provincia de Leoncio Prado del Perú tiene diez distritos en su jurisdicción geopolítica, de ellos, solo seis realizan el tratamiento de sus residuos orgánicos, a través del compostaje, el resto deposita sus residuos al río Huallaga, principal fuente hídrica de la región (Florida Rofner & Reategui Díaz, 2019), por lo que el estudio de la técnica de procesamiento, de caracterización y de determinación de la calidad del compost, permitirá optimizar la aplicación del

compostaje, como técnica de tratamiento de los residuos sólidos orgánicos municipales.

En este contexto, la investigación planteó como objetivo determinar los criterios técnicos de procesamiento y la calidad del compost, a base de residuos sólidos orgánicos urbanos en los distritos de la provincia Leoncio Prado, región Huánuco-Perú.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación. La investigación se desarrolló entre diciembre del 2021 a mayo de 2022, en los distritos de Padre Felipe Luyando, Pucayacu, José Crespo y Castillo, Rupa Rupa, Mariano Damazo Beraun y Castillo Grande, todos pertenecientes a la provincia de Leoncio Prado, que utilizan el compostaje como técnica para el tratamiento a los residuos sólidos orgánicos recolectados en su jurisdicción; políticamente, la provincia de Leoncio Prado pertenece a la región Huánuco.

Características agroclimáticas. Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI (2021), Leoncio Prado presenta régimen climático bimodal con medias de 24,5 °C de temperatura, 84 % de humedad relativa y 3.400 mm de precipitación; régimen seco (junio a septiembre) y régimen lluvioso (octubre a mayo). Además, de acuerdo con Holdridge (2000), el área se clasifica como bosque muy húmedo- Premontano Sub Tropical (bmh-PST) y según Pulgar Vidal (2014), se clasifica como ecorregión Rupa Rupa.

Características sociales. En la tabla 1, se muestra la población de los distritos y proyecta la generación de residuos con base en la generación diaria per cápita de la región Huánuco, de 0,7 kg hab⁻¹ día⁻¹ (MINAM, 2021). Además, los distritos con mayor población son los que están realizando el compostaje.

Tabla 1. Población distrital de la Provincia de Leoncio Prado, Perú, al 2017 y la generación de residuos estimada por distritos.

Distritos	Población	Producción de residuos estimada (kg)	Aplican compostaje
Rupa-Rupa*	51 415	35 990,50	Si
Daniel Alomía Robles	7 965	5 575,50	No
Hermilio Valdizán	4 042	2 829,40	Si
José Crespo y Castillo*	25 256	17 679,20	Si
Padre Felipe Luyando*	10 020	7 014,00	Si
Mariano Damazo Beraún*	9 379	6 565,30	Si
Pucayacu*	4 762	3 333,40	No
Castillo Grande*	13 332	9 332,40	Si
Pueblo Nuevo	5 712	3 998,40	No
Santo Domingo de Anda	3 745	2 621,50	No
Leoncio Prado	153 628	9 436,60	

*distritos evaluados; Fuente: Adaptado de INEI (2022).

Descripción del manejo aplicado en el proceso de compostaje.

Se visitaron los 10 distritos que conforman la provincia y se identificaron seis distritos que aplican la técnica del compostaje, entre ellos: Rupa Rupa (RR), José Crespo y Castillo (JCC), Padre Felipe Luyando (PFL), Mariano Dámaso Beraun (MDB), Castillo Grande (CG) y Pucayacu (PU). Con estos distritos, se realizaron las coordinaciones con los responsables (Gerentes de área) para visitar las plantas de procesamiento y se registró: descripción de la tecnología aplicada, los periodos de volteo y los tiempos de compostaje.

Determinación de indicadores fisicoquímicos. Se realizó el muestreo en pilas previamente compostadas, tamizadas y antes de ser colocadas en costales de 50 kg para su almacenamiento o distribución en cada distrito seleccionado. Se extrajeron cuatro muestras al azar y se colocaron en bolsas herméticas, las cuales, se enviaron al Laboratorio de suelos, agua y ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, para los análisis correspondientes. Se evaluaron indicadores físicos: % de cenizas por calcinación y % de humedad por método gravimétrico. Indicadores químicos: pH, por método electrométrico; contenido de materia orgánica a base seca, por el método de digestión ácida (Walkley & Black, 1934); el fósforo (P_2O_5), por Metavanadato y lectura en espectro UV-Visible; nitrógeno (N), con el método Kjendhal; Ca, Mg, K y Na, por acetato de amonio y lectura en espectrofotómetro de absorción atómica (EAA), además, los metales Cu, Fe, Mn y Zn, por extracción con solución nítrico perclórico 4:1 y lectura en EAA (método EPA 200.7-1994), protocolos descritos en Bazán Tapia (2017).

Calidad de compost. La investigación tomó como criterios de contraste los lineamientos y rangos de la Norma oficial chilena NCH 2880 (INN, 2004), la norma técnica colombiana NTC 5167 (ICONTEC, 2011) y, en el caso de los micronutrientes, se contrastó con la Norma Técnica Española, Real Decreto 824 (Ministerio de la Presidencia, 2005).

Análisis estadístico. El estudio se ajustó estadísticamente a un diseño completamente aleatorizado DCA, en donde los tratamientos lo constituyen los seis distritos que producen compost, con tamaño muestral $n= 24$ (cuatro muestras por distrito). Los datos se sometieron al análisis de varianza y la prueba post-hoc de Tukey, con un nivel de confianza del 95 %, para la comparación de medias de indicadores fisicoquímicos entre los compost evaluados. Para el procesamiento se utilizó el software IBM-SPSS 25.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Criterios técnicos aplicados en el proceso de compostaje. La tabla 2 muestra los distritos que aplican el compostaje como técnica para el tratamiento de los residuos orgánicos de su respectiva jurisdicción. Además, de la verificación en campo y en coordinación con los responsables de las plantas de compostaje, se revisaron los registros del periodo de volteo, el tiempo de compostaje y aplicación de microorganismos eficientes (EM).

Todos los distritos aplican EM, preparados artesanalmente en las respectivas plantas y aplicadas en dosis aproximadas de 5-10 L de

Tabla 2. Criterios técnicos de procesamiento aplicados según distritos evaluados de la Provincia de Leoncio Prado, Perú.

Distrito	Tecnología aplicada		Criterio de volteo			Tiempo de compostaje (días)
	Volumen de pila (M^3)	Tradicional + EM	Ma/Me	Nº veces	Periodicidad (días)	
Padre Felipe Luyando (Naranjillo)	5	Si	Ma	7	10	75
Pucayacu	5	Si	Ma	7	15	120
José Crespo y Castillo (Aucayacu)	7	Si	Ma	7	12	90
Rupa Rupa (Tingo María)	25	Si	Me	6	20	120
Mariano Dámaso Beraún (Las Palmas)	5	Si	Ma	7	12	90
Castillo Grande	7	Si	Ma	12	4	50

EM = microorganismos eficientes, Ma/Me= manual/mecánico.

EM activado/pila, en tres momentos (inicio, intermedio y previo al enfriamiento), aspecto que requiere mayores estudios para determinar su dosificación, momento de aplicación y efecto sobre el tiempo de procesamiento y calidad del compost final.

La figura 1 muestra la relación entre el periodo de volteo y el tiempo de procesamiento del compost. El distrito Castillo Grande aplica el

periodo más corto de volteo y presenta el tiempo de procesamiento más corto; por el contrario, Rupa Rupa presenta el periodo más amplio de volteo y, consecuentemente, un mayor tiempo de procesamiento, por lo tanto, proyectando una línea de tendencia, se puede evidenciar una relación directamente proporcional entre el periodo de volteo y el tiempo de procesamiento.

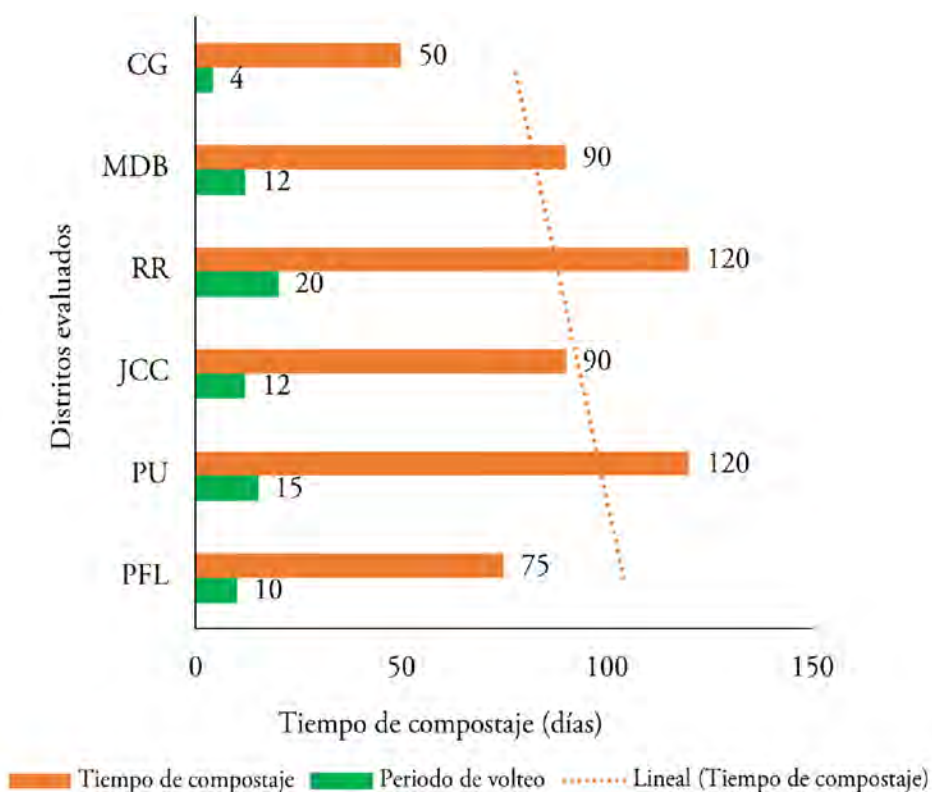


Figura 1. Valores de periodo de volteo y el tiempo de procesamiento del compost en Distritos evaluados de la Provincia de Leoncio Prado, Perú. PFL: Padre Felipe Luyando, PU: Pucayacu, JCC: José Crespo y Castillo, RR: Rupa Rupa, MDB: Mariano Dámaso Beraun, CG: Castillo Grande.

Estudios realizados por Florida Rofner & Reategui Díaz (2019) muestran periodos de volteos entre 5 a 6 días y el procesamiento duró 75 días, mientras que Bohórquez *et al.* (2015) emplearon un periodo de 7 días entre volteo y encontraron una mejor calidad del compost a los 90 días de procesamiento, por tanto, la relación identificada es contrastada con las referencias y es necesario abordar este tema con nuevas evaluaciones, para optimizar el tiempo de procesamiento, evitar mayores costos de procesamiento y mejorar la calidad del producto.

Indicadores físicos en compost final

Contenido de humedad. La figura 2 muestra los valores medios, la desviación estándar, la prueba post-hoc de Tukey y las diferencias estadísticas entre los compost producidos en los diferentes distritos. Además, se comparan los valores medios con los rangos límites de compost de alta calidad (clase A) y de calidad media (clase B), establecido en la NCH 2880 (INN, 2004).

Los resultados muestran diferencias estadísticas entre los compost evaluados para el indicador humedad y corresponden a compost de clase A, para los distritos PFL, JCC y RR y, en la clase B, para PU, MDB y CG. Ambos grupos están dentro del rango de un compost que se puede aplicar en la agricultura, Sin embargo, Bohórquez *et al.* (2015) advierten correlación negativa con la mayoría de

los nutrientes, entre ellos, N, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn, lo que evidencia la importancia del control de la humedad para obtener un compost de alta calidad, además, el exceso de humedad tiene repercusión directa sobre el potencial fertilizante de un compost, que compromete el peso del producto y puede afectar los cálculos de la cantidad efectiva a aplicar por unidad de área o número de plantas (Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020). Por ello, Se sugiere disminuir a menos del 20 % el contenido de humedad, a través de tratamientos adicionales, como solarización (Bohórquez *et al.* 2015), en condiciones controladas para deshidratar y quitar humedad al producto final antes de ser utilizado en campo o, en su defecto, reducir los periodos de volteos de las pilas compostadas.

En este trabajo, los contenidos de humedad están dentro de las exigencias de la NCH 2880 (INN, 2004) y son valores típicos en la mayoría de los reportes, entre ellos, el de Bohórquez *et al.* (2015), quienes encontraron medias entre 36,4-44,30 %, o los de Bailón-Rojas & Florida-Rofner (2020), con valores medios de 32,28 %, por tanto, los resultados presentan valores típicos y solo los distritos de PU, MDB y en menor medida CG, requieren de tratamiento previo de deshidratación, para optimizar su aplicación y alcanzar la Clase A (<20 % de humedad), establecida por la NCH 2880 (INN, 2004).

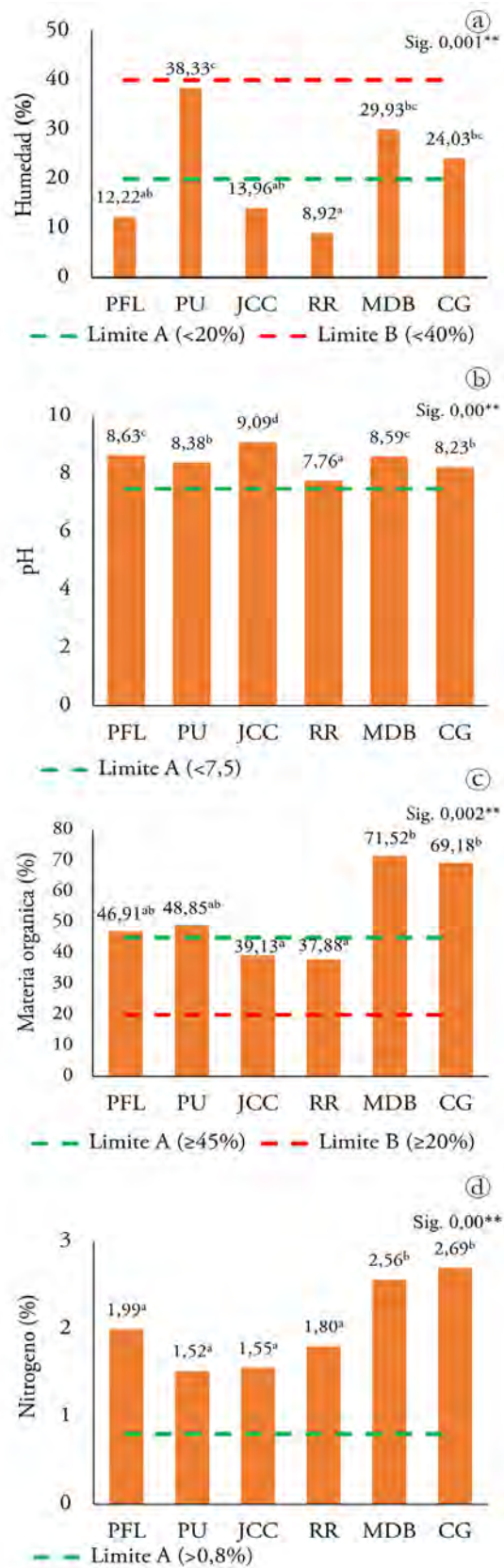


Figura 2. Valores de humedad, pH, MO y N en compost producidas en diferentes municipalidades de la Provincia de Leoncio Prado, Perú. PFL: Padre Felipe Luyando, PU: Pucayacu, JCC: José Crespo y Castillo, RR: Rupa Rupa, MDB: Mariano Dámaso Beraun, CG: Castillo Grande, Limite A: compost de alta calidad, Limite B: compost de mediana calidad, letras diferentes en la misma columna expresan diferencias estadísticas (Tukey; $p < 0,05$), Sig. significancia, ** altamente significativo.

Indicadores químicos en compost final

Potencial de hidrogeno (pH). La figura 2 muestra los valores medios de pH encontrados en el compost, según los distritos evaluados, además, el análisis post-hoc de Tukey para identificar los subgrupos homogéneos y las diferencias estadísticas entre distritos. También, se muestra el valor referencial de un compost de alta calidad “clase A”, según la NCH 2880 (INN, 2004).

Los valores de pH (7,76 a 9,09), se encuentran fuera del rango de un compost de alta calidad “Clase A”; por defecto, corresponde a un compost de calidad intermedia “clase B” y según la NCH 2880 (INN, 2004) presentaría algunas restricciones de uso. Además, el pH elevado, al parecer, es independiente al periodo de volteo y el tiempo de compostaje y más bien respondería a los materiales sometidos al proceso (García Céspedes *et al.* 2014; Barbaro *et al.* 2019; Florida Rofner & Reategui Díaz, 2019; Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020). También, es conocido que los valores de pH tienden a ser bajos al inicio e incrementar hacia el final del proceso, variando entre 4 a 9 (Román *et al.* 2013).

Los valores medios de pH corresponden a un nivel de ligeramente alcalino a alcalino en todos los distritos. Según Carrión *et al.* (2008), se debe a una menor concentración de iones intercambiables de hidrógeno y a una mayor concentración de calcio, magnesio y sodio; en este caso, el pH tiene gran influencia sobre la disponibilidad de los nutrientes, por ello, para alcanzar los valores recomendados por la NCH 2880 (INN, 2004) es necesario aplicar técnicas para corregir el pH, mediante la adición de azufre, sulfato ferroso, sulfato de aluminio u otros compuestos azufrados (Barbaro *et al.* 2019). Además, estos valores no solo se observan en compost a base de residuos municipales (García-Ramos *et al.* 2019), también se reportan en compost bajo otros residuos, como los encontrados en compost con base en la cáscara de cacao 8,1, estiércol de vacuno 8,33 y plumas de pollo de 7,79 (Florida Rofner & Reategui Díaz, 2019). En este contexto, los valores de pH encontrados requieren la aplicación de técnicas de corrección antes de ser utilizados como enmienda o sustrato.

Materia orgánica (MO) y Nitrógeno (N). La figura 2 muestra los valores medios de MO y N encontrados, según los distritos evaluados, además el análisis post-hoc de Tukey para identificar los subgrupos homogéneos y las diferencias estadísticas entre distritos. También, se muestra el valor referencial de un compost de alta calidad (Clase A) y calidad intermedia (Clase B), según la NCH 2880 (INN, 2004). Los valores de MO presentan diferencias altamente significativas, de ellos, los distritos JCC y RR se encuentran dentro del rango de un compost de calidad intermedia o Clase B y los valores de MO, para PFL, PU, MDB y CG, en el rango de clase A o alta calidad, según la NCH 2880 (INN, 2004); estos últimos presentarían algunas restricciones de uso. Los valores de N presentan diferencias altamente significativas, donde todos los distritos se encuentran dentro del rango de un compost de clase A o alta calidad; estos no presentarían restricciones de uso y muestran buen potencial como fertilizante.

La MO resulta de un proceso de descomposición en el que se transforman los residuos orgánicos a su forma inorgánica una vez alcanzado el máximo grado de descomposición; estos compuestos son altamente estables y de lenta degradación que, al ser aplicados al suelo, mejoran las condiciones fisicoquímicas y aportan carbono para mantener la biodiversidad del agroecosistema (Román *et al.* 2013); por ello, es importante resaltar que los compost evaluados están dentro de los valores exigidos y presentan valores similares a los reportados en compost a base de residuos sólidos urbanos (Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020) y a compost con otros residuos agrícolas (Hernández-Rodríguez *et al.* 2013) y pecuarios (Florida Rofner & Reategui Díaz, 2019); sin embargo, las diferencias encontradas entre los compost pueden estar relacionadas al volumen de la pila, el periodo entre volteos, la acción de los EM aplicados y el tiempo de compostaje y los valores bajos para los distritos JCC y RR se podrían mejorar aplicando estiércol de vacuno en un 20 %, como lo recomienda García-Ramos *et al.* (2019), quienes alcanzaron un nivel medio de 68,5 % de MO, con esta proporción.

El Nitrógeno es un macronutriente primario para la planta, debido a que está involucrado en todos los procesos principales de desarrollo y en la absorción de otros nutrientes (Román *et al.* 2013). La concentración de N es muy importante en el compost; en cierta medida define su potencial para ser usado como una enmienda, por ello, la NCH 2880 (INN, 2004) exige valores de N total $\geq 0,8$ %, aunque, para Román *et al.* (2013) y la NTC 5167 (ICONTEC, 2011) un compost ideal debe tener medias >1 % de N, a base seca.

Los valores encontrados superan las exigencias de las normas técnicas y son valores similares en comparación con los resultados de Bailón-Rojas & Florida-Rofner (2020), quienes reportan medias de 1,43 % de N en compost producidas en el distrito de Rupa Rupa-Huánuco. Además, los resultados son similares en comparación con compost a base de otros residuos que se generan en la agricultura, como escobajo de palma, con 1,84 %, residuos de plátano, con 1,21 %, cáscaras de cacao, con 0,92 %, pulpa de café, con 1,92 % (Florida-Rofner *et al.* 2020) y en rastrojos de caña de azúcar, con 0,92 a 1,19 % (Pérez Méndez *et al.* 2011); sin embargo, ninguno de estos valores logra alcanzar lo reportado por Florida Rofner & Reategui Díaz (2019), quienes reportan un 4,8 % de N en pilas con 30 % de plumas de pollo y 70 % de estiércol de vacuno.

Niveles de fósforo (P). La figura 3 muestra los valores medios de P, según los distritos evaluados, además el análisis post-hoc de Tukey para identificar los subgrupos homogéneos y las diferencias estadísticas entre distritos. También, se muestra el valor referencial de un compost de alta calidad “Clase A”, según la NCH 2880 (INN, 2004). Los valores de P presentan diferencias altamente significativas y varían entre 0,89 a 1,51 %, donde todos los distritos se encuentran dentro del rango de un compost de clase A o alta calidad, no presentarían restricciones de uso y se pueden aplicar como enmienda en la agricultura, excepto los de PU, que corresponden a la clase B.

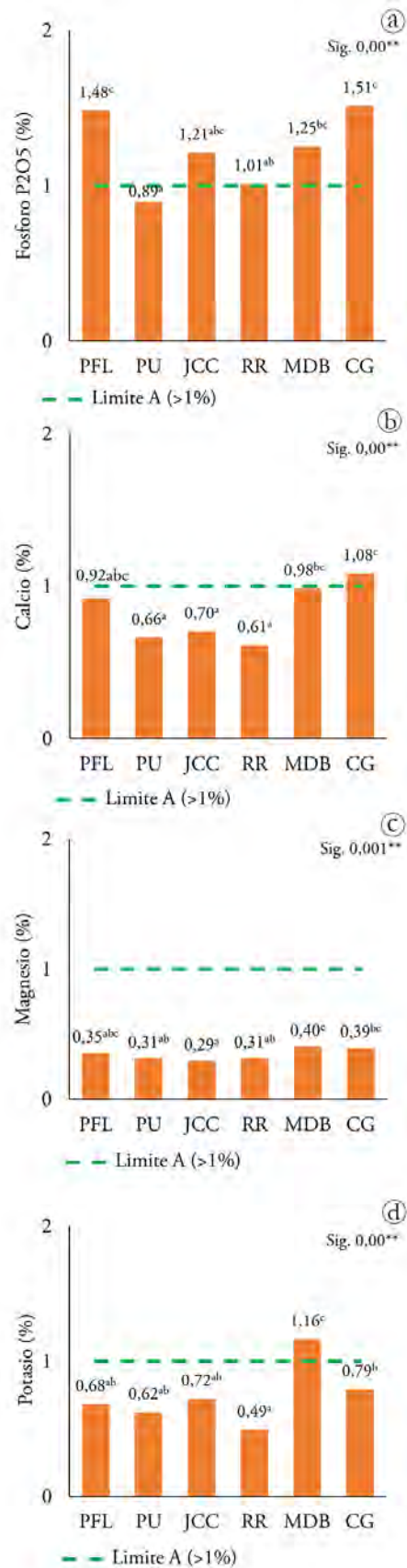


Figura 3. Niveles de P, Ca, Mg y K en compost producidas por diferentes municipalidades.

PFL: Padre Felipe Luyando, PU: Pucayacu, JCC: José Crespo y Castillo, RR: Rupa Rupa, MDB: Mariano Dámaso Beraun, CG: Castillo Grande, letras diferentes en la misma columna expresan diferencias estadísticas (p<0,05), Sig. significancia, ** altamente significativo.

El P es el segundo macronutriente primario para la planta involucrado en procesos de transferencia de energía, por lo que es esencial en la fotosíntesis (Román *et al.* 2013). La concentración de P es muy importante en el compost, a pesar de que la NCH 2880 (INN, 2004) no exige valores límites de P; sin embargo, la NTC 5167 (ICONTEC, 2011) considera que un compost ideal debe tener medias >1 % a base seca y la OMS sugiere valores entre 0,30 a 1,80 % (Florida Rofner *et al.* 2021). En tal sentido, los resultados de P cumplen con las normas citadas y presentan valores similares a los reportados por Bailón-Rojas & Florida-Rofner (2020), quienes encontraron una media de 1,57 % de P₂O₅ en compost de residuos municipales, con aplicación de microorganismos eficientes. Según Florida Rofner *et al.* (2021), los resultados presentan mayores contenidos en P que un compost a base de residuos de plumas y estiércol de vacuno, con 0,35 %, de residuos de plátano, con 0,44 % y de cáscara de cacao, con 0,03 %, pero menores a los compost con base en la pulpa de café, con 1,58 % y escobajo de palma, que tiene con 2,13 %.

Niveles de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K). La figura 3 detalla los valores medios de Ca, Mg y K, según los distritos evaluados, además el análisis post-hoc de Tukey, para identificar los subgrupos homogéneos y las diferencias estadísticas entre distritos. También, se muestra el valor referencial de un compost de alta calidad (Clase A), según la NCH 2880 (INN, 2004). Los valores de Ca presentan diferencias altamente significativas y varían entre 0,61 a 1,08 %; todos los distritos se encuentran por debajo del rango de un compost de clase A (>1%), excepto CG. También, los contenidos de Mg presentan diferencias altamente significativas y varían entre 0,29 a 0,40 %; los distritos no alcanzan el rango de clase A y, en el caso del K, los valores presentan diferencias altamente significativas y varían entre 0,49 a 1,16 %; para este indicador todos los distritos se encuentran por debajo del rango de un compost de clase A, excepto MDB. En general, estos no presentarían restricciones de uso y se pueden aplicar como enmienda en la agricultura.

El Ca es un macronutriente secundario y es un componente estructural importante de las células vegetales, relacionada directamente con el crecimiento de la raíz y la calidad de los frutos. Su deficiencia provoca trastornos en la raíz, hojas, tamaño de frutos y rajado de frutos (Román *et al.* 2013). Además, altas concentraciones en los suelos indica pH neutro deseable para la mayoría de los cultivos, es común encontrar deficiencias en condiciones de suelos ácidos, por ello, es conveniente mantener o mejorar los niveles de Ca para una buena nutrición y control de elementos tóxicos, como Al, en suelos ácidos y Na, en suelos alcalinos (Strawn *et al.* 2019).

Los resultados de Ca muestran que solo el distrito de CG presenta un valor medio >1 %, lo que corresponde a un compost de alta calidad, el resto no logra alcanzar esta cifra exigida por la NCH 2880 (INN, 2004). Son valores típicos encontrados en compost a base de residuos urbanos, entre ellos. Barbaro *et al.* (2019) encontraron una media de 0,87 %, pero estos valores podrían mejorar si se combinan con otros residuos; Florida Rofner *et al.* (2021) sugieren el uso de pulpa de café y escobajo de palma, ya que el compost de estos residuos logra alcanzar medias de 3,15 y 2,90 % de Ca, respectivamente.

Respecto al Mg es un macronutriente secundario componente básico de la clorofila y está involucrado directamente en el proceso de fotosíntesis, metabolismo de glucídico y activación de enzimas, que intervienen en la síntesis de los ácidos nucleicos y proteínas en la planta (Reyes Alemán *et al.* 2017), por ello, su concentración en niveles mayores a 1 % es exigida por la NCH 2880 (INN, 2004). En ningún caso, los compost evaluados alcanzaron este valor, por lo cual, corresponderían a compost de calidad intermedia o clase B, con una media relativamente baja; sin embargo, las referencias presentan valores muy variables en compost con base en el mismo tipo de residuo urbano, como el reportado por Bailón-Rojas & Florida-Rofner (2020), de 1,17 %. Este valor de Mg se podría mejorar combinando el residuo urbano con pulpa de café y escobajo de palma, para alcanzar valores entre 0,89 y 0,97 (Florida Rofner *et al.* 2021).

El K es un macronutriente primario, juega un papel vital en la síntesis de carbohidratos, proteínas y forma parte de la estructura vegetal; es responsable de la tolerancia a sequías, heladas, salinidad y resistencia al ataque de enfermedades (Román *et al.* 2013). De acuerdo con la NCH 2880 (INN, 2004), el distrito MDB es el único compost que supera el valor límite de un compost de alta calidad, el resto corresponde a calidad intermedia; sin embargo, los valores encontrados son bajos en comparación a los 4,47 de K, reportados por Bailón-Rojas & Florida-Rofner (2020).

En general, los valores de Ca, Mg y K son relativamente bajos y corresponden a compost de calidad media, excepto para Ca en compost de CG y K en MDB. Los resultados son típicos para compost a base de residuos urbanos y si bien la NCH 2880 (INN, 2004) exige valores mayores a 1 %, esto no afectaría su potencial uso en la agricultura y según Florida Rofner *et al.* (2021), los niveles de estos macronutrientes se podrían mejorar combinando los residuos urbanos con residuos de cosecha de la región, como la pulpa de café y escobajo de palma, para mejorar Ca, Mg y K y, residuos de plátano, para mejorar el K.

Niveles de micronutrientes cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn). En la figura 4, se presentan los valores medios de Cu, Zn, Fe, y Mn, de los distritos evaluados, además el análisis post-hoc de Tukey, para identificar los subgrupos homogéneos y las diferencias estadísticas entre distritos. También, se muestra el valor referencial de un compost de alta calidad (Clase A), según la NCH 2880 (INN, 2004).

Los valores de Cu no presentan diferencias significativas; sin embargo, los contenidos de Fe, Zn y Mn presentan diferencias altamente significativas y todos los compost evaluados están dentro del rango de clase A. En general, estos son valores bajos y no presentarían restricciones de uso y se pueden aplicar como enmienda en la agricultura.

El Cu, Fe, Zn y Mn son micronutrientes requeridos en cantidades muy pequeñas, pero importantes para el metabolismo vegetal y animal (Román *et al.* 2013). Por ello, es importante que los valores medios en un compost, según la NCH 2880 (INN, 2004), no debe

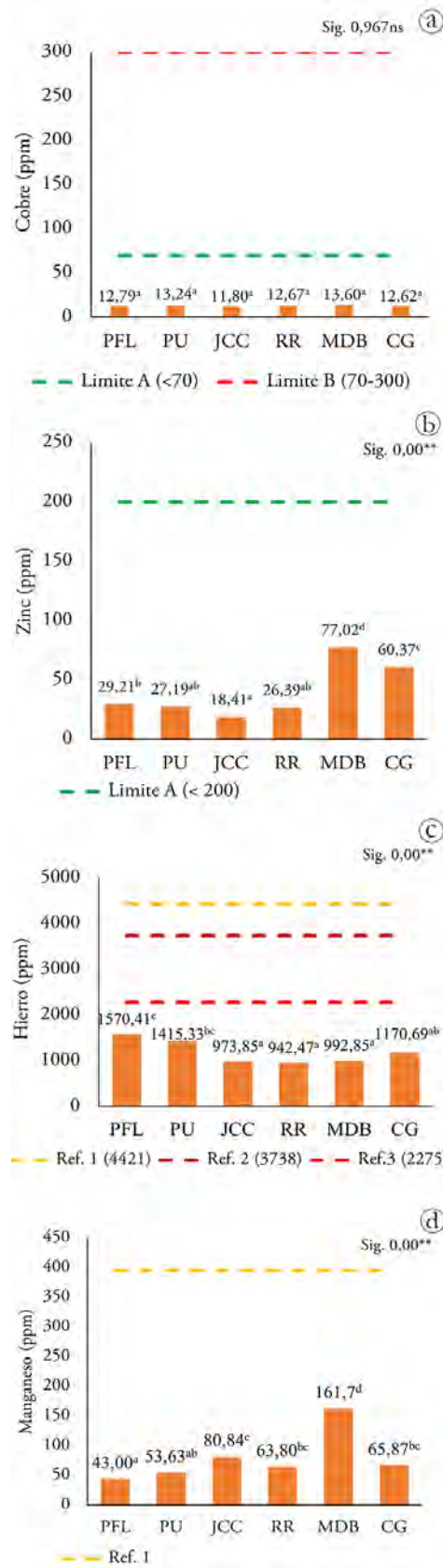


Figura 4. Concentración de Cu, Zn, Fe y Mn en compost producidas por diferentes municipalidades. PFL: Padre Felipe Luyando, PU: Pucayacu, JCC: José Crespo y Castillo, RR: Rupa Rupa, MDB: Mariano Dámaso Beraun, CG: Castillo Grande. Letras diferentes en la misma columna expresan diferencias estadísticas ($p < 0,05$), Sig. significancia, ns: no significativo.

superar valores de 70 y 200 ppm para Cu y Zn y para el caso de Fe y Mn, se utilizan otros resultados como referencia, toda vez que la NCH 2880 (INN, 2004) y las demás normas técnicas, como la NTC 5167 (ICONTEC, 2011) y el Real Decreto Español 824, no contemplan rangos para estos micronutrientes, por ello, los resultados son comparados con los reportes de Florida Rofner & Reategui Díaz (2019) y Bailón-Rojas & Florida-Rofner (2020). Para el Hierro, en todos los casos los resultados presentan valores menores a estas referencias.

El compost producido a base de residuos orgánicos urbanos genera debate respecto a su aplicación por los posibles daños al suelo y a los cultivos por presencia de micronutrientes o metales pesados que, en elevadas concentraciones, pueden afectar negativamente los agroecosistemas (Rosal *et al.* 2007). Estos resultados demuestran que los compost de este tipo cumplen las normativas y son similares a los niveles reportados para compost a base de residuos urbanos (Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020) y son menores a otros residuos compostados (Bohórquez *et al.* 2015; Jacobo Salcedo *et al.* 2017; Alvarez-Vera *et al.* 2019; Florida Rofner & Reategui Díaz, 2019).

Calidad del compost. El contraste de los indicadores físicos, macronutrientes y micronutrientes, con la NCH 2880 (INN, 2004), la NTC 5167 (ICONTEC, 2011) y el Real Decreto Español 824, corresponden a clase B, que representa a compost de calidad intermedia. Esta determinación, se debe a valores elevados de pH, que supera los 7,5 (8,23 a 9,09) y a los bajos niveles de Ca, Mg y K, que no superan el 1 % exigido, excepto K, en MDB y los niveles de Ca, en CG, aspecto que comprometen el potencial como fertilizante de los compost evaluados.

En este contexto, los compost presentarían algunas restricciones de uso y teniendo en cuenta que la calidad final de un compost está vinculada a la composición de los residuos compostados (Ramos Agüero & Terry Alfonso, 2014; Florida Rofner & Reategui Díaz, 2019; García-Ramos *et al.* 2019) es necesario aplicar medidas correctivas antes de su procesamiento o aplicación en la agricultura, de acuerdo con las referencias consultadas estas consistirían en: a) solarización en condiciones controladas, para disminuir el contenido de humedad antes de ser utilizado en campo (Bohórquez *et al.* 2015); b) corrección del pH mediante la adición de azufre, sulfato ferroso, sulfato de aluminio u otros compuestos azufrados (Barbaro *et al.* 2019) y c) mejorar los macronutrientes combinando los residuos urbanos con residuos agroindustriales, entre ellos, plumas de pollo broiler, para elevar los niveles de N (Florida Rofner & Reategui Díaz, 2019), pulpa de café y escobajo de palma, para elevar los niveles de P, Ca y Mg y residuos de plátano, para elevar el K (Florida Rofner *et al.* 2021).

En general, el trabajo encontró seis distritos que utilizan el compostaje como técnica para tratar sus residuos orgánicos con aplicación de microorganismos eficientes y volteo de pilas en concentraciones y periodos variables, que repercute en el tiempo total de compostaje. Los indicadores fisicoquímicos presentaron diferencias altamente significativas entre los compost evaluados para humedad, pH, MO, N, P, Ca, Mg, K, Zn, Fe y Mn, excepto

el Cu; sin embargo, todos los compost son de calidad B o calidad intermedia, de acuerdo con los criterios de calidad de la NCH 2880 (INN, 2004), NTC 5167 (ICONTEC, 2011) y de la OMS, por lo cual, presentan algunas restricciones de uso al presentar valores elevados de humedad y pH y bajos niveles de P, Ca, Mg y K, sin que esto los descalifique para ser utilizados como enmienda en la mejora del suelo y los cultivos

Agradecimientos. A la Universidad Nacional Agraria de la Selva por su colaboración parcial y disposición para la ejecución de la propuesta de investigación. **Conflictos de intereses:** El artículo fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución autores:** Emilio Anthony Ríos-Velásquez y Demetrio Angelo Lama-Isminio realizaron los trabajos de campo, obtención y análisis formal de los datos para la escritura del borrador del manuscrito. Nelino Florida Rofner contribuyó con la asesoría de la investigación, la contextualización, la metodología, revisión y redacción del manuscrito. Todos los autores participaron en la redacción, revisión, edición del manuscrito y aprueban la versión final. **Financiación:** Este estudio fue financiado parcialmente con recursos del Fondo de Desarrollo Universitario (FEDU) asignados al presupuesto de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, para promover la Investigación Docente.

REFERENCIAS

1. ALVAREZ-VERA, M.; LARGO, A.; IGLESIAS-ABAD, S.; CASTILLO, J. 2019. Calidad de compost obtenido a partir de estiércol de gallina, con aplicación de microorganismos benéficos. *Scientia Agropecuaria*. 10(3):353-361. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.03.05>
2. BARBARO, L.; KARLANIAN, M.; RIZZO, P.; RIERA, N. 2019. Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos. *Chilean Journal of Agriculture & Animal Sciences*. 35(2):126-136. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000309>
3. BAILÓN-ROJAS, M.R.; FLORIDA-ROFNER, N. 2020. Caracterización y calidad de los compost producidos y comercializados en Rupa Rupa-Huánuco. *Enfoque UTE*. 12(1):1-11. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.644>
4. BAZÁN TAPIA, R. 2017. Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. INIA. Lima, Perú. 89p.
5. BOHÓRQUEZ, A.; PUENTES, Y.J.; MENJIVAR, J.C. 2015. Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*. 15(1):73-81. http://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:398

6. CARRIÓN, C.; ABAD, M.; FORNES, F.; NOGUERA, V.; PUCHADES, R.; MAQUIEIRA, A.; BOTELLA, S.; GARCÍA, R. 2008. Acidification of composts from agricultural wastes to prepare nursery potting mixtures. *Acta Horticulturae*. 779:333-340. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.779.41>
7. FLORIDA ROFNER, N.; REATEGUI DÍAZ, F. 2019. Compost a base de plumas de pollos (*Gallus domesticus*). *Livestock Research for Rural Development*. 31:11.
8. FLORIDA-ROFNER, N.; LEVANO-CRISOSTOMO, J.D.; JACOBO-SALINAS, S. 2020. Effect of feather compost on soil chemical indicators in CCN-51 cocoa plantation (*Theobroma cacao* L.). *Producción + Limpia*. 15(1):25-34. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a2>
9. FLORIDA ROFNER, N.; LEVANO CRISOSTOMO, J.D.; TRIGOSO BECERRIL, D. 2021. Plumasy residuos locales una alternativa para mejorar la calidad del compost y suelos en el trópico peruano. Editorial Eidec. Colombia. 64p. <https://doi.org/10.34893/8pf7-7h61>
10. GARCÍA-RAMOS, C.; AROZARENA-DAZA, N.J.; MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, F.; HERNÁNDEZ-GUILLÉN, M.; PASCUAL-AMARO, J.Á.; SANTANA-GATO, D. 2019. Obtención de compost mediante la biotransformación de residuos de mercados agropecuarios. *Cultivos Tropicales*. 40(2):e02.
11. GARCÍA CÉSPEDES, D.; LIMA CAZORLA, L.; RUÍZ GUTIÉRREZ, L.; CALDERÓN PEÑALAVAR, P. 2014. Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de fincas. *Medio Ambiente y Desarrollo*. 14(26).
12. HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, O.A.; HERNÁNDEZ-TECORRAL, A.; RIVERA-FIGUEROA, C.; ARRAS-VOTA, A.M.; OJEDA-BARRIOS, D. 2013. Calidad nutrimental de cuatro abonos orgánicos producidos a partir de residuos vegetales y pecuarios. *Terra Latinoamericana*. 31(1):35-46.
13. HOLDRIDGE, L.R. 2000. Ecología basada en zonas de vida. Quinta reimpresión. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) San José, Costa Rica. 216p.
14. HUAMANÍ MONTESINOS, C.; TUDELA MAMANI, J.W.; HUAMANÍ PERALTA, A. 2020. Gestión de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca - Puno - Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*. 22(1):106-115. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2020.541>
15. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. 2011. Norma técnica colombiana 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Segunda actualización. ICONTEC. Colombia. 10p.
16. INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - INN. 2004. Norma oficial chilena 2880 (NCH 2880). Norma Chilena de Calidad de Compost. INN. Chile. 27p.
17. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA - INEI. 2022. Estadísticas de población y vivienda según departamento. <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/poblacion-y-vivienda/>
18. JACOBO SALCEDO, M.D.R.; FIGUEROA VIRAMONTES, U.; MACIEL TORRES, S.P.; LÓPEZ ROMERO, L.L.; MUÑOZ VILLALOBOS, A. 2017. Elementos menores en composta producida a partir de estiércol de engorda y rastrojo de maíz. *Agrofaz*. 17(2):61-71.
19. MINISTERIO DEL AMBIENTE - MINAM. 2021. Estadística ambiental. Sistema nacional de información ambiental-SINIA. Disponible desde Internet en: <https://sinia.minam.gob.pe/informacion/tematicas?tematica=08>
20. MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA. 2005. Real decreto 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes. Boletín Oficial del Estado BOE-A-2005-12378. España. 78p. Disponible desde Internet en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2005/07/08/824>
21. OVIEDO-OCAÑA, E.R.; MARMOLEJO-REBELLON, L.F.; TORRES-LOZADA, P. 2017. Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. *Lecciones desde Colombia. Ingeniería Investigación y Tecnología*. 18(1):31-42.
22. PÉREZ MÉNDEZ, M.A.; SÁNCHEZ HERNÁNDEZ, R.; PALMA LÓPEZ, D.L.; SALGADO GARCÍA, S. 2011. Caracterización química del compostaje de residuos de caña de azúcar en el sureste de México. *Interciencia*. 36(1):45-52.
23. PULGAR VIDAL, J. 2014. Las ocho regiones naturales del Perú. *Terra Brasilis*. 3. <https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.1027>
24. QUILLOS RUIZ, S.A.; ESCALANTE ESPINOZA, N.J.; SÁNCHEZ VACA, D.A.; QUEVEDO NOVOA, L.G.; DE LA CRUZ ARAUJO, R.A. 2018. Residuos sólidos domiciliarios: caracterización y estimación energética para la ciudad de Chimbote. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 84(3):322-335.
25. RAMOS AGÜERO, D.; TERRY ALFONSO, E. 2014. Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Cultivos Tropicales*. 35(4):2-59.

26. REYES ALEMÁN, M.D.R.; FRANCO MORA, O.; MORALES ROSALES, E.J.; PÉREZ LÓPEZ, D.D.J. 2017. Influencia del magnesio y zinc en la altura de planta y verdor de hojas en *Lilium*. *Investigación y Ciencia*. 25(70):31-37.
27. ROMÁN, P.; MARTÍNEZ, M.M.; PANTOJA, A. 2013. Manual de compostaje. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. Santiago de Chile, Chile. Disponible desde Internet en: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
28. ROSAL, A.; PÉREZ, J.P.; ARCOS, M.A.; DIOS, M. 2007. La incidencia de metales pesados en compost de residuos sólidos urbanos y en su uso agronómico en España. *Información tecnológica*. 18(6):75-82. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642007000600010>
29. SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ - SENAMHI. 2021. Descarga de datos meteorológicos a nivel nacional. Disponible desde Internet en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>
30. STRAWN, D.G.; BOHN, H.L.; O'CONNOR, G.A. 2019. Soil chemistry. Quinta edición. Editorial Wiley-Blackwell. 356p.
31. WALKLEY, A.; BLACK, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*. 37(1):29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
32. WIDMAN AGUAYO, F.; HERRERA RODRÍGUEZ, F.; CABAÑAS VARGAS, D.D. 2005. El uso de composta proveniente de residuos sólidos municipales como mejorador de suelos para cultivos en Yucatán. *Estudios preliminares. Ingeniería*. 9(3):31-38.

Captadores de niebla y recolección de agua en un ecosistema de páramo colombiano

Fog catchers and water collection in a Colombian paramo ecosystem

Colectores de niebla en un páramo andino

Francisco Cortés-Pérez^{1*}; Oscar M. Roa-Casas¹; Carlos Andrés Villate-Suarez¹; David Ricardo Hernández-Velandia¹; Felipe Moreno-Mancilla¹; Laura L. Hernández-Pineda¹

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC, grupo de investigación Ecología de Bosques Andinos Colombianos (EBAC). Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: francisco.cortes@uptc.edu.co; oscarroa884@gmail.com; cavsoft@hotmail.com; davidhvel@gmail.com; felipemancilla@gmail.com; liliher12@hotmail.com

*autor de correspondencia: dcamargo@agrosavia.co

Cómo citar: Cortés-Pérez, F.; Roa-Casas, O.M.; Villate-Suarez, C.A.; Hernández-Velandia, D.R.; Moreno-Mancilla, F.; Hernández-Pineda, L.L. 2023. Captadores de niebla y recolección de agua en un ecosistema de páramo colombiano. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e1994. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.1994>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: junio 17 de 2021 **Aceptado:** abril 14 de 2023 **Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Los captadores de niebla son usados para interceptar agua contenida en la niebla y abastecer de agua a comunidades que habitan en lugares donde este recurso escasea. Se evaluó el uso de captadores de niebla para la captación de agua en un área ubicada en el páramo Pan de Azúcar, Duitama-Boyacá. Se instalaron 60 captadores de niebla, 24 de ellos, con dispositivos para medir los volúmenes de agua interceptados. Los volúmenes de agua captados, se midieron en periodos de 24 horas, por 26 días, durante un año y se usó el modelo geométrico para diferenciar el agua proveniente de la niebla. La precipitación registrada fue mayor a la reportada en la literatura. La precipitación mensual osciló entre 51 y 1198 mm y la temperatura media mensual entre los 6 y 8 °C. Los volúmenes de agua promedio colectados por los 24 captadores de niebla estuvieron entre los 0,02 Lm⁻² día⁻¹ hasta los 4,4Lm⁻² día⁻¹. Los aportes de agua provenientes de la niebla oscilaron entre los 0,02 y 1,77 mmdía⁻¹. La dirección del viento no afectó la captación de agua y aún se presenta incertidumbre al separar el aporte real de agua proveniente de la niebla a partir de la lluvia orográfica, lo cual, sigue siendo un desafío en los ecosistemas de páramo, por lo que se debe ampliar la investigación, para mejorar los diseños y las eficiencias de los captadores de niebla.

Palabras clave: Páramos andinos; Recursos de agua dulce; Redes atrapanieblas; Sistema de colecta de agua; Suministro de agua doméstica.

ABSTRACT

Fog collectors are used to intercept water contained in fog and supply water to communities that live in places where this resource is scarce. We evaluated the use of mist collectors to collect water in an area located in the Pan de Azúcar paramo, Duitama-Boyacá. We installed 60 mist collectors, 24 of them with devices to measure the volumes of water intercepted. The volumes of water captured were measured in periods of 24 hours for 26 days during one year and we used the geometric model to differentiate the water from the fog. The recorded precipitation was higher than that reported in the literature. Monthly rainfall ranged between 51 and 1198mm and mean monthly temperature ranged between 6 and 8°C. The average volumes of water collected by the fog collectors were below 0.5Lm⁻²day⁻¹ with a maximum of 4.4Lm⁻²day⁻¹. The contributions of water from the mist ranged between 0.02 and 1.77 mmday⁻¹. The direction of the wind did not affect the capture of water and there is still uncertainty when separating the real contribution of water from the fog from the orographic rain, which continues to be a challenge in the paramo ecosystems, for which it is necessary to expand research, to improve the designs and efficiencies of fog collectors.

Keywords: Andean paramos; Domestic water supply; Fog Collectors; Fresh water resources; Water collection system.

INTRODUCCIÓN

Los páramos ofrecen gran variedad de servicios ecosistémicos que benefician a sus comunidades aledañas (Vásquez Cerón & Buitrago Castro, 2011). Entre los más importantes está la capacidad de interceptación, de almacenamiento y de flujo del agua en las fuentes hídricas superficiales y subterráneas, que ayudan en la regulación del clima, la conservación de la biodiversidad y el abastecimiento de agua (Vásquez Cerón & Buitrago Castro, 2011; Rodríguez-Morales *et al.* 2019); sin embargo, los páramos han sido deteriorados por el hombre, a través del tiempo, provocando que la prestación de servicios ecosistémicos se vea alterada (Pedrono *et al.* 2016; Said *et al.* 2019).

El servicio más afectado en los páramos es quizás la provisión de agua, que se evidencia en la reducción de los niveles de las lagunas y de los caudales de los ríos que provienen de ellos (Cárdenas-Vargas & García-Valbuena, 2019; Ruíz Ordoñez *et al.* 2023). Esta reducción podría estar relacionada con la pérdida de captación o interceptación de agua de los páramos, como puede estar ocurriendo en el páramo Pan de Azúcar, ubicado en el complejo Guantiva - La Rusia, departamento de Boyacá, Colombia (Morales *et al.* 2007). En este páramo se encuentra la laguna Pan de Azúcar, cuya microcuenca de captación hídrica ha sido sometida a procesos de degradación por actividades antrópicas (Crespo *et al.* 2010), que disminuye su capacidad de retención y de almacenamiento hídrico, afectando al municipio de Duitama - Boyacá, que se abastece del agua, que proviene de dicho páramo (Alcaldía municipal Duitama, 2016).

Hace varias décadas la cobertura vegetal del páramo Pan de Azúcar estaba principalmente representada por especies leñosas de porte arbustivo que, junto con las especies de hábito herbáceo y rosetas, contribuyen en la estructura y la función del páramo (Valencia *et al.* 2013); sin embargo, la disminución y la pérdida de leñosas arbustivas en algunos sectores, pudo provocar la reducción del principal mecanismo de captación de lluvia horizontal o niebla, ya que la vegetación, particularmente los arbustos y árboles, son considerados buenos colectores o interceptores de niebla (Fessehayé *et al.* 2014).

Por esto, autores como Estrela *et al.* (2019) consideran la necesidad de crear y usar nuevas tecnologías que permitan suplir o aumentar la probabilidad de captación de agua de niebla y reducir la escasez de agua, a partir de fuentes alternativas y no convencionales (Fessehayé *et al.* 2014). De acuerdo con Cárdenas-Vargas & García-Valbuena (2019), en Colombia, se puede aprovechar el potencial para la recolección de agua de niebla en ubicaciones montañosas, para usos domésticos, agrícolas, comerciales o para proyectos de restauración ecológica y reforestación (Fessehayé *et al.* 2014; Estrela *et al.* 2019).

Una de estas tecnologías para la captación de agua de niebla con sistemas pasivos son los colectores de niebla, estructuras artificiales que se instalan a determinadas altitudes para interceptar las partículas de agua que posee la neblina, a través de una malla de captación (Regalado & Ritter, 2016; Estrela *et al.* 2019), por lo tanto, podría ser útil usarlas en sitios disturbados, donde se ha perdido la vegetación y con ella, la capacidad de captación de agua, así como

para favorecer procesos de restauración ecológica en estas áreas, mediante el aumento de agua disponible para las plantas. Por esto, en este estudio, se planteó como objetivo, evaluar la captación de agua utilizando colectores de niebla en el páramo Pan de Azúcar, Duitama, Boyacá.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio: El páramo Pan de Azúcar está ubicado en el complejo de páramo Guantiva-La Rusia, que se localiza en el flanco occidental de la cordillera oriental, entre los 3.100 y 4.280 m s.n.m. En el área predominan chuscales entremezclados con pajonales y frailejonales-rosetales, que están fragmentados e intervenidos (Morales *et al.* 2007). El páramo Pan de Azúcar es un páramo seco, con una precipitación media anual de 1128 mm, una temperatura promedio de 8 °C, con dos periodos de lluvia de marzo a mayo y de septiembre a noviembre y dos periodos secos, de junio a agosto y de diciembre a febrero (Alcaldía municipal Duitama, 2012; 2016).

La vegetación característica son los herbazales con presencia de plantas de los géneros *Agrostis* y *Calamagrostis*; frailejonales con predominio de diferentes especies de *Espeletia*, arbustales con los géneros *Weinmania*, *Polylepis*, *Hypericum*, entre otros y una plantación forestal de *Pinus patula*. En este páramo se encuentra la laguna Pan de Azúcar, con coordenadas 5°55'23.39"N - 73° 1'55.80"O (Figura 1), donde nace el río Surba, la principal fuente de agua para el municipio de Duitama (Alcaldía municipal Duitama, 2016).

Captadores de niebla: Se instalaron 60 colectores de tipo convencional, los cuales, constan de mallas planas bidimensionales, sostenidas con dos postes de madera de 3 m de altura, enterrados perpendicularmente al suelo. La malla fue de polisombra negra al 80 %, con un área de captación de 6 m², colocada a una altura de 70 cm del suelo; los postes fueron anclados mediante un sistema de tensores de guaya y pernos, con el fin de mantener la tensión de la red de captación. A los 24 colectores seleccionados aleatoriamente se les instaló en la base una canaleta en PVC de 4", acoplada a una manguera que se conectó a dos recipientes de recolección, con una capacidad de 22.71 litros, cada uno (Figura 2).

Fase de campo: Los colectores de niebla fueron agrupados en dos conjuntos de 30, ubicados en las coordenadas 5°55'29.35"N - 73° 1'26.50"O y 5°55'43.96"N - 73°1'50.76"O, respectivamente (Figura 1), dispuestos en 20 puntos ubicados aleatoriamente, mediante una grilla de georreferenciación de celdas de 100 m². En cada punto georreferenciado, se instalaron grupos de 3 colectores de niebla ubicados en distintas posiciones (perpendicular y paralelo), a la dirección preponderante del viento. Los colectores fueron instalados en dos secciones ribereñas desprovistas de vegetación arbustiva, correspondientes a dos quebradas que alimentan la Laguna Pan de Azúcar. La dirección preponderante del viento se estableció mediante banderines instalados cerca de las dos zonas con colectores y a 3 m de altura, durante varios días se registró la dirección cada hora, entre las 9:00 y las 16:00 horas, mediante una rosa de los vientos, con referencia del norte geográfico.

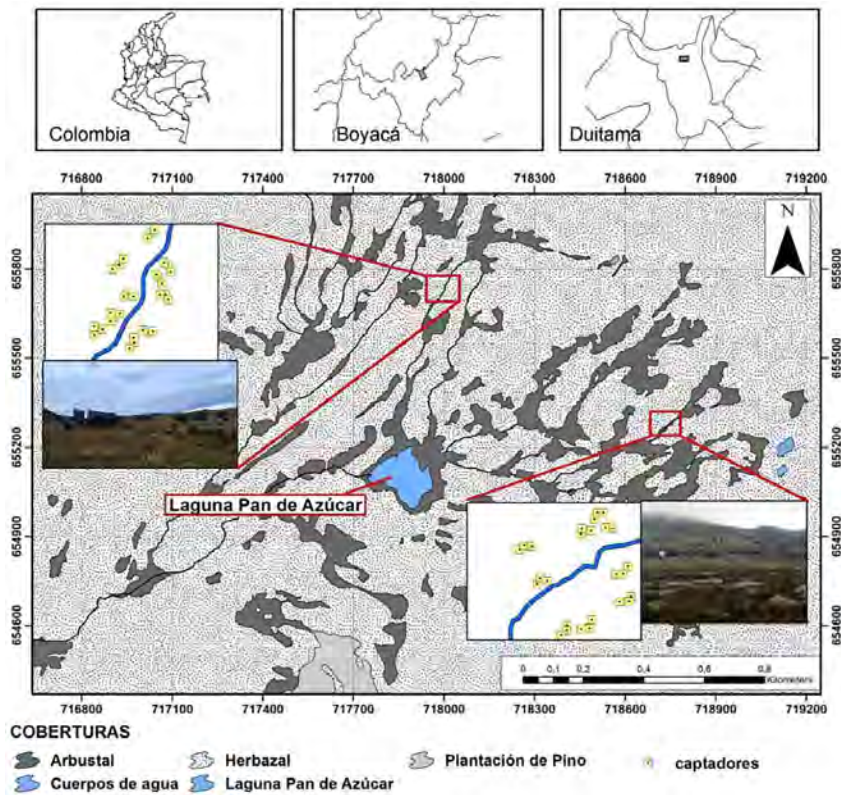


Figura 1. Ubicación de los captadores de niebla en el páramo Pan de Azúcar, Duitama-Boyacá. Los círculos de color rojo muestran las dos áreas seleccionadas para la instalación de los captadores de niebla. La cuadrícula que se ve en los círculos grandes indica las celdas de 100 m².

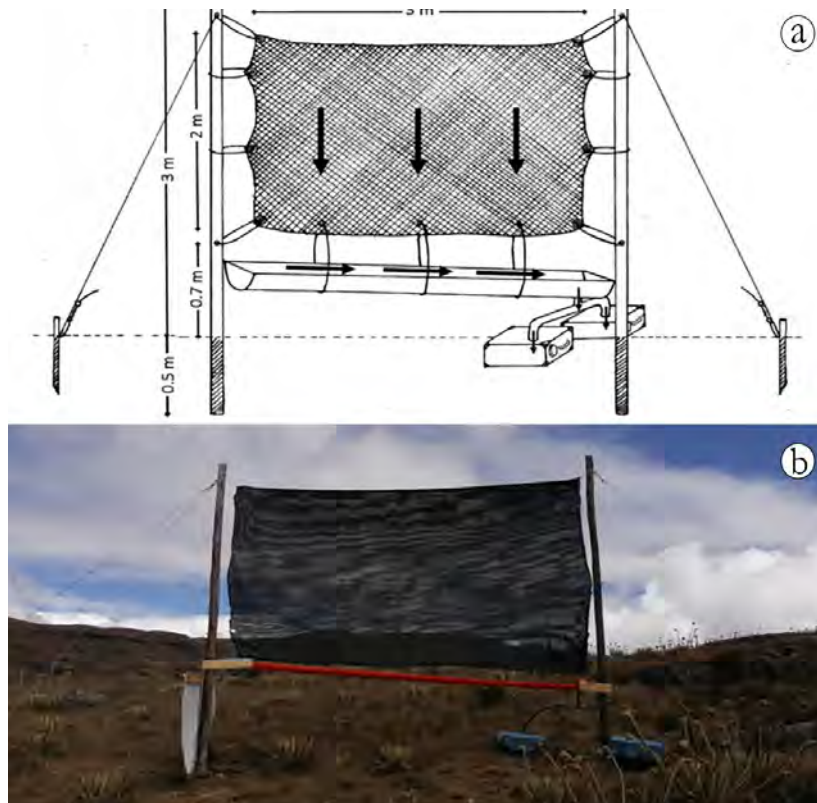


Figura 2. Captador de niebla. a) Esquema del captador de niebla utilizado; b). Fotografía del captador de niebla en el páramo Pan de Azúcar, Duitama - Boyacá, Colombia.

Toma de datos: Se realizó cada quince días durante un año, entre el 17 de septiembre de 2020 y el 28 de septiembre de 2021, se registró el volumen de agua captada en periodos de 24 horas, a las 09:00 a.m. de cada día, para un total de 26 días de registros diarios. Las mediciones del volumen de agua se efectuaron mediante un recipiente aforado, con una capacidad de 12 L y una probeta aforada, con capacidad de 250 mL. La temperatura y la precipitación se registraron mediante un pluviómetro con datalogger, marca HOBO, modelo RG3-M y la humedad relativa, mediante un datalogger marca HOBO Pro v2 Temp/RH U23-001, programados para registrar los datos cada 5 minutos. Ambos equipos quedaron ubicados en las coordenadas 5°55'36.43"N y 73°1'38.35"O, a una distancia menor de 500 m a los captadores de niebla.

Para complementar la información meteorológica se obtuvieron los datos de tres estaciones cercanas al lugar de estudio: la primera, denominada "ANTENA TV RUSIA LA", ubicada a 3.650 m s.n.m (IDEAM, 2021); la estación "GUANENTÁ", ubicada a 3.945 m s.n.m. (PNN, 2021) y la estación "ANDALUCIA", a 3265 m s.n.m (IDEAM, 2021). Estas tres estaciones estaban ubicadas a 6,8 km, 9 km y 3,8 km, respectivamente, de los equipos instalados en el páramo Pan de Azúcar.

Análisis de datos: Con los datos recolectados de precipitación y de temperatura se construyó el diagrama ombrotérmico, para los meses de estudio. Se hizo un gráfico de precipitación comparativo entre los datos registrados en el páramo Pan de Azúcar y las estaciones climatológicas consultadas. El volumen de agua recolectado se tomó para un área de captación de la malla de 6 m², pero se usó el volumen de agua captado en un área de 1 m², para poder hacer los análisis estadísticos. Se verificó previamente el supuesto de normalidad para los datos de volumen de agua captado, usando la prueba de Shapiro-Wilk y se aplicó una prueba de Friedman, para hallar diferencias significativas en la captación de agua diaria por los captadores perpendiculares y paralelos a la dirección preponderante del viento, durante los meses de estudio. Los análisis se realizaron en Rstudio versión 4.1.1 (R Core Team, 2021), usando los paquetes ggplot2 versión 3.3.2 (Wickham, 2016) y dplyr (Wickham *et al.* 2021), para la realización de figuras y el paquete stats (R Core Team, 2021), para los análisis estadísticos.

Para diferenciar el agua recolectada proveniente de neblina en los colectores se usó el modelo geométrico propuesto por Domínguez *et al.* (2017; 2019). Para ello, se utilizaron los volúmenes de agua captados cada 24 horas. El modelo se basa en que la intensidad y la dirección de la lluvia captada por un pluviómetro y el colector de neblina es la misma y ocurre si ambos dispositivos están ubicados cerca. Además, se asume que la intercepción de neblina se produce sobre la proyección perpendicular a la dirección del viento de la malla del colector. A continuación, se explica el modelo aplicado a los datos registrados en el páramo Pan de Azúcar:

Se halla el diámetro promedio de una gota de lluvia (RD) (ecuación 1):

$$RD=2,23*(0,03937*RF_v)^{0,102} \quad \text{ecuación 1}$$

RF_v es igual a la precipitación diaria medida por el pluviómetro, donde RD y RF_v están dadas en mm y mm t⁻¹ (t=tiempo del registro de precipitación), respectivamente. Para este estudio, se utilizó la precipitación registrada por el pluviómetro cada 24 horas. La velocidad de caída de la gota (UD) dada en ms⁻¹, se estimó a partir de RD (ecuación 2):

$$UD=3,378*Ln(RD)+4,213 \quad \text{ecuación 2}$$

El ángulo de inclinación de la lluvia (γ), se calculó a partir de la ecuación 3:

$$\gamma=U / UD \quad \text{ecuación 3}$$

Donde, U es la velocidad del viento, para el páramo Pan de Azúcar fue de 2,5ms⁻¹ (Meteoblue, 2021), RF_a es la magnitud de la lluvia real que tiene una inclinación y se puede estimar con una relación trigonométrica a partir de la ecuación 4:

$$RF_a =RF_v / \cos(\gamma) \quad \text{ecuación 4}$$

Dadas las suposiciones anteriores de los dos dispositivos, el volumen captado por el colector de niebla correspondiente a la lluvia real (VR_a) (ecuación 5):

$$VR_a =RF_a*S_r \quad \text{ecuación 5}$$

Donde, S_r es la proyección de la superficie del colector perpendicular a la dirección de RF_a de los colectores bidimensionales usados en el páramo Pan de Azúcar; S_r se halló usando la figura geométrica del perímetro de un cuadrado que corresponde a la sumatoria de todos sus lados; para el caso de los análisis, se hizo para el área de captación de 1 m² del captador de niebla. Finalmente, la magnitud de la intercepción de neblina dada en unidades de mmdía⁻¹, captada por el colector (NI), está dada por la ecuación 6:

$$NI = (VF_t - fe*VR_a) / S_v \quad \text{ecuación 6}$$

Donde, VF_t corresponde al volumen captado por los colectores de niebla, se usó el promedio del volumen de agua captado diariamente durante los 26 días de registro. Fe es un coeficiente de corrección aplicado a la medición de la lluvia en el colector, que corresponde a la pendiente de un modelo de regresión lineal, que relaciona la precipitación medida por el pluviómetro; el cálculo del coeficiente Fe en el páramo Pan de Azúcar, se construyó de una regresión lineal, usando los datos de precipitación diarios de todo el tiempo de estudio (n=353). S_v es la proyección de la superficie del colector perpendicular a la dirección del viento; para los colectores del páramo Pan de Azúcar, S_v fue estimado con las mismas relaciones trigonométricas utilizadas para obtener S_r (Domínguez *et al.* 2019) y fue constante para todo el periodo de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de las variables ambientales. Se observó que no existe un déficit hídrico del páramo Pan de Azúcar durante el año de estudio, ya que la precipitación no estuvo por debajo de

la temperatura en ninguno de los meses de registro, incluso, en el mes de enero, que registró una precipitación por debajo de los 80 mm (Figura 3a). La precipitación mensual osciló entre 51 y 1198 mm, en noviembre se registró el valor máximo y enero el valor mínimo; otros valores altos de precipitación se registraron en abril, mayo y agosto: 935, 831 y 794 mm, respectivamente (Figura 3a). La temperatura media mensual osciló entre los 6 y 8 °C, siendo diciembre, enero y febrero los que registraron temperaturas cercanas a los 8 °C y la temperatura más baja se dio en julio, con 6,6 °C (Figura 3a). Según el diagrama ombrotérmico, el régimen de lluvias en el páramo Pan de Azúcar es bimodal con mayores precipitaciones entre marzo-mayo y octubre-noviembre, lo que coincide con el régimen del complejo Guantiva – La Rusia, con mayores lluvias de abril-mayo y octubre-noviembre (Martínez-O. *et al.* 2019).

De las cuatro estaciones meteorológicas consultadas, solo la precipitación de Guanenta tuvo un comportamiento similar al registrado en Pan de Azúcar, con valores mensuales por arriba de los 550 mm, de marzo a mayo y noviembre, y bajas precipitaciones, de diciembre a febrero (Figura 3b). A pesar de la cercanía de las otras dos estaciones “ANTENA TV RUSIA LA” y “ANDALUCIA” al área de estudio, las precipitaciones difieren mucho; para estas dos estaciones, la precipitación osciló entre los 35 y los 200 mm, con valores máximos de marzo a mayo y de octubre a noviembre (Figura 3b). Martínez-O. *et al.* (2019) indican que para el complejo Guantiva – La Rusia las precipitaciones fluctúan entre 700 y 3.000 mm anuales y la temperatura oscila entre 12 y 30 °C.

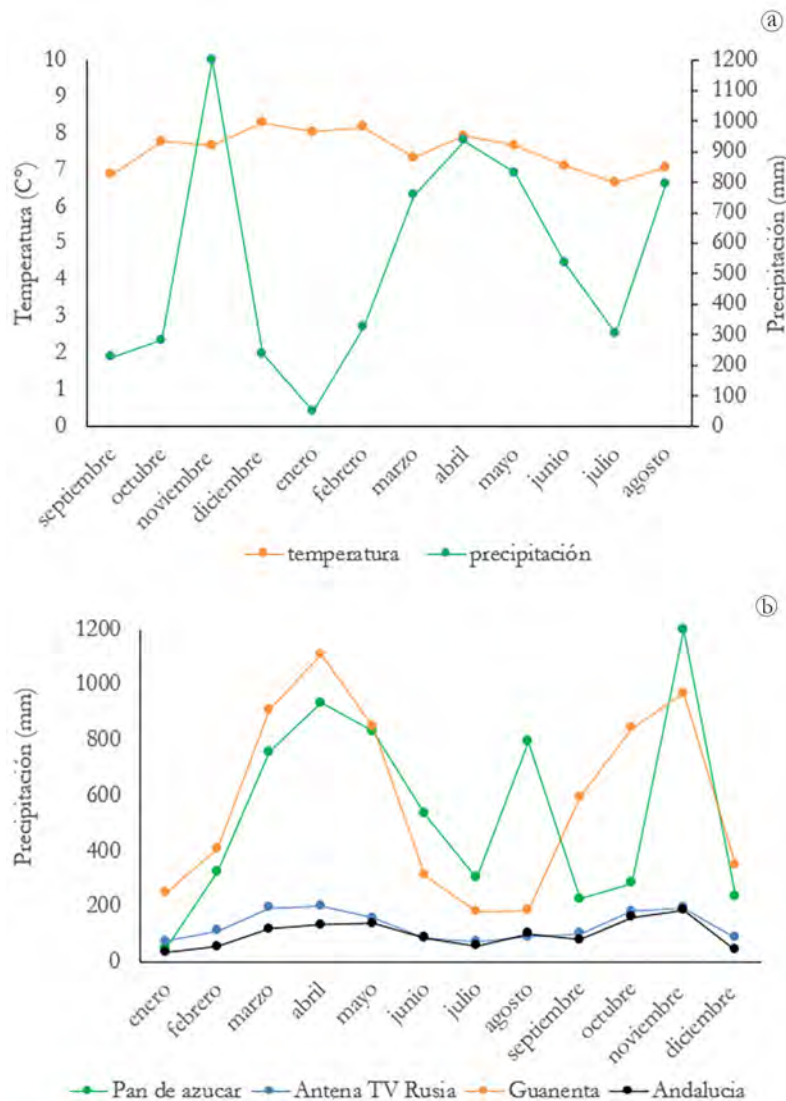


Figura 3. Registro de las variables climáticas en el páramo Pan de Azúcar. a) diagrama ombrotérmico de septiembre del 2020 a agosto del 2021; b) registro de la precipitación de cuatro estaciones meteorológicas en el complejo Guantiva - La Rusia desde el mes de enero hasta el mes de diciembre del 2021.

En el páramo Pan de Azúcar, se registró un total de 6.528 mm durante el año de estudio, clasificándolo como un páramo pluvial, según la clasificación pluviométrica propuesta por Díaz-Granados Ortiz *et al.* (2005); no obstante, Pan de Azúcar se ha reportado, quizá de manera equivocada, pues no se tiene registro histórico de su clima, como páramo seco (Alcaldía municipal Duitama, 2012), por su posición geográfica en la vertiente occidental de la cordillera oriental (Vásquez Cerón & Buitrago Castro, 2011); sin embargo, los resultados de este estudio indican que la precipitación es mayor, probablemente, influenciado por su cercanía al Santuario de Flora y Fauna Guanentá Alto Río Fonce (IAVH, 2017), que está regulado por las lluvias orogénicas provenientes del valle del Magdalena y los vientos locales de Santander, que presenta un régimen húmedo (Morales *et al.* 2007). Además, es posible que la precipitación registrada para este estudio también esté influenciada por el fenómeno de la niña, que registró un excedente de precipitación del 120-160 % para la provincia Tundama del departamento de Boyacá, durante el 2020 e inicios de 2021 (IDEAM, 2020).

Cuantificación de la interceptación mensual de los captadores de niebla. Los rendimientos diarios fueron mayores en marzo, con un promedio de $1,73 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ de los captadores paralelos y $1,25 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ de los captadores perpendiculares, con valores máximos por arriba de los $6 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$. La mayoría de los meses registraron promedios por debajo de $1,5 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$, aunque se observan algunos datos atípicos en noviembre, por arriba de los $2 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$, en captadores perpendiculares (Figura 4a). La prueba de Friedman mostró que no hay diferencias significativas (p -valor = 0,52) en la captación de agua por los captadores perpendiculares y paralelos durante los meses de estudio; sin embargo, los valores de agua recolectados fueron bajos, con promedios entre los 0 y $0,5 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$, similares a los promedios registrados por Tan *et al.* (2019).

Para los 26 días de registros diarios del páramo Pan de Azúcar, la precipitación diaria fue menor a 10 mm en la mayoría de los días. La máxima precipitación fue de 69 mm registrada el 16 de marzo del 2021, mientras que en los días de octubre, enero y septiembre fue de 0 mm. Otros días que tuvieron precipitaciones por arriba de los 30 mm fueron el 20 de noviembre y 29 de diciembre del 2020 (Figura 4b). El día 16 de marzo del 2021, se registró el mayor volumen de agua diario, con un promedio de $4,4 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$, con valores máximos que llegaron a los $7,5 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$. En general, en la mayoría de los días se captaron menos de $1,5 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$, aunque tres captadores pudieron recoger más de $2 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ el 19 de noviembre del 2020 (Figura 4c).

Respecto a otros estudios realizados en Colombia, García-Ubaque *et al.* (2013) registraron un promedio de agua de $7,21 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ en mallas de 6 m^2 , en el municipio de San Antonio-Cundinamarca o Molina & Escobar (2008), quienes obtuvieron valores diarios entre los $1,3$ y $4,8 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$. Cárdenas-Vargas & García-Valbuena (2019), comparando tres tipos de captadores, registraron promedios entre los $0,97$ y $1,94 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$. Estos resultados muestran una mayor captación de agua en estas zonas de estudio.

En el caso de otros países de África, Medio Oriente, Asia y la Costa Oeste de Estados Unidos, los promedios oscilaron entre los $2,4$ y $20 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ (Abdul-Wahab *et al.* 2007; Domen *et al.* 2014; Gandhidasan & Abualhamayel, 2012; Marzol & Sánchez-Megía, 2008). Para Latinoamérica, Tan *et al.* (2019) hicieron una revisión de varios estudios y encontraron promedios que oscilaban entre los $0,1$ y $25 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$; no obstante, los resultados obtenidos de estos estudios se basan en distintas metodologías usadas en el cálculo del agua proveniente de la neblina, como los modelos matemáticos propuestos por Domínguez *et al.* (2017; 2019) o Imteaz *et al.* (2011) o la importancia de la estacionalidad y variables climáticas en los distintos sitios de estudio (Montecinos *et al.* 2018; Regalado & Ritter, 2019) o, simplemente, la forma en tomar los datos. Con toda esta variedad de metodologías, no se cuenta aún con un método estándar para cuantificar la interceptación de niebla por los captadores (García-Ubaque *et al.* 2013) y su implementación presenta ciertas limitaciones (Fessehaye *et al.* 2014).

Cuantificación del agua proveniente de la niebla. Se usó el modelo geométrico descrito como una primera aproximación a la separación de la neblina de la lluvia; se encontró que el promedio de la intensidad de interceptación de niebla de los captadores osciló entre los $0,02$ y $1,77 \text{ mmdía}^{-1}$, siendo el 16 de marzo del 2021 el que registró este último valor. De los 26 días, 12 días registraron valores cercanos a los 0 mmdía^{-1} , tres días presentaron registros por arriba de los $0,4 \text{ mmdía}^{-1}$ y los demás días oscilaron entre los $0,1$ y $0,3 \text{ mmdía}^{-1}$ (Figura 4d). Estos valores son bajos comparados con los registrados por Echeverría *et al.* (2020), donde obtuvieron valores de los $3,4$ a los $7,9 \text{ mmdía}^{-1}$, en captadores cilíndricos y bidimensionales, con diferente coeficiente de sombra de la malla en la Isla de San Cristóbal- Galápagos; sin embargo, las variables climáticas de los dos ecosistemas difieren bastante, ya que San Cristóbal se encuentra a 600 m s.n.m. y registró un máximo de 72 mm diarios de precipitación y temperaturas de $18,2^\circ\text{C}$ (Echeverría *et al.* 2020).

Muchos son los factores climáticos y metodológicos que pueden incidir sobre la captación de agua de niebla, por esta razón, algunos autores, como Figueira *et al.* (2013), consideran que la cuantificación con precisión, tanto de la cantidad de agua que proviene de la lluvia como de la interceptación de nubes es extremadamente difícil, aunque la importancia hidrológica de la niebla para muchos ecosistemas costeros y montañosos es bien conocida. No existe aún una estandarización en la medición de la captación de agua por neblina, se deben mejorar las metodologías y las mediciones que tengan en cuenta las eficiencias de los atrapanieblas, mencionadas por Azeem *et al.* (2020), Carvajal *et al.* (2020) y Holmes *et al.* (2015): 1) La eficiencia aerodinámica que está determinada por la manera en que la niebla interactúa con la red y el tamaño del poro; 2) La eficiencia de deposición determinada por la forma en que las gotas son conducidas a través de la red hacia la canaleta; 3) La eficiencia de drenado que depende de la proporción de agua que llega a la canaleta y al recipiente de almacenamiento.

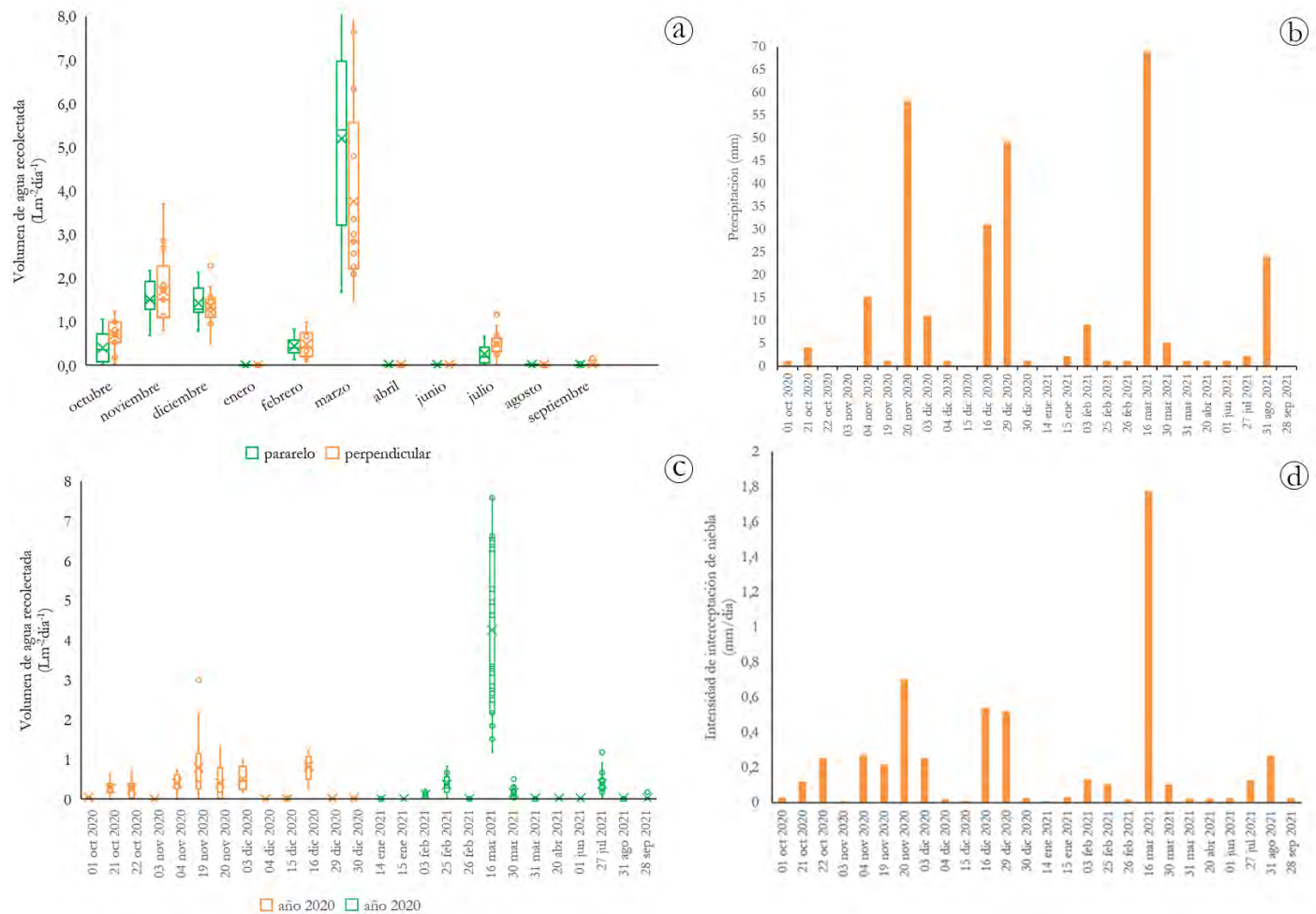


Figura 4. a) Volumen de agua recolectado diariamente por los captadores perpendiculares y paralelos a la dirección de viento durante los meses de estudio; b) Precipitación registrada para los 26 días de registros diarios; c) Volumen de agua recolectado en los 26 días de registro diario (la equis indica el promedio de recolección); d) Promedio de la intensidad de interceptación de niebla de los 26 días de registro diario basados en el modelo geométrico.

Este trabajo evidenció que los captadores interceptaron un bajo volumen de agua en comparación con otros estudios, debido a que el diseño de los captadores, probablemente, no fue el más eficaz, al ignorar las posibles pérdidas de agua que pueden llegar a suceder de las tres eficiencias nombradas por Jarimi *et al.* (2020): pérdidas de agua por el bajo contenido de agua líquida en la niebla (eficiencia aerodinámica), la alta velocidad del viento que reintroduce al flujo de aire las micro-gotas que chocan con la malla y no llegan a la canaletas (efectividad de captura) y el tamaño de la canaletas que lleva a la pérdida de agua antes de ser almacenada (efectividad de drenado).

El modelo geométrico utilizado para separar el agua de lluvia y de niebla interceptada por las mallas, fue usado por primera vez para sistemas de páramo en este estudio, por lo que se considera necesario mejorar y desarrollar su implementación en la medición de las eficiencias nombradas anteriormente, en sistemas de alta montaña

El clima en el páramo Pan de Azúcar no está claramente definido porque no se ha instalado una estación climática permanente, de

manera que los datos de este estudio contradicen todo lo publicado y muestran que se trataría de un páramo pluvial que puede estar afectado por el fenómeno de la niña, ocurrido en el periodo de mediciones climáticas de este estudio.

Agradecimientos. A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC, a la gobernación de Boyacá y MINCIENCIAS, por el apoyo económico, a través de la Convocatoria 794 para proyectos de I+D, a las entidades Empoduitama S.A. E.S.P, CORPOBOYACÁ y Corporación Tibaira por su acompañamiento y apoyo económico y logístico; al grupo de investigación UDESA de la UPTC, por su asesoría y acompañamiento en las salidas de campo.

Conflictos de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución de autores:** Francisco Cortés Pérez participó en la conceptualización, metodología y la administración del proyecto. Oscar Roa Casas, contribuyó con la curaduría de los datos y la metodología. Felipe Moreno Mancilla colaboró con la realización del análisis formal de los datos. Carlos Andrés Villate colaboró con la obtención de los datos y supervisión

de la investigación. David Ricardo Hernández Velandia colaboró con la obtención de los datos. Laura L. Hernández Pineda colaboró con la obtención de los datos y la elaboración y edición del borrador del manuscrito. Todos los autores participaron en la redacción, revisión, edición del manuscrito y aprueban la versión final. **Financiación:** Este estudio fue financiado por la gobernación de Boyacá, además se contó con el financiamiento de las entidades aliadas Empoduitama S.A E.S.P., Corpoboyaca y Corporación Tibaira.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABDUL-WAHAB, S.A.; AL-HINAI, H.; AL-NAJAR, K.A.; AL-KALBANI, M.S. 2007. Feasibility of fog water collection: a case study from Oman. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*. 56(4):275-280. <https://doi.org/10.2166/aqua.2007.045>
2. ALCALDÍA MUNICIPAL DUITAMA. 2012. Análisis de la Situación de Salud del Municipio de Duitama 2012. Con modelos de determinantes sociales de salud. 131p. Disponible desde Internet en: https://www.boyaca.gov.co/secretariasalud/wp-content/uploads/sites/67/2014/05/images_Documentos_ASIS_2013_ASIS-DUITAMA-2013.pdf
3. ALCALDÍA MUNICIPAL DUITAMA. 2016. Acuerdo 013 de 2016 Plan De Desarrollo Duitama 2016-2019 ¡La Duitama que soñamos! 258p. Disponible desde Internet en: <https://transparencia.culturamaduitama.gov.co/docs/documents/PLAN%20DE%20DESARROLLO%20DUITAMA%202016%20-%202019%20CULTURA%20PG%20143-149%20RESALTADO.pdf>
4. AZEEM, M.; NOMAN, M.T.; WIENER, J.; PETRU, M.; LOUDA, P. 2020. Structural design of efficient fog collectors: A review. *Environmental Technology & Innovation*. 20:101169. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101169>
5. CÁRDENAS-VARGAS, M.C.; GARCÍA-VALBUENA, C.A. 2019. Medición de la condensación de lluvia horizontal con tres estructuras: el caso del municipio de Zipacón (Cundinamarca, Colombia). *Revista producción + limpia*. 14(1):94-109. <https://doi.org/10.22507/pml.v14n1a9>
6. CARVAJAL, D.; SILVA-LLANCA, L.; LARRAGUIBEL, D.; GONZÁLEZ, B. 2020. On the aerodynamic fog collection efficiency of fog water collectors via three-dimensional numerical simulations. *Atmospheric Research*. 245:105-123. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105123>
7. CRESPO, P.; CÉLLERI, R.; BUYTAERT, W.; FEYEN, J.; IÑIGUEZ, V.; BORJA, P.; DE BIEVRE, B. 2010. Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems. *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins*. 336:71-76.
8. DÍAZ-GRANADOS ORTIZ, M.A.; NAVARRETE, J.D.; SUÁREZ LÓPEZ, T. 2005. Páramos: hidrosistemas sensibles. *Revista de Ingeniería*. 22:64-75. <https://doi.org/10.16924/revinge.22.8>
9. DOMEN, J.K.; STRINGFELLOW, W.T.; CAMARILLO, M.K.; GULATI, S. 2014. Fog water as an alternative and sustainable water resource. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 16(2):235-249. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0645-z>
10. DOMÍNGUEZ, C.; ECHEVERRÍA, P.; VILLACÍS, M.; VIOLETTE, S. 2019. Evaluación de la cosecha de neblina como una fuente potencial para el aprovechamiento de agua. En: Inga Ortega, E. (Ed.). *Aplicaciones e innovación de la ingeniería en ciencia y tecnología*. Editorial Abya-Yala. p.97-142). <https://doi.org/10.7476/9789978104910.0005>
11. DOMÍNGUEZ, C.G.; GARCÍA VERA, M.F.; CHAUMONT, C.; TOURNEBIZE, J.; VILLACÍS, M.; D'OZOUVILLE, N.; VIOLETTE, S. 2017. Quantification of cloud water interception in the canopy vegetation from fog gauge measurements. *Hydrological Processes*. 31(18):3191-3205. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.11228>
12. ECHEVERRÍA, P.; DOMÍNGUEZ, CH.; VILLACÍS, M.; VIOLETTE, S. 2020. Fog harvesting potential for domestic rural use and irrigation in San Cristobal Island, Galapagos, Ecuador. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 46(2):563-580. <http://doi.org/10.18172/cig.4382>
13. ESTRELA, M.; CORELL, D.; VALIENTE, J.A.; AZORIN-MOLINA, C.; CHEN, D. 2019. Spatio-temporal variability of fog-water collection in the eastern Iberian Peninsula: 2003-2012. *Atmospheric Research*. 226:87-101. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.04.016>
14. FESSEHAYE, M.; ABDUL-WAHAB, S.A.; SAVAGE, M.J.; KOHLER, T.; GHEREZGHIHER, T.; HURNI, H. 2014. Fog-water collection for community use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29:52-62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.063>
15. FIGUEIRA, C.; MENEZES DE SEQUEIRA, M.M.; VASCONCELOS, R.; PRADA, S. 2013. Cloud water interception in the temperate laurel forest of Madeira Island. *Hydrological Sciences Journal*. 58(1):152-161. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.742952>
16. GANDHIDASAN, P.; ABUALHAMAYEL, H.I. 2012. Exploring fog water harvesting potential and quality in the Asir Region, Kingdom of Saudi Arabia. *Pure and Applied Geophysics*. 169(5):1019-1036. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0341-z>

17. GARCÍA-UBAQUE, C.A.; VACA-BOHÓRQUEZ, M.L.; GARCÍA-UBAQUE, J.C. 2013. Factibilidad técnica y de salud pública de la recolección de aguas nieblas: Estudio de caso. *Revista de Salud Pública*. 15(3):366-373.
18. HOLMES, R.; DE DIOS RIVERA, J.; DE LA JARA, E. 2015. Large fog collectors: New strategies for collection efficiency and structural response to wind pressure. *Atmospheric Research*. 151:236-249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.005>
19. IMTEAZ, M.A.; AL-HASSAN, G.; SHANABLEH, A.; NASER, J. 2011. Development of a mathematical model for the quantification of fog-collection. *Resources, Conservation and Recycling*. 57:10–14. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.014>
20. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. 2020. boletín de seguimiento fenómeno el niño y la niña. Disponible desde Internet en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/boletin-de-seguimiento-fenomeno-el-nino-y-la-nina>
21. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. 2021. Suministro de información hidrometeorológica. Disponible desde Internet en: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion/>
22. INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS “ALEXANDER VON HUMBOLDT” - IAVH. 2017. Recomendación para la delimitación, por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, del Complejo de Páramos Guantiva – La Rusia a escala 1:25.000. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt - Fondo Adaptación. Bogotá. 161p. Disponible desde Internet en: <http://hdl.handle.net/20.500.11761/9259>
23. JARIMI, H.; POWELL, R.; RIFFAT, S. 2020. Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. (United Kingdom). 15(2):253-276. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz072>
24. MARTÍNEZ-O., M.F.; DÍAZ-PÉREZ, C.N.; MORALES-PUENTES, M.E. 2019. Los musgos en el complejo de páramos Guantiva-La Rusia en los departamentos de Boyacá y Santander, Colombia. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural*. 23(1):15-30. <https://doi.org/10.17151/bccm.2019.23.1.1>
25. MARZOL, M.V.; SÁNCHEZ-MEGÍA, J.L. 2008. Fog water harvesting in Ifni, Morocco. An assessment of potential and demand. *Die Erde*. 139(1-2):97-119.
26. METEOBLUE WEATHER CLOSE TO YOU. 2021. Rafaga de viento. Disponible desde Internet en: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/maps/duitama_colombia_3685084#coords=15.91/5.894923/-73.045297&map=windAnimation~rainbow~auto~10%20m%20above%20gnd~none
27. MOLINA, JOSÉ M.; ESCOBAR, CONCEPCIÓN M. 2008. Fog collection variability in the Andean mountain range of Southern Colombia. *Die Erde*. 39(1-2):127-140.
28. MONTECINOS, S.; CARVAJAL, D.; CERECEDA, P.; CONCHA, M. 2018. Collection efficiency of fog events. *Atmospheric Research*. 209:163-169. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.004>
29. MORALES RIVAS, M.; OTERO GARCÍA, J.; VAN DER HAMMEN, T.; TORRES PERDIGÓN, A.; CADENA VARGAS, C.E.; PEDRAZA PEÑALOZA, C.A.; RODRÍGUEZ ERASO, N.; FRANCO AGUILERA, C.A.; BETANCOURTH SUÁREZ, J.C.; OLAYA OSPINA, É.; POSADA GILEDE, E.; CÁRDENAS VALENCIA, L. 2007. Atlas de páramos de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C., Colombia. 208p.
30. PARQUES NACIONALES NATURALES DE COLOMBIA - PNN. 2021. Santuario de flora y fauna Guanentá Alto Río Fonce. Disponible desde Internet en: <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/parques-nacionales/santuario-de-flora-y-fauna-guanenta-alto-rio-fonce/>
31. PEDRONO, M.; LOCATELLI, B.; EZZINE-DE-BLAS, D.; PESCHE, D.; MORAND, S.; BINOT, A. 2016. Impact of climate change on ecosystem services. En: Torquebiau, E (eds). *Climate change and agriculture worldwide*. Springer. p.251-261. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7462-8_19
32. R CORE TEAM. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible desde Internet en: <https://www.R-project.org/>
33. REGALADO, C.M.; RITTER, A. 2016. The design of an optimal fog water collector: A theoretical analysis. *Atmospheric Research*. 178-179:45-54. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.006>
34. REGALADO, C.M.; RITTER, A. 2019. On the estimation of potential fog water collection from meteorological variables. *Agricultural and Forest Meteorology*. 276-277:107645. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107645>

35. RODRÍGUEZ-MORALES, M.; ACEVEDO-NOVOA, D.; MACHADO, D.; ABLAN, M.; DUGARTE, W.; DÁVILA, F. 2019. Ecohydrology of the Venezuelan páramo: water balance of a high Andean watershed. *Plant Ecology & Diversity*. 12(6):573-591. <https://doi.org/10.1080/17550874.2019.1673494>
36. RUÍZ ORDOÑEZ, D.M.; CAMACHO DE ANGULO, Y.V.; PENCUE FIERRO, E.L.; FUGUEROA CASAS, A. 2023. Mapping ecosystem services in an andean water supply basin. *Sustainability*. 15(3):1793. <https://doi.org/10.3390/su15031793>
37. SAID, M.; KOMAKECH, H.C.; MUNISHI, L.K.; NYARUBAKULA MUZUKA, A.N. 2019. Evidence of climate change impacts on water, food and energy resources around Kilimanjaro, Tanzania. *Regional Environmental Change*. 19(8):2521-2534. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01568-7>
38. TAN, F.J.; ESTANISLAO, M.A.P.; GREGORIO, A.M.A.; NAVEA, I.J.D. 2019. The potential of fog harvesting in tropical highlands as an alternative water resource: the case of Atok, Benguet, Philippines. *E3S Web of Conferences*. (France).117:00007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911700007>
39. VALENCIA, J.; LASSALETTA, L.; VELÁZQUEZ, E.; NICOLAU, J.M.; GÓMEZ-SAL, A. 2013. Factors controlling compositional changes in a northern Andean Páramo (La Rusia, Colombia). *Biotropica*. 45(1):18-26. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2012.00895.x>
40. VÁSQUEZ CERÓN, A.; BUITRAGO CASTRO, A.C. 2011. El gran libro de los Páramos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Proyecto Páramo Andino, Bogotá D.C., Colombia. 208p. Disponible desde Internet en: <http://hdl.handle.net/20.500.11761/31389>
41. WICKHAM, H. 2016. *Ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer-Verlag, New York. E.E.U.U. 213p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-98141-3>
42. WICKHAM, H.; FRANÇOIS, R.; HENRY, L.; MÜLLER, K.; VAUGHAN, D. 2021. *Dplyr: A grammar of data manipulation*. R package version 1.0.7. Disponible desde Internet en: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

Nuevas localidades en la distribución de *Corallus blombergi* (Rendahl & Vestergren ,1941) (Reptilia: Squamata, Boidea), para Colombia

New localities in the distribution of *Corallus blombergi* (Rendahl & Vestergren 1941) (Reptilia: Squamata, Boidae), for Colombia

Lucellis M. Rivas-Albornoz^{1*}; Mayra Rengifo-Palacios²; Jhon Tailor Rengifo-Mosquera³

¹Universidad Tecnológica del Chocó, Diego Luis Córdoba. Quibdó - Chocó, Colombia; e-mail: lucelly.rivas@utch.edu.co; Mayra.rengifo@utch.edu.co; djhon.rengifo@utch.edu.co

*autor de correspondencia: lucelly.rivas@utch.edu.co

Cómo citar: Rivas-Albornoz, L.M.; Rengifo-Palacios, M.; Rengifo-Mosquera, J.T. 2023. Nuevas localidades en la distribución de *Corallus blombergi* (Rendahl & Vestergren ,1941) (Reptilia: Squamata, Boidea), para Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2066. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2066>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: agosto 20 de 2021 **Aceptado:** mayo 25 de 2023 **Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El género *Corallus* contiene serpientes esbeltas y arbóreas, que habitan en bosques tropicales y que presentan una amplia distribución; sin embargo, *Corallus blombergi* es una especie poco común en Colombia, con un número limitado de reportes. En este estudio se presenta el primer registro de *C. blombergi* para el departamento del Chocó, a partir de dos hembras, colectadas en zonas de bosque pluvial tropical, en los corregimientos de salero y Pacurita, convirtiéndose en la tercera y cuarta localidad donde se registra la presencia de esta especie. Los nuevos registros, amplían la distribución de la especie a 471,50 km, desde su último registro en Tumaco.

Palabras claves: Boas; Chocó; Distribución geográfica; Nuevo registro; Serpientes arbóreas.

ABSTRACT

The *corallus* genus contains slender and arboreal snakes which inhabit tropical forests and have a wide distribution; however, *Corallus blombergi* is an uncommon specie in Colombia with a limited number of reports. This study presents the first record of *C. blombergi* for the department of Choco from two females, both collected in tropical rain forest areas, in the townships of Salero and Pacurita. becoming the third and fourth locality where the presence of this species is recorded. The new records extend the distribution of the species to 471.50 km since its last record in Tumaco.

Keywords: Boas; Choco; Geographical distribution; New record; Tree boa.

INTRODUCCIÓN

El género *Corallus* (Daudin,1803) está constituido por las serpientes arbóreas, comúnmente conocidas como boas o constrictoras; sus cuerpos son comprimidos lateralmente, con cabezas gruesas, mientras que sus cuellos son delgados, además de tener fosas labiales prominentes (Pérez & Moreno, 1988).

Según McDiarmid *et al.* (1999), varias especies de boidos neotropicales, como *Boa constrictor*, *Corallus hortulanus*, *Epicrates cenchría* y *Eunectes murinus*, presentan una extensa distribución geográfica, que abarcaba a América Central y del Sur; sin embargo, Duellman (2005) y Uetz & Hallermann (2014) restringen las especies de este género a los bosques tropicales del sureste brasileño y sur de Sudamérica.

Este género contiene nueve especies, de las cuales, tres han sido reportadas en Ecuador, una en la región Cisandina (*Corallus blombergi*) y dos en la región Transandina (*C. batesii* y *C. hortulanus*) (Henderson, 1997; Rodríguez-Guerra & Carvajal- Campos, 2013).

Henderson & Pauers (2012) y Pinto-Erazo & Medina-Rangel (2018) reportan cinco especies para Colombia: *Corallus annulatus* (Cope, 1876), con distribución para los departamentos de Chocó, Antioquia, Valle del Cauca, Nariño, Santander, Boyacá y Cundinamarca; *C. batesii* (Gray, 1860), en Caquetá, Amazonas, Meta, Tolima, Antioquia, Boyacá y Santander; *C. hortulanus* (Linnaeus, 1758), con distribución en Putumayo, Cauca, Santander, Valle del Cauca, Vichada, Meta, Casanare, Caquetá, Chocó, Magdalena y Vaupés; *C. ruschenbergerii* (Cope, 1875), en

los departamentos de Antioquia, Bolívar, César, Chocó, Córdoba, Magdalena, Sucre, Casanare, Meta, Guaviare, Vichada y Amazonas y *C. blombergi* (Rendahl & Vestergren, 1940), con distribución en el departamento de Nariño, municipio de Tumaco.

Corallus blombergi es una serpiente poco común, de hábitos nocturnos, que habita en bosques primarios y secundarios. Rendahl & Vestergren (1940) describen a *C. blombergi*, como una subespecie del complejo *C. annulatus* (Pinto-Erao & Medina-Rangel, 2018); sin embargo, Henderson *et al.* (2001) elevaron a *C. blombergi* a la categoría de especie, basándose en caracteres morfológicos y en su distribución geográfica.

En la descripción original de Rendahl & Vestergren (1940), diagnosticaron a *C. blombergi*, por la combinación de los siguientes caracteres: contacto nasal generalmente ausente, 76-86 escamas subcaudales, 50-55 hileras de escamas dorsales y 251-269 escamas ventrales, 6 infralabiales más loreales. El patrón de coloración dorsal es marrón claro, con manchas dorsales, generalmente de 7-8 escamas de ancho, en la parte media del cuerpo; el área central de las manchas dorsales es más pálida que el color de fondo dorsal (Ruiz & Valencia, 2001).

El objetivo de este trabajo fue documentar las nuevas localidades de *C. blombergi* para el departamento del Chocó, Colombia, a partir de la revisión de especímenes presentes en la Colección Científica de Referencia Zoológica- Herpetológica (COLZOOCH-H), de la universidad Tecnológica del Chocó.

Tabla 1. Conteo de escamas de los individuos que reposan en la Colección Herpetológica.

Número de Catalogo	Sexo	Escamas				
		Ventrales	Subcaudales	Dorsales	Supraoculares	Infralabiales
COLZOOCH-H 1213	F	254	83	41-49-25	7	6
COLZOOCH-H1539	F	258	79	40-49-25	7	6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la colección se encontraron dos ejemplares de la especie *Corallus blombergi*, registrados en zonas de bosque pluvial tropical; estos registros se convierten en una ampliación en la distribución geográfica de esta especie, extendiéndose 471,50 km, desde su último registro en Tumaco.

Los individuos registrados corresponden a dos hembras: la primera, identificada con el número de catálogo COLZOOCH-H 1213, colectada en el área de influencia de la Parcela Permanente de Investigación Biológica (PPIB), en el municipio de Unión Panamericana, corregimiento de Salero, con coordenadas geográficas 5°19'19,5" N 76°37'43,8" O, a 115 m s.n.m.; mientras, la segunda, identificada con el número de catálogo COLZOOCH-H 1539, fue colectada en el municipio de Quibdó, corregimiento de Pacurita, con coordenadas geográficas 5°41' N 76°40' O, a 53 m s.n.m.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó a partir del material depositado en la colección Herpetológica de la Universidad Tecnológica del Chocó (COLZOOCH-H), donde se seleccionaron todos los especímenes de las especies del género *Corallus*.

Los especímenes fueron identificados con base en los siguientes caracteres taxonómicos: número de escamas en la cabeza y el cuerpo, el patrón de coloración de la región dorsal y ventral. Para la determinación taxonómica, se tuvieron en cuenta las claves taxonómicas de Peters & Donoso-Barros (1970), Valencia & Morales (2005), Jaramillo-Martínez *et al.* (2013), los artículos de Pinto-Erao & Medina-Rangel (2018) y los libros de Savage (2002) y Henderson *et al.* (2001)

El conteo de las escamas preoculares, postoculares, subcaudales, labiales, dorsales y ventrales (Tabla 1), se realizó con un estereoscopio marca (Zeiss), lo que permitió mejorar la visibilidad y evitar errores; por otro lado, para determinar el sexo de los ejemplares, se siguieron los trabajos realizados por Fox & Dessauer (1962), Fox (1965), Bertona & Chiaraviglio (2009), Bertocchi *et al.* (2021) y Vasaruchapong (2014), además de realizar una incisión ventral en el tercio posterior del cuerpo, para descartar la presencia de Hemipenes.

(Figura 1). Estos individuos se convierten en el segundo registro para el país y la tercera y cuarta localidad, donde ha sido registrada la especie.

Para Henderson *et al.* (2001), esta especie es rara en la naturaleza, debido al pequeño número de registros de campo y a los escasos registros en los museos, por lo tanto, la información aquí plasmada aporta al conocimiento de esta especie y podrá ser tenida en cuenta a la hora de establecer estrategias de conservación.

Los dos individuos que reposan en la Colección de Referencia Zoológica- Herpetológica de la Universidad Tecnológica del Chocó presentan una diferencia significativa en la zona dorsal; el espécimen COLZOOCH-H 1213 tiene un color marrón, con machas aleatorias de color marrón oscuro, que se extienden por toda la cola y el vientre presenta un color marrón igual al de la región dorsal, a diferencia del espécimen COLZOOCH-H 1539, que presenta



Figura 1. Especímenes de *Corallus blombergi* depositados en la Colección Científica de Referencia Zoológica del Chocó, Universidad Tecnológica del Chocó, Diego Luis Córdoba. a) Vista lateral, se resaltan las escamas infralabiales + loreales; b) Vista dorsal que permite observar

en la región dorsal un color beige de fondo, con machas de color marrón, las cuales, forman figuras que finalizan antes de llegar a la región ventral, mientras que la región ventral es de color blanco tendiendo a amarillo. En ambos individuos, la cabeza se destaca del resto del cuerpo, los ojos son elípticos y sus medidas van desde 77 hasta 82 mm, en la región post anal y la cola tiende a ser delgada; lo anterior concuerda con la descripción realizada por Henderson *et al.* (2001).

El registro de una especie en determinada área, indica que este ecosistema cumple con sus requerimientos biológicos (alimento, reproducción), por tanto, el conocimiento detallado de la distribución geográfica de una especie es fundamental para la investigación en ecología, biogeografía y biología de la conservación (Brown *et al.* 1996; Graham & Hijmans, 2006).

Agradecimientos. Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica del Chocó Diego Luis Córdoba, a la Colección de Referencia Zoológica-Herpetología, a las Comunidades de Salero (Unión Panamericana) y Pacurita, (Quibdó) por su hospitalidad, a la Facultad de Ciencias Naturales y su Programa de Biología por todos sus aportes. **Conflicto de intereses:** El presente manuscrito fue preparado y revisado por todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados aquí presentados. **Financiación:** Este estudio fue financiado por la Universidad Tecnológica del Chocó

y por el grupo de Investigación en Herpetología. **Contribución de los autores:** Lucellis María Rivas Albornoza realizó la investigación y redacción del documento; Mayra Yulenis Rengifo Palacios llevó a cabo la escritura del borrador y análisis de los datos; Jhon Tailor Rengifo Mosquera ejecutó la Supervisión y Validación del documento final.

REFERENCIAS




- BERTONA, M.; CHIARAVIGLIO, M. 2009. Reproductive biology, mating aggregations, and sexual dimorphism of the argentine boa constrictor (*Boa constrictor occidentalis*). *Journal of Herpetology*. 37(3):510-516.
- BERTOCCHI, M.; BIGLIARDI, E.; PELIZZONE, I.; VETERE, A.; MANFREDI, S.; CATTAROSI, D.; RIZZI, M.; DI IANNI, F. 2021. Monitoring of the reproductive cycle in captive-bred female *Boa constrictor*: preliminary ultrasound observations. *Animals*. 11(11):3069. <https://doi.org/10.3390/ani11113069>
- BROWN, J.H.; STEVENS, G.C.; KAUFMAN, D.M. 1996. The geographic range: Size, shape, boundaries, and internal structure. *Annual review of ecology and systematics*. 27(1):597-623. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.27.1.597>

4. DUELLMAN, W.E. 2005. Cuzco Amazónico: The lives of amphibians and reptiles in an Amazonian rainforest. Comstock Publishing Associates (Hong Kong). 433p.
5. FOX, W. 1965. A comparison of the male urogenital systems of blind snakes, Leptotyphlopidae and Typhlopidae. *Herpetologica*. 21(4):241-256.
6. FOX, W.; DESSAUER, H.C. 1962. The single right oviduct and other urogenital structures of female *Typhlops* and *Leptotyphlops*. *Copeia*. 3:590-597.
7. GRAHAM, C.H.; HIJMANS, R.J. 2006. A comparison of methods for mapping species ranges and species richness. *Global Ecology & Biogeography*. 15(6):578-587. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2006.00257.x>
8. HENDERSON, R.W. 1997. A taxonomic review of the *Corallus hortulanus* Complex of Neotropical tree boas. *Caribbean Journal of Science* 33:198-221.
9. HENDERSON, R.W.; HÖGGREN, M.; LAMAR, W.W.; PORRAS, L.W. 2001. Distribution and variation in the treeboa *Corallus annulatus* (Serpentes: Boidae). *Studies on Neotropical Fauna and Environment*. 36(1):39-47. <https://doi.org/10.1076/snfe.36.1.39.8883>.
10. HENDERSON, R.W.; PAUERS, M.J. 2012. On the diets of neotropical treeboas (Squamata: Boidae: *Corallus*). *South American Journal of Herpetology* 7(2):172-180. <https://doi.org/10.2994/057.007.0207>
11. JARAMILLO-MARTÍNEZ, A.F.; VALENCIA-ZULETA, A.; CASTRO-HERRERA, F. 2013. *Imantodes chocoensis* Torres-Carvajal, Yáñez-Muñoz, Quirola, Smith, and Almendáriz, 2012 (Squamata: Dipsadidae): First records from Colombia. *Check List*. 9(5):1070-1071. <https://doi.org/10.15560/9.5.1070>
12. MCDIARMID, R.W.; CAMPBELL, J.A.; TOURE, T. 1999. Snakes species of the world: a taxonomic and geographical reference. Volumen 1. Ed. Herpetologists' League (Washington, D.C.). 511p.
13. PÉREZ, S.C.; MORENO, A. 1988. Ofidios de Colombia. Volumen 6. Museo regionale di Scienze Naturali. (Italia). 517p.
14. PETERS, J.A.; DONOSO-BARROS, R. 1970. Catalogue of the Neotropical Squamata. Part II. Lizards and amphisbaenians. *Bulletin of the United States National Museum*. 293p. <https://doi.org/10.5479/si.03629236.297.1>
15. PINTO-ERAZO, M.A.; MEDINA-RANGEL, G.F. 2018. First record of *Corallus blombergi* (Rendahl & Vestergren, 1941) (Serpentes, Boidae) from Colombia. *Check List*. 14(1):183-188. <https://doi.org/10.15560/14.1.183>
16. RENDAHL, H.; VESTERGREN, G. 1940. Notes on Colombian snakes. *Arkiv för Zoologi*. 16p.
17. RODRÍGUEZ-GUERRA, A.; CARVAJAL-CAMPOS, A. 2013. *Corallus hortulanus*. En: Torres-Carvajal, O., Salazar-Valenzuela, D.; Merino-Viteri, A. (eds.), *ReptiliaWebEcuador*. Version 2013.0.
18. RUIZ, A.; VALENCIA, J.H. 2001. Anfíbios, reptiles, aves y mamíferos de la Reserva Ecológica Mache-Chindul. En: Plan de manejo de la Reserva Ecológica Mache-Chindul. Fundación Jatun Sacha (Quito, Ecuador). p.123.
19. SAVAGE, J.M. 2002. The amphibians and reptiles of Costa Rica. A herpetofauna between two continents, between two seas. The University of Chicago Press. 954p.
20. VASARUCHAPONG, T. 2014. Snake reproductive system. *The Thai Journal of Veterinary Medicine*. 41(Supl. 1):89-91.
21. VALENCIA, J.H.; MORALES, M. 2005. Boa colombiana o del Chocó (*Corallus blombergi*). En: Carrillo, E.; Aldás, S.; Altamirano, M.; Ayala, F.; Cisneros, D.; Endara, A.; Márquez, C.; Morales, M.; Nogales, F.; Salvador, P.; Torres, M.L.; Valencia, J.; Villamarín, F.; Yáñez, M.; Zárate, P. (eds.). *Lista Roja de los Reptiles del Ecuador*. Ed. Fundación Novo Millenium. (Quito, Ecuador). p.19.
22. UETZ, P.; HALLERMANN, J. 2014. The Reptile Database. Disponible desde Internet en: <http://reptile-database.reptarium.cz/>



Mejoramiento de un método no comercial para la extracción de ADN de moscas de interés médico-legal

Improvement of a non-commercial method for DNA extraction from flies of medico-legal interest

Andrés F. Maya¹ ; Yesica Durango¹ ; Luz M. Gómez-Piñerez¹ ; Giovan F. Gómez^{2*} 

¹Tecnológico de Antioquia, Institución Universitaria, Grupo Bioforense. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: auxiliar.investigacion@tdea.edu.co; ydurang1@tdea.edu.co; lgomez@tdea.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia, sede de La Paz. La Paz - Valledupar, Colombia; e-mail: gfgomezg@unal.edu.co

*autor de correspondencia: gfgomezg@unal.edu.co

Cómo citar: Maya, A.F.; Durango, Y.; Gómez-Piñerez, L.M.; Gómez, G.F. 2023. Mejoramiento de un método no comercial para la extracción de ADN de moscas de interés médico-legal. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 26(1):e1946. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.1946>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: marzo 5 de 2021

Aceptado: octubre 6 de 2022

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

La obtención de ADN de moscas de interés médico-legal es de relevancia para una variedad de aplicaciones. Aunque existen métodos de extracción comerciales de ADN, su uso rutinario es limitado, en algunos escenarios. En este contexto, el uso de métodos no comerciales constituye una alternativa; sin embargo, su optimización es clave para mejorar el flujo de trabajo y los resultados. Este trabajo evaluó el impacto de variaciones a un método de precipitación salina sobre la concentración y la pureza del ADN recuperado. No se encontraron diferencias significativas en la concentración de ADN extraído entre los diferentes tiempos de incubación, probados durante la fase de extracción, mientras que el incremento en el volumen de etanol absoluto, en la fase de precipitación de ADN, mejoró significativamente la concentración de ADN obtenido. Las modificaciones propuestas reducen el tiempo de ejecución y la concentración de ADN obtenido comparado con el protocolo original.

Palabras clave: Entomología forense; Ácidos nucleicos; Artrópodos; Extracción de ADN; Optimización.

ABSTRACT

Obtaining DNA from flies of medico-legal interest is relevant for a variety of applications. Although commercial extraction methods offer optimal DNA, their routine use is limited in some settings. In this context, the use of non-commercial methods constitutes an alternative in laboratories with limited resources however, its

optimization is key to improving the workflow and the results. This work evaluated the impact of variations to a saline precipitation method on the concentration and purity of the recovered DNA. No significant differences were found in the concentration of extracted DNA between the different incubation times tested during the extraction phase. In contrast, the increased volume of absolute ethanol in the DNA precipitation phase significantly improved the concentration of DNA obtained. The proposed modifications reduce the runtime and DNA concentration obtained compared with the original protocol.

Keywords: Forensic entomology; Nucleic acids; Arthropods; DNA extraction; Optimization.

INTRODUCCIÓN

Los dípteros, en especial, las moscas calípteras de las familias Calliphoridae, Muscidae, Fanniidae y Sarcophagidae, son relevantes en la sucesión entomológica asociada a procesos de descomposición en cadáveres (Byrd & Tomberlin, 2020). La identificación taxonómica, a nivel de especie, es fundamental para el estudio de su biología, bionomía e historia evolutiva (De Queiroz, 2007) y, en el campo forense, para estimar el intervalo post-mortem, posibles traslados del cadáver, entre otras aplicaciones (Byrd & Tomberlin, 2020). Tradicionalmente, se han utilizado caracteres morfológicos para la identificación de los especímenes; sin embargo, la alta diversidad de especies (Stork, 2018), su similitud morfológica, la escasez de especialistas y de claves morfológicas, dificultan esta

tarea (Packer *et al.* 2009). El estudio del ADN y su aplicación en la identificación y confirmación molecular de especies permite superar estas dificultades y avanzar en el conocimiento de su biología, diversidad genética, entre otros aspectos X (Packer *et al.* 2009).

La obtención del ADN en una concentración y pureza apropiada es fundamental en el flujo de trabajo de un laboratorio de biología molecular para garantizar resultados óptimos, de acuerdo con la aplicación requerida (Kuhn *et al.* 2017; Psifidi *et al.* 2015). Para lograrlo, la técnica de extracción ideal debería ser económica, simple, proveer suficiente cantidad y calidad, así como no utilizar agentes peligrosos para el ambiente. La concentración de ADN final no solo depende del tipo de tejido utilizado y su tamaño, sino también de variables propias del método de extracción, que determinan, a su vez, la pureza del material genético (Ausubel *et al.* 2003). Existen métodos de extracción no comerciales y comerciales. Aunque los métodos comerciales logran recuperar ADN de alta calidad son costosos para el trabajo rutinario (Niu *et al.* 2008), en especial, en países en desarrollo. En este contexto, se han propuesto algunos métodos no comerciales que logran obtener ADN con resultados adecuados, a un bajo costo por muestra (Niu *et al.* 2008; Saavedra-Matiz *et al.* 2013; Xin & Chen, 2012).

Uno de los métodos no comerciales que se utiliza, como base para extraer ADN en moscas, es el de precipitación salina, propuesto por Collins *et al.* (1987), originalmente, aplicado en mosquitos del género *Anopheles* y modificado para el estudio de moscas (Cadavid, 2018). Este método, se caracteriza por ser más amigable con el medio ambiente que aquellos que utilizan fenol-cloroformo u otros reactivos peligrosos (Panigrahy *et al.* 2022).

Con relación al tipo de tejido, el par de patas medias es el tejido seleccionado, debido a que, usualmente, no son utilizadas para la identificación morfológica en estas moscas, lo que permite conservar los caracteres utilizados en taxonomía tradicional (Nakano & Honda, 2015; Aristizábal-Botero *et al.* 2016); sin embargo, algunos autores prefieren utilizar una parte de mayor tamaño, como el abdomen o el tórax, para lograr obtener mayor concentración de ADN (Guo *et al.* 2012). El tamaño del ejemplar, a nivel de especie, a su vez, se relaciona con el dimorfismo sexual, donde, en general, las hembras tienden a mayor tamaño que los machos, factor adicional a considerar durante la selección de especímenes (Benítez, 2013; Nuñez Rodríguez & Liria, 2017; Cortés-Suarez *et al.* 2021).

El primer paso del protocolo de Cadavid (2018) requiere una maceración del tejido, la cual, se puede lograr manualmente, con un macerador plástico o de manera semiautomática, consistente en una previa cristalización del tejido con nitrógeno líquido y posterior agitación mecánica del tejido con perlas hasta su pulverización en un agitador. Un reporte previo sugiere que el método semiautomático mejora significativamente la concentración de ADN obtenida, con relación a los métodos manuales, a partir de fitoplancton (Yuan *et al.* 2015); sin embargo, no se conocen datos en moscas. El impacto de otras variables del proceso de extracción de ADN relacionadas con el tamaño de los especímenes, los cuales, pueden diferir en

promedio entre las especies o la cantidad de etanol utilizada para la precipitación de ADN, no han sido probadas en este modelo.

El objetivo de este estudio fue comparar la concentración y la pureza del ADN obtenido de moscas de tres especies, pertenecientes a tres familias de importancia forense, cuando se utiliza el protocolo de Cadavid (2018), con modificaciones en el tiempo de incubación inicial en la fase de lisis, la maceración: manual versus agitación con perlas de vidrio o el volumen de alcohol utilizado durante la fase de precipitación de ADN. Adicionalmente, se evaluaron las diferencias potenciales en los resultados entre especímenes machos y hembras y entre el uso de las patas medias versus el abdomen, como tejido de partida para la extracción.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de la Colección Entomológica Tecnológico de Antioquia, CETdeA, se seleccionaron especímenes de *Peckia collusor* (Curran & Walley, 1934) (Sarcophagidae), *Biopyrellia bipuncta* (Wiedemann, 1830) (Muscidae) y *Fannia pusio* (Wiedemann, 1830) (Fanniidae), los cuales, estuvieron conservados en etanol al 80 %, entre 3 y 8 años. Los especímenes, se identificaron morfológicamente con claves taxonómicas especializadas (Carvalho & Mello-Patiu, 2008; Buenaventura & Pape, 2013; Durango & Ramírez-Mora, 2019; Grisales & de Carvalho, 2019). Se procesó un total de 180 especímenes, divididos en cinco grupos experimentales (Tabla 1). El ADN, se obtuvo mediante el protocolo descrito por Cadavid (2018), que consiste en cuatro fases lisis: i) maceración del tejido, mediante la cristalización del tejido con nitrógeno líquido y maceración de las muestras, en un homogenizador de tejidos (Tissuelyser II, QIAGEN), durante cinco minutos, a 300 frecuencias por segundo, exceptuando el grupo experimental, donde se comparó la maceración con perlas vs manual; ii) ruptura celular, mediante el buffer de lisis (NaCl 0,1 mol/l; Sucrosa 0,1 mol/l; Tris 0,1 mol/l; EDTA 0,05 mol/l y SDS 0.5 %); iii) incubación de las muestras con el buffer de lisis en baño seco, a 56 °C, durante 2 horas o toda una noche, según el grupo experimental y iv) precipitación del ADN con etanol en diferentes volúmenes (1:1, 1:3, 1:5 y 1:8).

La medición de la concentración de ADN (ng/μl) y su pureza (A260/280), se realizó para cada muestra por triplicado, en un espectrofotómetro NanoDrop®, con un volumen de 2 μl por cada muestra ND-1000 (Thermo Scientific, USA), según las instrucciones del fabricante y el dato analizado corresponde al promedio de las mediciones por muestra. Para los primeros cuatro grupos experimentales, los datos se compararon mediante la prueba de Mann-Whitney-Wilcoxon, mientras que las diferencias potenciales en los datos del grupo cinco, se evaluaron con la prueba de Kruskal-Wallis. Adicionalmente, se evaluaron las posibles diferencias en cantidad de ADN obtenido entre las especies mediante ANOVAs de dos factores. Se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey en los casos de existencia de diferencias significativas ($p < 0,05$), para discriminar las diferencias entre las medias. Para el análisis estadístico, se utilizaron los programas GraphPad Prism 5 (GraphPad Software Inc., San Diego, CA, EUA) y PAST v. 3.25 (Hammer *et al.* 2001).

Tabla 1. Grupos experimentales y muestras utilizadas para la extracción de ADN de moscas.

Grupo experimental	Descripción	Tejido	Especie (n de especímenes*)	Resultado
1	Machos <i>versus</i> hembras	2 patas medias	<i>Peckia collusor</i> (n=10) <i>Biopyrellia bipuncta</i> (n=10) <i>Fannia pusio</i> (n=10)	n.s.
2	Maceración con perlas <i>versus</i> maceración manual	2 patas medias	<i>Peckia collusor</i> (n=10) <i>Biopyrellia bipuncta</i> (n=10) <i>Fannia pusio</i> (n=10)	n.s.
3	Patas <i>versus</i> abdomen	2 patas medias o abdomen	<i>Peckia collusor</i> (n=10) <i>Biopyrellia bipuncta</i> (n=10) <i>Fannia pusio</i> (n=10)	p < 0,05
4	2 h <i>versus</i> 12 h de incubación a 56 °C del tejido con buffer de lisis + proteinasa K	2 patas medias	<i>Peckia collusor</i> (n=10) <i>Biopyrellia bipuncta</i> (n=10) <i>Fannia pusio</i> (n=10)	n.s.
5	Volumen de etanol absoluto para precipitación de ADN: 1:1, 1:3, 1:5 y 1:8	2 patas medias	<i>Peckia collusor</i> (n=20) <i>Biopyrellia bipuncta</i> (n=20) <i>Fannia pusio</i> (n=20)	p=0,03

* El número de especímenes en cada una de las especies fue equitativamente dividido, de acuerdo con la descripción de cada grupo experimental.

n.s.: no se encontraron diferencias estadísticamente significativas.

Se reporta el *p* valor de las comparaciones, en donde se encontraron diferencias estadísticamente significativas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los grupos experimentales uno y dos (sexo y tipo de maceración, respectivamente), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la concentración de ADN, ni en su pureza ($p > 0,05$). El grupo experimental tres (patas *versus* abdomen) presentó diferencias en la cantidad ($p < 0,05$), pero no en la pureza de ADN ($p = 0,78$); la extracción de ADN a partir de abdomen rindió casi cinco veces más ADN (Me= 508,3 ng/μl), en comparación con la de las patas (Me= 108,9 ng/μl). Para el grupo experimental cuatro, el tiempo de incubación de la muestra en baño seco, a 56 °C, tampoco generó diferencias significativas en la cantidad y la pureza del ADN recuperado.

Finalmente, el grupo experimental cinco, donde se comparó el efecto de diferentes volúmenes de etanol absoluto para la precipitación de ADN, rindió diferencias significativas, tanto en la cantidad

($p = 0,03$) como en la pureza de ADN ($p < 0,0001$); la dilución 1:8 mejoró sustancialmente el ADN obtenido en las muestras analizadas. El análisis de varianza de dos factores mostró diferencias estadísticamente significativas en la concentración de ADN recuperada en todos los grupos experimentales, de acuerdo con la especie ($p < 0,0001$). A partir del par de patas medias, se recuperó, en promedio, 22,6 ng/μl de ADN por espécimen de *Fannia pusio*, mientras que para *Biopyrellia bipuncta* y *Peckia collusor*, tres (67,7 ng/μl) y diez veces más (227,7 ng/μl), respectivamente.

Este trabajo evidenció el impacto de variable extrínsecas, tales como la especie, relacionada con su tamaño corporal, así como el tipo de tejido utilizado para la extracción de ADN, en la concentración de ADN obtenido. Además, el impacto de variables intrínsecas del método de extracción, como el volumen de etanol absoluto utilizado durante la fase de precipitación de ADN, en la eficiencia de la extracción de ADN en moscas de importancia médico-legal,

utilizando el protocolo descrito por Cadavid (2018). Por otra parte, se evidenció que otros factores, como el sexo, el tipo de maceración y el tiempo de incubación en la fase de lisis, no resultaron en diferencias significativas en la concentración y la pureza del ADN obtenido.

Las diferencias en el tamaño corporal de las tres especies evaluadas explican los resultados observados en la concentración de ADN obtenida; por ejemplo, *Fannia pusio* es una mosca pequeña, con una longitud entre 2,5 a 3,5 mm, mientras que las especies de la familia Sarcophagidae, a la que pertenece *Peckia collusor*, pueden medir entre 2 y 25 mm (Carvalho & Mello-Patiu, 2008; Paseto *et al.* 2019). Adicionalmente, en correspondencia con el tamaño del tejido, en todas las especies analizadas, se obtuvo mayor concentración de ADN cuando se usó el abdomen, que a partir del par de patas medias. Aun así, la cantidad de ADN obtenida a partir del par de patas medias (108,9 ng/μl), se considera suficiente para el éxito de la técnica PCR, con la ventaja de preservar el espécimen y conservar información de estructuras, que son de gran relevancia taxonómica, aspecto óptimo en el marco de estrategias de identificación molecular (Prendini *et al.* 2002; Ratnasingham & Hebert, 2007); no obstante, se requiere la evaluación de otras variables que pueden afectar la PCR, como la presencia de inhibidores en el extracto de ADN obtenido. Los valores A260/280, una medida de la pureza del ADN extraído, en todos los grupos experimentales, fue inferior a 1,8, dato que sugiere contaminación potencial por proteínas o sales (Boesenberg-Smith *et al.* 2012). Aunque la pureza del ADN con este método de precipitación salina no es alta, ha sido de utilidad para la amplificación exitosa de diversos fragmentos de ADN nucleares y mitocondriales, tanto en moscas como en otros dípteros (Gómez *et al.* 2015), lo que indica que no representa una limitante para implementar este protocolo de forma rutinaria.

Los resultados de este estudio sugieren que el incremento de la relación entre el volumen de etanol y el extracto de ADN en la fase de precipitación del ADN mejora, sustancialmente, la concentración final de este ácido nucleico en las muestras. La molécula de ADN está cargada negativamente, debido a los residuos de fosfato y se encuentra altamente hidratado en una fase acuosa. El etanol altera las capas de hidratación del ADN y permite que los residuos de fosfato formen enlaces iónicos con cationes en el solvente y cuando la concentración de etanol se aproxima al 70 % en presencia de una alta concentración de sales, las fuerzas repulsivas entre las cadenas de polinucleótidos, se reducen hasta precipitar el ADN (Green & Sambrook, 2016), resultando en un incremento en la eficiencia del método utilizado en este estudio.

Es de resaltar que el tiempo de incubación del tejido a 56 °C con buffer de lisis y proteinasa K, no afectó la cantidad de ADN recuperado. Este resultado permite disminuir el tiempo de incubación en el baño seco de las muestras, con la consecuente ventaja de reducir el gasto de energía del equipo y el tiempo empleado durante la extracción de ADN. Similarmente, los hallazgos no evidenciaron que el método de maceración semiautomático mejorara el rendimiento en la concentración de ADN obtenido; este resultado es contrastante con un estudio previo en artrópodos, donde este tipo de maceración

mejora el rendimiento (Ammazzalorso *et al.* 2015). Aun así, para la extracción de ADN de moscas con el protocolo de Cadavid (2018), se recomienda utilizar el método semiautomático, debido a que se reduce el tiempo del protocolo en este paso, el riesgo de contaminación de las muestras y se eliminan factores de riesgo relacionados con el desarrollo de síndrome del túnel carpiano (El-Helaly *et al.* 2017) y otras tendinopatías, potencialmente, asociados a actividades, como la maceración manual de las muestras durante este proceso.

La extracción de ADN a partir de un tejido de mayor tamaño, así como la reducción del tiempo de incubación durante la fase de lisis celular y el incremento en el volumen de etanol absoluto en la fase final de precipitación de ADN, mejoran significativamente la concentración de ADN obtenido, al utilizar este protocolo no comercial en moscas de interés médico-legal. Este método modificado es más amigable con el medio ambiente en comparación con otros métodos no comerciales, basados en fenol-cloroformo y otros reactivos más tóxicos y, además, permitió la recuperación de ADN a partir de especímenes almacenados en etanol al 80 %, con una antigüedad de hasta ocho años, insumo clave para el desarrollo de estudios de identificación y sistemática molecular.

Agradecimientos. A miembros del grupo de investigación Bioforense, por la recolección y el mantenimiento de especímenes de la Colección Entomológica Tecnológico de Antioquia, CETdeA. Al Centro Nacional de Secuenciación Genómica, Universidad de Antioquia y al Grupo de Biología de Sistemas, Facultad de Medicina, Universidad Pontificia Bolivariana, por su colaboración en el préstamo de equipos. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución autores:** Todos los autores participaron en la escritura, la revisión y edición del manuscrito. Además, Andres F. Maya aportó con la conceptualización y la metodología de la investigación, Yesica Durango trabajó en la metodología de la investigación y la validación de los datos, Luz M. Gómez-Piñerez colaboró con la consecución de recursos, y la metodología de la investigación y Giovan F. Gómez contribuyó con la conceptualización, la metodología de la investigación, y la administración y supervisión del proyecto. **Financiación:** Este trabajo fue financiado por el Comité para el Desarrollo de la Investigación –CODEI, Tecnológico de Antioquia, Institución Universitaria.

REFERENCIAS

1. AMMAZZALORSO, A.D.; ZOLNIK, C.P.; DANIELS, T.J.; KOLOKOTRONIS, S.-O. 2015. To beat or not to beat a tick: comparison of DNA extraction methods for ticks (*Ixodes scapularis*). Peer J. 3:e1147. <https://doi.org/10.7717/peerj.1147>
2. ARISTIZÁBAL-BOTERO, Á.; GROOT, H.; CAMACHO, G.P.; REALPE, E.; PAREDES, M. 2016. Análisis de las secuencias citocromo oxidasa I y espaciadores ribosomales transcritos internos (ITS1 y 2 y 5.8S) para la identificación de

- especies de interés forense. *Revista Entomología Mexicana*. 3:695-706.
3. AUSUBEL, F.M.; BRENT, R.; KINGSTON, R.E.; MOORE, D.D.; SEIDMAN, J.G.; SMITH, J.A.; STRUHL, K. 2003. *Current protocols in molecular biology*. Ed. John Wiley & Sons, Inc. (Estados Unidos). 4648p.
 4. BENÍTEZ, H.A. 2013. Sexual dimorphism. In: Moriyama, H. (ed.). *Sexual Dimorphism*. IntechOpen (Croatia). p.35-50.
 5. BOESENBERG-SMITH, K.A.; PESSARAKLI, M.M.; WOLK, D.M. 2012. Assessment of DNA Yield and Purity: An Overlooked Detail of PCR Troubleshooting. *Clinical Microbiology Newsletter*. 34(1):3-6.
<https://doi.org/10.1016/j.clinmicnews.2011.12.002>
 6. BUENAVENTURA, E.; PAPE, T. 2013. Revision of the New World genus *Peckia* Robineau-Desvoidy (Diptera: Sarcophagidae). *Zootaxa*. 3622(1):1-87.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.3622.1.1>
 7. BYRD, J.H.; TOMBERLIN, J.K. 2020. *Forensic entomology: The utility of arthropods in legal investigations*. Third edition. CRC Press. 620p.
 8. CADAVID, I.C. 2018. Extracción de ADN a partir de insectos con buffer de macerado. En: Gómez P, L.M.; Gómez G., G.F. (eds). *Del campo al laboratorio: Integración de procedimientos para el estudio de moscas*. Sello Editorial Publicar-T (Medellin, Colombia). p.87-91.
 9. CARVALHO, C.J.B.; MELLO-PATIU, C.A. 2008. Key to the adults of the most common forensic species of Diptera in South America. *Revista Brasileira de Entomologia*. 52(3):390-406.
<https://doi.org/10.1590/S0085-56262008000300012>
 10. COLLINS, F.H.; MENDEZ, M.A.; RASMUSSEN, M.O.; MEHAFFEY, P.C.; BESANSKY, N.J.; FINNERTY, V. 1987. A ribosomal RNA gene probe differentiates member species of the *Anopheles gambiae* complex. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. 37(1):37-41.
<https://doi.org/10.4269/ajtmh.1987.37.37>
 11. CORTÉS-SUAREZ, L.; DURANGO, Y.S.; GÓMEZ, G.F. 2021. Dimorfismo sexual en la geometría alar de *Musca domestica* (Diptera: Muscidae) de Colombia. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*. 80(1):81-88.
<https://doi.org/10.25085/rsea.800109>
 12. DE QUEIROZ, K. 2007. Species concepts and species delimitation. *Systematic Biology*. 56(6):879-886.
<https://doi.org/10.1080/10635150701701083>
 13. DURANGO, Y.; RAMÍREZ-MORA, M. 2019. *Fannia Robineau-Desvoidy* (Diptera: Fanniidae) of Colombia: New species, identification key and updated checklist. *Zootaxa*. 4604(2):301-325.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4604.2.4>
 14. EL-HELALY, M.; BALKHY, H.H.; VALLENIUS, L. 2017. Carpal tunnel syndrome among laboratory technicians in relation to personal and ergonomic factors at work. *Journal of occupational health*. 59(6):513-520.
<https://doi.org/10.1539/joh.16-0279-OA>
 15. GÓMEZ, G.F.; BICKERSMITH, S.A.; GONZÁLEZ, R.; CONN, J.E.; CORREA, M.M. 2015. Molecular taxonomy provides new insights into *Anopheles* species of the neotropical *Arribalzagia* series. *PLoS One*. 10(3):1-17.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119488>
 16. GREEN, M.R.; SAMBROOK, J. 2016. Precipitation of DNA with ethanol. *Cold Spring Harbor Protocols*. 2016(12):1116-1120.
<https://doi.org/10.1101/pdb.prot093377>
 17. GRISALES, D.; DE CARVALHO, C.J.B. 2019. Highland biodiversity of Fanniidae (Insecta, Diptera): Fourteen new species from the Andes and Central America. *Zootaxa*. 4551(3):330-360.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4551.3.4>
 18. GUO, Y.D.; CAI, J.F.; MENG, F.M.; CHANG, Y.F.; GU, Y.; LAN, L.M.; LIANG, L.; WEN, J.F. 2012. Identification of forensically important flesh flies based on a shorter fragment of the cytochrome oxidase subunit I gene in China. *Medical and Veterinary Entomology*. 26(3):307-313.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2915.2011.01003.x>
 19. HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. 2001. Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica*. 4(1):1-9.
 20. KUHN, R.; BÖLLMANN, J.; KRAHL, K.; BRYANT, I.M.; MARTIENSSEN, M. 2017. Comparison of ten different DNA extraction procedures with respect to their suitability for environmental samples. *Journal of Microbiological Methods*. 143:78-86.
<https://doi.org/10.1016/j.mimet.2017.10.007>
 21. NAKANO, A.; HONDA, J. 2015. Use of DNA sequences to identify forensically important fly species and their distribution in the coastal region of Central California. *Forensic Science International*. 253:1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.05.001>
 22. NIU, C.; KEBEDE, H.; AULD, D.L.; WOODWARD, J.E.; BUROW, G.; WRIGHT, R.J. 2008. A safe inexpensive method to isolate high quality plant and fungal DNA

- in an open laboratory environment. *African Journal Biotechnology*. 7(16):2818-2822.
23. NUÑEZ RODRÍGUEZ, J.; LIRIA, J. 2017. Sexual wing shape dimorphism in *Piophilidae* (Linnaeus, 1758 Diptera: Piophilidae). *Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology*. 11(2):217-221.
<https://doi.org/10.5958/0973-9130.2017.00100.1>
24. PACKER, L.; GIBBS, J.; SHEFFIELD, C.; HANNER, R. 2009. DNA barcoding and the mediocrity of morphology. *Molecular Ecology Resources*. 9(Suppl. 1):42-50.
<https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2009.02631.x>
25. PANIGRAHY, N.; PRIYADARSHINI, A.; SAHOO, M.M.; VERMA, A.K.; DAVEREY, A.; SAHOO, N.K. 2022. A comprehensive review on eco-toxicity and biodegradation of phenolics: Recent progress and future outlook. *Environmental Technology & Innovation*. 27:102423.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102423>
26. PASETO, M.L.; DE FARIA, L.S.; MENDES, J.; LINHARES, A.X. 2019. Diversity of Sarcophagidae (Insecta, Diptera) associated with decomposing carcasses in a rural area of the State of Minas Gerais, Brazil. *EntomoBrasilis*. 12(3):118-125.
<https://doi.org/10.12741/ebrasilis.v12i3.842>
27. PRENDINI, L.; HANNER, R.; DESALLE, R.O.B. 2002. Obtaining, storing and archiving specimens and tissue samples for use in molecular studies. In: DeSalle, R.; Giribet, G.; Wheeler, W. (eds). *Techniques in Molecular Systematics and Evolution*. Springer. p.176-248.
28. PSIFIDI, A.; DOVAS, C.I.; BRAMIS, G.; LAZOU, T.; RUSSEL, C.L.; ARSENO, G.; BANOS, G. 2015. Comparison of eleven methods for genomic DNA extraction suitable for large-scale whole-genome genotyping and long-term DNA banking using blood samples. *PLoS ONE*. 10(1):e0115960.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115960>
29. RATNASINGHAM, S.; HEBERT, P.D.N. 2007. Bold: The barcode of life data system. *Molecular Ecology Notes*. 7(3):355-364.
<https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2007.01678.x>
30. SAAVEDRA-MATIZ, C.A.; ISABELLE, J.T.; BISKI, C.K.; DUVA, S.J.; SWEENEY, M.L.; PARKER, A.L.; YOUNG, A.J.; DIANTONIO, L.L.; KREIN, L.M.; NICHOLS, M.J.; CAGGANA, M. 2013. Cost-effective and scalable DNA extraction method from dried blood spots. *Clinical Chemistry*. 59(7):1045-1051.
<https://doi.org/10.1373/clinchem.2012.198945>
31. STORK, N.E. 2018. How many species of insects and other terrestrial arthropods are there on earth? *Annual Review of Entomology*. 63:31-45.
<https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043348>
32. XIN, Z.; CHEN, J. 2012. A high throughput DNA extraction method with high yield and quality. *Plant Methods*. 8:26.
<https://doi.org/10.1186/1746-4811-8-26>
33. YUAN J.; LI, M.; LIN, S. 2015. An improved DNA extraction method for efficient and quantitative recovery of phytoplankton diversity in natural assemblages. *PLoS One*. 10(7):e0133060.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133060>



An erratum for article: Effect of incorporation of aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) on the physicochemical and bromatological characteristics and shelf-life of buffalo milk yogurt

Fe de erratas al artículo: Efecto de la incorporación de aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) en las características fisicoquímicas, bromatológicas y vida útil de un yogurt de leche de búfala

Montalvo-Puente, A.; Montero-Castillo, P.; Alvarez-Badel, B. 2022. Effect of incorporation of aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) on the physicochemical and bromatological characteristics and shelf-life of buffalo milk yogurt. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(1):e2019. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n1.2022.2019>

When the above article was first published, Alba Montalvo Puente's affiliation was wrong, the correct one is Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Montería, Centro de Ciencia Básica, Programa de Ingeniería Agroindustrial, Grupo de investigación en desarrollo y aplicación de nuevos materiales (DANM).

The editor of the Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica apologues for this error.

Cuando se publicó por primera vez el artículo mencionado, la afiliación de Alba Montalvo Puente estaba incorrecta. Su afiliación correcta es Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Montería, Centro de Ciencia Básica, Programa de Ingeniería Agroindustrial, Grupo de investigación en desarrollo y aplicación de nuevos materiales (DANM).

El editor de la Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica se disculpa por este error.

Pares evaluadores

El Comité Editorial y el Comité Científico desean expresar sus agradecimientos a todas las personas que colaboraron en la evaluación de manuscritos, entre los meses de enero a junio de 2023. Nuestra gratitud a su invaluable colaboración.

En reconocimiento publicamos a continuación sus nombres:

1. Ph.D. Edith Aguila Alcantara, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, **Cuba**
2. Ph.D. Manuel Álvarez Vera, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, **Ecuador**
3. Ph.D. Edwin Javier Barrios Gómez, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Zacatepec, **México**
4. M.Sc. Luis Gabriel Bautista Montealegre, Corporación colombiana de investigación agropecuaria, Mosquera, **Colombia**
5. Ph.D. Israel Cantú Silva, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, **México**
6. Ph.D. Artemio Cruz León, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, **México**
7. Ph.D. Luis Hernando Estupiñán, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Bogotá, **Colombia**
8. Ph.D. Manuel Fortis Hernández, Tecnológico Nacional de México, Torreón, **México**
9. Ph.D. Gehard Fischer, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, **Colombia**
10. Ph.D. Daury García Pulido, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, **México**
11. Ph.D. Victor Manuel Gelvez Ordoñez, Universidad de Pamplona, Pamplona, **Colombia**
12. Ph.D. José Gil Marín, Universidad de Oriente, Cumaná, **Venezuela**
13. Ph.D. Edilberto Guevara Pérez, Universidad de Carabobo, Valencia, **Venezuela**
14. Ph.D.(c) Melissa Lis Gutiérrez, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, **Colombia**
15. Ph.D. Roque Interdonato, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, **Argentina**
16. Ph.D. Daniela Alejandra Lambaré, Universidad Nacional de Jujuy, San Salvador de Jujuy, **Argentina**
17. Ph.D. Liliana Haydée Lound Romani, Universidad Nacional de Entre Ríos, Entre Ríos, **Argentina**
18. Ph.D. Jessica Manzano García, Administración de Parques Nacionales, Buenos Aires, **Argentina**
19. Ph.D. Marco Antonio Martínez Cuestas, Universidad de San Carlos de Guatemala, Petén, **Guatemala**
20. M.Sc. Johm Wilson Martínez Osorio, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, **Colombia**
21. M.Sc. Guido Fabian Medina Rangel, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, **Colombia**
22. Ph.D. Segundo Ramiro Mora Quilismal, Universidad Politécnica Estatal del Carchi, Tulcán, **Ecuador**
23. Ph.D. Andrés Ochoa Meza, Universidad de Sonora, Sonora, **México**
24. M.Sc. Helber Milton Orjuela Matta, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Bogotá, **Colombia**
25. Ph.D. Caros Albeiro Pacheco Bustos, Universidad del Norte, Puerto Colombia, **Colombia**
26. Ph.D. Reynaldo Payano Almánzar, INRHED SPA, Santiago, **Chile**
27. Ph.D. David Román Sánchez Chipres, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, **México**
28. Ph.D. Hugo Alexander Rondón Quintana, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, **Colombia**
29. Ph.D. Doris Rosero, Universidad de Antioquia, Medellín, **Colombia**
30. Ph.D. Ely Fernando Sacon Vera, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Calceta, **Ecuador**
31. Ph.D. Fernando Sánchez Mora, Universidad Técnica De Manabí, Portoviejo, **Ecuador**
32. Ph.D. Antonio José Steidle Neto, Universidade Federal de São João del-Rei, Sete Lagoas, **Brasil**
33. Ph.D. Estanis Torres, Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias, Barcelona, **España**
34. Ph.D. Jorge Hernán Valencia Vélez, Fundación Herpetológica Gustavo Orcés, Quito, **Ecuador**
35. Ph.D. Franco Alirio Vallejo Cabrera, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, **Colombia**
36. Ph.D. Soledad Camila Villamil, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, **Argentina**

¡Conoce nuestra oferta Académica!

Facultades

- Ciencias
- Ciencias de la Educación
- Ciencias Administrativas y Comerciales
- Ciencias de la Salud
- Ciencias Agropecuarias
- Ciencias Jurídicas
- Ciencias Ambientales y de la Sostenibilidad



PREGRADO



POSGRADO



@somosudca



3182001447

www.udca.edu.co

Calle 222
Calle 222 # 55 - 37
PBX (60 1) 6684700
Bogotá, Colombia

Avenida Boyacá
Avenida Boyacá # 66 A - 61
PBX (60 1) 6684700 Ext. 501
Bogotá, Colombia

Alianza CTB - U.D.C.A
Carrera 21 # 53D - 35
PBX (60 1) 3483061
Bogotá, Colombia

¡ CONOCE NUESTRA
NUEVA SEDE !

CARTAGENA

Barrio Pie del Cerro
Cra. 31 No. 18B-55
(60 1) 668 4700 ext 402



