

ISSN-0120-0275
ISSN-2711-3477 (En línea)
DOI-10.38141/10778

Cenicafé

Revista del
Centro Nacional de Investigaciones de Café



**Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia**

Volumen 75 Número 2

Julio - Diciembre 2024



**Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia**

COMITÉ NACIONAL

Ministro de Hacienda y Crédito Público

Diego Alejandro Guevara Castañeda

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural

Martha Viviana Carvajalino Villegas

Ministro de Comercio, Industria y Turismo

Luis Carlos Reyes Hernández

Director del Departamento Nacional de Planeación

Alexander López

Asesor del Gobierno en Asuntos Cafeteros

Rogelio Andrés Rodríguez Castillo

REPRESENTANTES GREMIALES

Período 1° enero/2023 - 31 diciembre/2026

Jorge Alberto Posada Saldarriaga (Antioquia)

José Alirio Barreto Buitrago (Boyacá)

Eugenio Vélez Uribe (Caldas)

Daniilo Reinaldo Vivas Ramos (Cauca)

Juan Camilo Villazón Tafur (Cesar-Guajira)

Javier Bohórquez Bohórquez (Cundinamarca)

Ruber Bustos Ramírez (Huila)

Javier Mauricio Tovar Casas (Magdalena)

Jesús Armando Benavides Portilla (Nariño)

Armando Amaya Álvarez (Norte de Santander)

Carlos Alberto Cardona Cardona (Quindío)

Luis Miguel Ramírez Colorado (Risaralda)

Héctor Santos Galvis (Santander)

Carlos Sánchez Serrano (Tolima)

Camilo Restrepo Osorio (Valle)

Gerente General

Germán Alberto Bahamón Jaramillo

Gerente de Operaciones

Carlos Arturo Azuero Perdomo

Gerente Financiero y Recursos Organizacionales

Reynaldo Díaz Medina

Gerente Comercial

Esteban Ordoñez Simmonds

Gerente Técnico

Gerardo Montenegro Paz

Director Investigación Científica y Tecnológica

Álvaro León Gaitán Bustamante

Uso del material de esta revista:

Aquellas personas que deseen usar en otras publicaciones, ilustraciones o datos publicados en la Revista Cenicafé, deben obtener el permiso del Centro Nacional de Investigaciones de Café y del autor del artículo y reconocer por escrito los créditos a la Revista Cenicafé como fuente original del material.

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.

La Revista Cenicafé, órgano divulgativo del Programa de Investigación Científica de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y el Fondo Nacional del Café se publica semestralmente.

DOI - <https://doi.org/10.38141/rev.cenicafe75-2>

Editada en diciembre de 2024

Tel: 606 + 8500707

E-mail: cenicafe@cafedecolombia.com

www.cenicafe.org

Cenicafé

Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café

Manizales - Caldas - Colombia

VOL. 75

JULIO - DICIEMBRE 2024

No. 2

CONTENIDO

ASOCIACIÓN ENTRE CRECIMIENTO VEGETATIVO Y CARGA DE FRUTOS EN FORMACIÓN, CON PROGENIES DE <i>Coffea arabica</i> L. Andrés Felipe León-Burgos; José Raúl Rendón; Alexander Jaramillo Jiménez; Luis Carlos Imbachí; Claudia Patricia Flórez Ramos.....	7
RELATIONSHIP BETWEEN VEGETATIVE GROWTH AND BORE PINHEAD FRUIT LOADS FOR <i>Coffea arabica</i> L PROGENIES	7
COMPOSICIÓN QUÍMICA E INOCUIDAD DE <i>Coffea arabica</i> L. procesado por vía seca en Colombia. Claudia Patricia Gallego Agudelo; Luz Fanny Echeverri Giraldo; Jenny Paola Pabón Usaquén; Valentina Osorio Pérez.....	22
CHEMICAL COMPOSITION AND SAFETY OF DRY PROCESSED <i>Coffea arabica</i> L IN COLOMBIA	22
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CAFÉ PERGAMINO SECO Y ALMENDRA VERDE MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CERCANO. Claudia R. Gómez Parra; Aristófeles Ortiz; Jenny Paola Pabón Usaquén; Valentina Osorio Pérez.....	37
DETERMINATION OF MOISTURE CONTENT OF DRY PARCHMENT COFFEE AND GREEN COFFEE BY NEAR INFRARED SPECTROSCOPY	37
DIAGNÓSTICO DE LA ACIDEZ DEL SUELO EN LA ZONA CAFETERA DE COLOMBIA. Siavosh Sadeghian Khalajabadi; Luz Adriana Lince Salazar.....	49
SOIL ACIDITY DIAGNOSIS IN THE COFFEE-GROWING REGION OF COLOMBIA	49
NOTA CIENTÍFICA: EVALUACIÓN DE UN MÉTODO RÁPIDO PARA LA EXTRACCIÓN DE ADN A PARTIR DE AISLAMIENOS DE <i>Colletotrichum</i> spp. Camila A. Gutiérrez Góngora; Rosa Lilia Ferrucho; Gustavo Adolfo Marín-Ramírez.....	66
EVALUATION OF A RAPID METHOD FOR DNA EXTRACTION FROM <i>Colletotrichum</i> spp. ISOLATES	66

COMITÉ EDITORIAL

Marco Aurelio Cristancho A.	Ph.D. Biología Molecular. Fitopatología, Cenicafé
Carmenza Esther Góngora B.	Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé
Aída Esther Peñuela M.	Ph.D. Ing. Alimentos. Poscosecha, Cenicafé
Diana María Molina V.	Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético, Cenicafé
Luis Fernando Salazar G.	Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé






MIEMBROS EXTERNOS

Alefsi David Sánchez Reinoso	Corporación Colombiana de investigación Agropecuaria-AGROSAVIA, Nataima.
Ana María Castro Triana	Universidad de la Salle
Carla Rodrigues	Grupo Nabeiro
Claudia Marcela Zapata	Smurfit Kappa
Édgar Hincapié	Cenicaña
Fábio DaMatta	Universidade Federal de Viçosa
Javier Mantilla	Universidad Católica de Manizales
Juan Carlos Herrera	Nestlé
Julián Valencia	Augura
Juliana Jaramillo	Rainforest Alliance
Laura Osorno Bedoya	Colegio Mayor de Antioquia
Lucio Navarro	Universidad de Texas
Ma. Dolores del Castillo	CSIC
Maryeimy Varón López	Universidad del Tolima
Rolando Tito Bacca	Universidad del Tolima
Susana Velásquez	Universidad de UTAH

REVISORES REVISTA CENICAFÉ VOLUMEN 75 NO 1 Y NO 2

Álvaro L. Gaitán B.	Ph.D. Cenicafé FNC
Marco A. Cristancho A.	Ph.D. Cenicafé FNC
Nelson Rodríguez V.	Ph.D. Cenicafé FNC
Luis Fernando Salazar	Ph.D. Cenicafé FNC
Santiago Jaramillo	candidato a Ph.D. Cenicafé FNC
Vanessa Catalina Díaz P.	M.Sc. Cenicafé FNC
Carlos Andrés Unigarro Muñoz	M.Sc. Cenicafé FNC
Myriam Cañón H.	M.Sc. Cenicafé FNC
Beatriz Eugenia Mira R.	Estadístico Cenicafé FNC
Carlos Alfonso Tibaduiza V.	M.Sc. Comité del Tolima FNC
Delio Rodrigo Alarcón S.	Ingeniero Químico, Almacafé FNC
Alfonso Cubillos V.	Ph.D. Agrosavia
Cristina Inés Álvarez B.	Ph.D. Universidad de Caldas
Edilson Moreno C.	Ph.D. Universidad Nacional sede Medellín
Mónica Quintero	Ph.D. Food Science
Adriana González A.	Ph.D. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá
Jorge J. Vélez U.	Ph.D. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
Mayra Alejandra Toro Herrera	Ph.D. University of Connecticut, USA.
Helber Enrique Balaguera López	Ph.D. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.
Jairo Arcos	estudiante Ph.D. Universidad de Florida
Luis Fernando Aristizábal	estudiante Ph.D. Universidad de Hawaii
Helmer A. Guzmán L.	M.Sc. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM
Carolina Díaz Marín	M.Sc. Universidad de Caldas
Ramiro Urrea	M.Sc. Universidad de Caldas
Miguel Alfonso Castiblanco C.	Profesional en Bibliotecología e Ingeniero de Sistemas. Cenicafé FNC

ASOCIACIÓN ENTRE CRECIMIENTO VEGETATIVO Y CARGA DE FRUTOS EN FORMACIÓN CON PROGENIES DE *Coffea arabica* L

Andrés Felipe León-Burgos  *, José Raúl Rendón  *, Alexander Jaramillo Jiménez  *, Luis Carlos Imbachi  **, Claudia Patricia Flórez Ramos  ***

León-Burgos, A. F., Rendón, J. R., Jaramillo-Jiménez, A., Imbachi, L. C., & Flórez, C. P. (2024). Asociación entre crecimiento vegetativo y carga de frutos en formación con progenies de *Coffea arabica* L. *Revista Cenicafé*, 75(2), e75201. <https://doi.org/10.38141/10778/75201>



Los incrementos en la carga de frutos de café a nivel de la planta pueden modificar el desarrollo foliar. El objetivo de este estudio fue evaluar la relación entre el crecimiento vegetativo y la cantidad de frutos en formación con progenies de *Coffea arabica*. Las evaluaciones se realizaron en plantas de café de tres años de edad y en siete progenies. Se seleccionó una población total de 54 plantas y en estas se registró el crecimiento de las hojas y ramas, acumulación de masa seca y se calcularon algunos índices de crecimiento. También se estimó la altura, número de ramas productivas y frutos en cada progenie por planta. Se definieron cuatro grupos en relación con los frutos por rama, donde G1 y G2 agruparon alrededor del 75% de la población de CU1819 y CU1825, con cargas de frutos entre 75 a 95 frutos por rama en promedio. El análisis de componentes principales explica las alteraciones en las medidas de formación foliar y acumulación de masa seca con cargas mayores a 75 frutos por rama. Por otro lado, por planta se registraron en promedio 174,92 cm en altura, 39 ramas productivas y 1.337 frutos. Estos resultados indican que hay una correlación negativa entre cargas mayores a 75 frutos por rama con el crecimiento vegetativo; de igual forma, fueron identificados rasgos fenotípicos compartidos y propios de la población evaluada, lo que resalta la utilidad del análisis multivariado para los estudios de diversidad genética de las variedades de café desarrolladas en Colombia.

Palabras clave: Mejoramiento de café, acumulación de masa seca, análisis de componentes principales, componentes de producción, rasgos agronómicos, relación área foliar por fruto, Colombia.

RELATIONSHIP BETWEEN VEGETATIVE GROWTH AND BORE PINHEAD FRUIT LOADS FOR *Coffea arabica* L PROGENIES

The increased fruit load for coffee plants can modify foliar formation. The objective of this study was to evaluate the relationship between vegetative growth and fruit loads in *C. arabica* progenies. The experiment was carried out on three-year-old trees and with seven progenies. A population of 54 plants was established, and the growth of leaves, branches, and dry mass accumulation per branch were evaluated, and growth indices were calculated. Likewise, height, number of productive branches, and fruits per plant were estimated for each progeny. Four groups were defined according to fruits per branch, where G1 and G2 grouped around 75% of the CU1819 and CU1825 population, which registered between 75 to 95 fruits per branch on average. The principal components analysis explains the alterations for the leaf formation and dry mass accumulation with loads greater than 75 fruits per branch. On the other hand, for each plant, an average of 174.92 cm in height, 39 productive branches, and 1,337 fruits were reported. These results indicate that with more than 75 fruits per branch, there is a negative correlation with vegetative growth; likewise, shared and specific phenotypic traits in the population of plants were identified, which highlights the usefulness of multivariate analysis for studies of the genetic diversity of coffee varieties developed in Colombia.

Keywords: Coffee breeding, agronomic traits, dry mass accumulation, leaf area-to-fruit ratio, principal component analysis, yields components, Colombia.

* Asistente de Investigación, Investigador Científico I y Auxiliar de Investigación. Disciplina de Fitotecnia, Centro Nacional de Investigaciones del Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-9765-0223>, <https://orcid.org/0000-0002-5676-4670> y <https://orcid.org/0000-0003-4580-1613>, respectivamente.

** Asistente de investigación. Disciplina de Biometría, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-4356-694X>

*** Investigador Científico III. Disciplina de Mejoramiento Genético, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-2859-3496>



El cultivo de *Coffea arabica* L en Colombia es sembrado en rangos altitudinales entre los 1.000 a 2.000 m, bajo esta franja se ha reportado que existe una complejidad climática con variabilidad temporal en las condiciones ambientales respecto a los diferentes pisos térmicos donde es establecido el cultivo (Jaramillo, 2018; García et al., 2014). Esta particularidad ha permitido determinar que la disponibilidad de agua y radiación solar interviene en el comportamiento específico de la planta e influye en los niveles de producción para cada región (DaMatta et al., 2018; Arcila et al., 2007). Así mismo, las diferencias en las condiciones ambientales establecen un reto para mantener la resistencia genética a enfermedades como la roya del café (Silva et al., 2022; Quiroga-Cardona, 2021). Por consiguiente, evaluar el desempeño agronómico de las progenies de café mejoradas en los diferentes rangos altitudinales del país, constituye una de las alternativas más resilientes del programa de mejoramiento genético de café en Colombia (Cenicafé, 2021).

Las variedades de café desarrolladas por Cenicafé implementan como eje central la diversidad genética, es decir, están conformadas por varias progenies, como una de las estrategias para garantizar la resistencia genética durable a enfermedades y reunir rasgos agronómicos de interés (Flórez et al., 2021; Maldonado y Giraldo, 2020; Flórez et al., 2016). En estos materiales se destaca su alta capacidad productiva, buenas características físicas del grano y excelente calidad sensorial de la bebida (Flórez et al., 2017). También ha sido corroborada la adaptación tanto a los sistemas de producción a libre exposición solar como bajo sombra, y se ha explorado que presentan una tolerancia moderada a escenarios de déficit y excesos hídricos del suelo (Lince et al., 2024; León-Burgos et al., 2022ab; Cenicafé, 2020). Por estas razones, la adopción de las variedades de café mejoradas se constituye en

uno de los componentes clave para asegurar la productividad y rentabilidad de los caficultores colombianos (Duque et al., 2021).

La etapa productiva del cultivo de café para Colombia inicia entre los 18 hasta 24 meses después del establecimiento en el campo, con impactos en el crecimiento vegetativo de la parte aérea y en el manejo agronómico del cultivo (Rendón, 2020; Arcila et al., 2007). Ha sido reportado que hay una correlación negativa entre crecimiento vegetativo y la cantidad de frutos, lo que ha explicado las reducciones en la magnitud y velocidad del crecimiento de las ramas plagiotrópicas y en la formación foliar, cuando se incrementa la carga de frutos a nivel del árbol (Rakocevic et al., 2020; Echeverría-Beirute et al., 2018). Así mismo, en ciertas edades de la planta, se concentra un gran volumen en la producción durante el ciclo productivo con el uso de variedades mejoradas y esto podría conllevar un desbalance en el área foliar requerida para el desarrollo de los frutos de café, particularmente, en plantaciones establecidas a libre exposición solar (Unigarro et al., 2021; Almeida et al., 2021). Todas estas implicaciones generan limitaciones en la expresión del desempeño agronómico de las plantas, puesto que el sistema de producción a libre exposición solar es el de mayor área sembrada en Colombia (FNC, 2022).

Los frutos de café son órganos vertederos con alta capacidad para competir por carbohidratos y nutrientes respecto a las hojas en formación y al crecimiento plagiotrópico de las ramas, generalmente, cuando inicia su crecimiento acelerado o etapa de llenado (León-Burgos et al., 2024a; Toro-Herrera et al., 2024; Chave et al., 2012). Esto ha conducido a postular la hipótesis que una alta producción de frutos de café compite fuertemente con el crecimiento vegetativo, en el que puede alterar los patrones de producción por reducciones en la cantidad de nudos vegetativos formados en

etapas de crecimiento previas (Cambou et al., 2021; Castro-Tanzi et al., 2014). Sin embargo, en la etapa de crecimiento lento o desarrollo inicial de los frutos, caracterizada por los altos costos respiratorios e inicio de extracción de nutrientes, se ha explorado poco el balance del crecimiento vegetativo y reproductivo y sus implicaciones en la relación fuente-vertedero, como un aspecto crucial para comprender los desbalances en la formación foliar reportados en etapas posteriores del desarrollo del fruto (Ságio et al., 2013; Ocampo et al., 2010; DaMatta et al., 2008).

Métodos estadísticos univariados y multivariados han sido empleados para agrupar las respuestas o variabilidad genética de genotipos o progenies en diversos ambientes (Baraki et al., 2020; Malik et al., 2014). Los análisis multivariados constituyen uno de los métodos más eficientes para comparar los rasgos y desempeño genético de los genotipos, dado que puede proporcionar muchas opciones que resumen las respuestas fenotípicas y su asociación, para categorizar individuos dentro de grupos, con el fin de estudiar las respuestas idénticas presentes en una población (Zafar et al., 2022; Baraki et al., 2020). El análisis de componentes principales y por clúster son las técnicas más usadas porque permiten explorar diferencias entre diversas variables y sus posibles asociaciones, que en conjunto proporciona un entendimiento del grado de relación y su naturaleza entre rasgos (Zafar et al., 2022; Rathinavel, 2014). Por lo tanto, estas herramientas estadísticas pueden ser útiles para mejorar el entendimiento de los rasgos agronómicos como los niveles de productividad compartidos entre las progenies que conforman las variedades de café desarrolladas en Colombia (Gebreselassie et al., 2024; Weldemichael Abrha et al., 2022; Montagnon & Bouharmont, 1996).

Se ha considerado que, para expresar una mayor productividad en variedades

desarrolladas en café, se requiere de la adopción de un plan de manejo agronómico oportuno y adecuado (Duque et al., 2021). En relación con lo anterior, si es necesario fortalecer las recomendaciones técnicas o agronómicas del manejo del cultivo, hay que determinar el impacto del crecimiento y la producción de frutos a nivel de la planta, en particular, en progenies reconocidas por su alta capacidad productiva en el país (Cenicafé, 2020; Arcila et al., 2007). Por consiguiente, se formula el siguiente planteamiento de hipótesis: con las técnicas multivariadas es posible establecer rasgos agronómicos adecuados para determinar correlaciones negativas entre crecimiento vegetativo y reproductivo, así como identificar rasgos compartidos e idénticos en las progenies. De esta manera, el objetivo de este estudio fue evaluar la relación entre el crecimiento vegetativo y la cantidad de frutos en formación con progenies de *C. arabica*, por medio del enfoque multivariado en una plantación establecida a plena exposición solar, ubicada en la zona central cafetera de Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio, condiciones climáticas y material vegetal

Este estudio fue realizado en la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé, localizada en el municipio de Chinchiná, departamento de Caldas-Colombia (04° 58' N; 75° 39' W), ubicada sobre los 1.381 m de altitud. Se utilizaron plantas de café de tres años, edad que representa una de las cosechas anuales más abundantes del cultivo (Rendón, 2020). Durante el período del estudio desde enero hasta abril del 2022, se presentaron las siguientes condiciones climáticas promedio: temperatura media de 20,68°C ± 0,18 (± corresponde al error estándar), 17°C de temperatura mínima ± 0,17, temperatura máxima de 25,95°C ±

0,37, precipitación acumulada de 1.242 mm \pm 2,84, brillo solar acumulado de 478,3 h \pm 0,50 y una humedad relativa de 83,97% \pm 0,92. Los datos climáticos fueron tomados de la red meteorológica de tipo convencional perteneciente a la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, disponibles en la plataforma Agroclima. (2024).

El material vegetal es proveniente de la especie *C. arabica* de los cruzamientos entre variedad Caturra y el híbrido Timor, son resistentes a *Hemileia vastatrix* (roya del café) y a *Colletotrichum kahawae* conocida como la enfermedad de la cereza del café (Flórez et al., 2016). Se usaron siete progenies procedentes de la Colección Colombiana de Café (Arias, 2023), codificadas de la siguiente manera: CU1819 (diez plantas), CU1825 (nueve), CU1953 (seis), CU1993 (diez), CU2021 (siete), CU2034 (seis) y CX2866 (seis). En total, se evaluó una población de 54 plantas, la plantación fue establecida a libre exposición solar con un distanciamiento de 1,4 m entre surcos x 1,0 m entre plantas y una densidad de siembra de 7.142 plantas/ha. Se priorizaron prácticas agronómicas para la producción comercial de café, las cuales incluyeron aplicación de enmiendas, fertilizantes y control de plagas y enfermedades (Cenicafé, 2021). Finalmente, para el seguimiento de las mediciones en cada planta y por progenie, se seleccionaron cuatro ramas plagiotrópicas en la parte media del dosel de las plantas (zona más productiva), de acuerdo con lo reportado por Arcila et al. (2007).

Mediciones de crecimiento

Crecimiento vegetativo aéreo. Se muestrearon las ramas plagiotrópicas seleccionadas de cada planta y por progenie, durante los 35 hasta 60 días después de la floración principal-DDFP (fase lenta de crecimiento del fruto), donde no se evidencian cambios representativos

en la acumulación de la masa seca de los frutos (Arcila et al., 2007). Se evaluaron medidas de crecimiento como longitud de ramas plagiotrópicas (LRP), número de hojas totales (NHT), número de nudos totales (NNT), área foliar por hoja (AF) y relación del área foliar por fruto (RAFF). El NHT y NNT se estimaron por conteos directos en cada una de las ramas. La LRP se midió desde la base donde se une al tallo principal hasta el ápice de la rama, por medio de un flexómetro.

El AF fue estimada midiendo el largo de la lámina foliar (sin incluir el peciolo) y el ancho de la parte media de cada hoja, usando una regla. Las mediciones se realizaron en todas las hojas disponibles en cada rama. Luego, los datos fueron incorporados en la Ecuación <1> propuesta por Unigarro-Muñoz et al. (2015):

$$EAF = 0,99927 * (L * (-0,14757 + 0,60986 * W)) <1>$$

Donde, EAF es la estimación del área foliar por hoja, L longitud de la hoja y W ancho de la hoja. La relación del área foliar por fruto (RAFF) se calculó por medio de la acumulación del área foliar (AFT) y la cantidad de frutos registrados en la rama.

Acumulación de masa seca. Se determinó la masa seca total (MST) y su partición en los órganos de la parte aérea (rama, hojas y frutos) en cada una de las ramas, entre los 35 hasta 60 DDFP. Las muestras se secaron en una estufa a 65°C por 72 h, hasta peso constante, y posteriormente se pesaron en una balanza analítica con precisión de 0,01 g, donde se determinó la masa seca de la rama (MSR), masa seca de las hojas (MSH), masa seca de los frutos (MSF) y masa seca total (MST). Posteriormente, la partición de la MST se calculó como la relación de la masa de las ramas (RMR=MSR/MST), relación de la masa

de las hojas ($RMH=MSH/MST$) y relación de la masa de los frutos ($RMF=MSF/MST$). También se estimaron medidas de crecimiento indirectas como la relación del área foliar ($RAF=AFT/MST$) y área foliar específica ($AFE= AFT/MSH$), de acuerdo con Hunt. (1990).

Cuantificación de la cantidad de frutos

Se registró el número de frutos por planta y progenie en abril del 2022, por conteo directo en cada rama plagiotrópica productiva y solo se consideraron frutos denominados “cabeza de alfiler”, los cuales tenían un desarrollo entre 35 a 60 DDFP, asociados con la etapa fenológica BBCH71. La época de muestreo fue definida con base en los registros de los botones florales, los cuales se estimaron con la metodología propuesta por Rendón y Montoya (2015). En consecuencia, la fecha de muestreo en la que se estimó la cantidad de los frutos, abarca alrededor del 75% de los eventos de floración para la cosecha principal del área de estudio.

Análisis estadísticos

El análisis de los datos se llevó a cabo mediante un enfoque multivariado, en el cual se consideró la población total (54 plantas). Antes de realizar los análisis respectivos, se estandarizaron los valores para cada variable por medio de su media y desviación estándar. Este proceso tiene como objetivo garantizar una contribución equitativa de todas las variables, donde se uniformizan las varianzas; así, se logra reflejar con precisión las relaciones subyacentes entre las variables, con una interpretación más fiable y robusta de los datos. Se utilizó una agrupación jerárquica con distancia Manhattan como medida de disimilitud y se agrupó con el método de Ward, para categorizar los grupos según el número de frutos por rama en cada progenie. Posteriormente, se exploraron las relaciones entre las medidas de crecimiento,

cantidad de frutos por rama y su contribución porcentual en cada componente con un análisis de componentes principales (ACP) y los grupos asignados fueron graficados en relación a la primera y segunda componente principal (CP1) y (CP2). Para este análisis se usó el paquete factextra versión 1.0.7 (Kassambara y Mundt, 2020). Se aplicó una prueba t-Student ($p < 0,05$) para identificar diferencias en las medidas de crecimiento y los grupos definidos con los análisis descritos anteriormente, después de cumplir con los supuestos de normalidad (prueba de Kolmogorov-Smirnov) y homogeneidad de varianzas (prueba Levene).

También se empleó un análisis de correlación Spearman entre las medidas de crecimiento y el número de frutos por rama mediante el paquete estadístico Corrplot versión 0.92 (Wei y Simko, 2021). Todos los análisis fueron realizados en el software R versión 4.0.4 con el paquete estadístico Stats (R Development Core Team, 2021) y para las gráficas se usó Sigmaplot versión 10.0 (Inpixon, Systat Software Inc, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las progenies según el crecimiento vegetativo y carga de frutos

Con el análisis de agrupamiento se determinaron cuatro grupos o clúster según el número de frutos en formación por rama, en la población con las siete progenies evaluadas. Con este número de clúster se estabilizó la variabilidad intra grupos del conjunto de los datos (dato no mostrado). Así fueron definidos para el grupo-G1, ocho plantas en las que se registraron entre 88 a 111 frutos por rama, el G2 agrupó 19 plantas con 65 a 85 frutos, el G3 con 13 plantas desde 22 a 39 frutos y, por último, en el G4 se asociaron 14 plantas con 43 a 57 frutos por rama (Figura 1a). De acuerdo con la carga de frutos por rama, los grupos se

clasificaron de la siguiente manera: G1 muy buena (93 frutos por rama en promedio), G2 buena (75), G3 baja (31) y G4 intermedia (64). También, en la Figura 1b, se muestra la distribución de las plantas por progenie, en la que pueden resaltarse CU1819 y CU1825 porque agrupan alrededor del 75% en promedio de su población con cargas de frutos entre buena y muy buena para este estudio. Estos resultados demuestran que el análisis por clúster es una herramienta útil para identificar las respuestas idénticas de los componentes de rendimiento entre progenies (Zafar et al., 2022), lo cual ha sido usado para comparar la estabilidad de los rendimientos en genotipos de *C. arabica* (Gebreselassie et al., 2024; Weldemichael Abrha et al., 2022).

Una vez definidos los grupos, es necesario explorar las asociaciones o rasgos compartidos en el comportamiento del crecimiento vegetativo aéreo de las plantas. Para las medidas de formación foliar hay diferencias significativas ($F= 18,25$; $p=0,00000002$) en RAFF comparadas entre los grupos (Tabla 1). Se demostró para G3 mayor valor promedio de RAFF con diferencias estadísticas en relación a G1, G2 y G4. Con estos resultados se evidencia que, a mayor número de frutos en formación por rama, se detecta que hay una reducción en la relación funcional del área foliar a valores por debajo del estándar de 20 cm^2 por fruto para *C. arabica* (DaMatta et al., 2008). Así mismo, con la disminución de RAFF indirectamente puede asociarse un desbalance prematuro de la relación fuente y vertedero (Bote y Vos, 2016), particularmente, para G1 y G2 al registrar los menores valores. Este hallazgo podría reflejar anticipadamente que las plantas pertenecientes a estos grupos, en etapas de desarrollo del fruto posteriores a las evaluadas en este estudio, se afecta considerablemente su crecimiento vegetativo aéreo y esto ha sido confirmado para variedades de café mejoradas en Colombia (León-Burgos

et al., 2024b; Unigarro et al., 2021). En tanto a las otras medidas como NHT, NNT, AF y LRP, no se detectó diferencias estadísticas, por lo que puede presumirse que los grupos comparten respuestas similares en estas medidas de formación foliar para este estudio.

Para todas las medidas de acumulación de la masa seca, se presentaron variaciones en los grupos definidos, contrario a los resultados con las medidas de formación foliar descritos anteriormente. En los grupos G1 y G2 al registrar mayor número de frutos por rama se incrementó la RMF y RMR con diferencias estadísticas ($F= 5,736$; $p= 0,001$ y $F=3,88$; $p =0,01$) respecto a G3 y esto se explica por la correlación positiva y significativa de estas medidas reportadas en este estudio (Figura 2a). El aumento en la carga de frutos también favoreció la mayor acumulación de MST en G1, G2 y G4 en comparación con G3 con diferencias significativas ($F=16,5$; $p=0,0000001$) y este resultado es asociado por la correlación positiva entre NFR y MST (Figura 2a). Los resultados de las interrelaciones entre incremento de la carga de frutos y MST han sido previamente reportados para *C. arabica* en la etapa fenológica madurez fisiológica del fruto por León-Burgos et al. (2024b) y Vaast et al. (2005).

Caso contrario ocurrió para RMH, RAE y AFE donde hay mayores valores promedios para G3, con diferencias en relación con G1, G2 y G4 ($F=8,25$; $p=0,001$, $F= 10,21$; $p= 0,00002$ y $F=4,269$; $p=0,009$, respectivamente) (Tabla 2). Esto último ha sido relacionado por la fuerza vertedero de los frutos de café que ocasiona mayor asignación de carbono (alta competencia) con impactos negativos en los órganos vegetativos (Bote y Vos, 2016). Con estos resultados, preliminarmente se corrobora que en etapas de crecimiento inicial del fruto de café existe una competencia prematura por

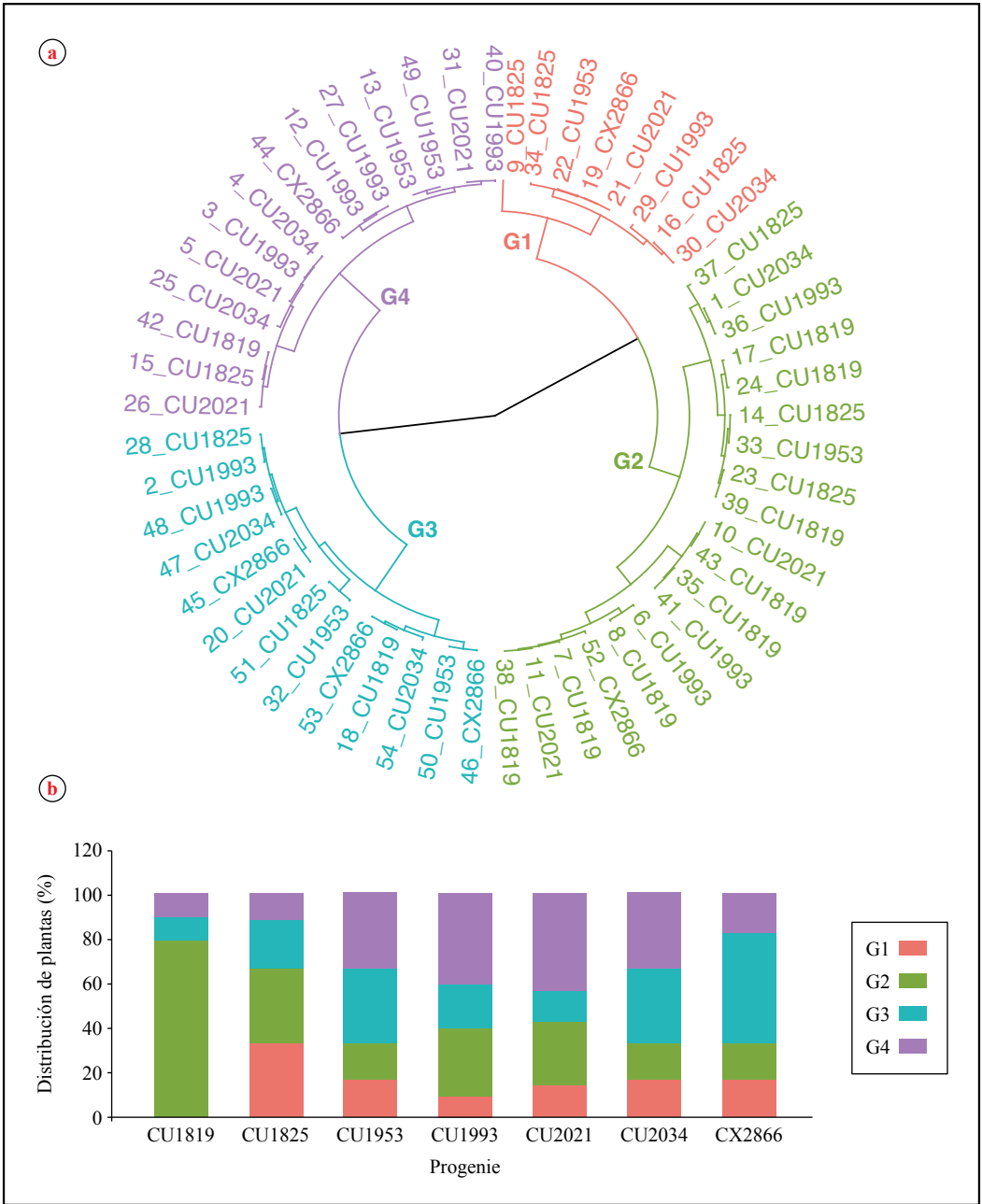


Figura 1. Dendrograma que muestra el análisis de clúster (a) y la distribución de plantas (b), que describe el agrupamiento entre el número de frutos por rama y progenies de *C. arabica*. Las abreviaciones G1 a G4 describen los grupos definidos según la carga de frutos por rama. Cada color diferencia los grupos definidos. Para el gráfico (b) cada barra corresponde al promedio de la cantidad de plantas por progenie.

la asignación y partición de carbono entre órganos vegetativos y reproductivos (Vaast et al., 2005, Rakocevic et al., 2020). Por otro lado, se ha reportado que la acumulación de la masa seca total en las ramas con elevada carga de frutos, se distribuye más del doble en los frutos y tan solo menos del 13% es asignada a las hojas, en un ciclo de

producción anual para variedades de café Cenicafé 1 y Costa Rica 95 (León-Burgos et al., 2024b; Vaast et al., 2005). En efecto, Bote y Vos. (2016) evidencia que en ramas con mayor carga de frutos para el cultivar Etíope 74-40 hay menor peso seco foliar, lo que alteró las medidas RAE y AFE, como se observó en este estudio.

Tabla 1. Medidas de formación foliar en los grupos definidos según el número de frutos por rama en las progenies de *C. arabica*. Cada dato es la media \pm error estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre los promedios de los grupos según prueba t-Student ($p < 0,05$).

Grupo	NHT	NNT	AF	RAFF	LRP
			cm ²	cm ² /fruto	cm
1	25 \pm 8,85 a	18,31 \pm 0,55 a	79,58 \pm 28,14 a	12,36 \pm 1,65 c	77,77 \pm 4,14 a
2	23 \pm 5,26 a	17,62 \pm 0,51 a	68,56 \pm 15,73 a	13,03 \pm 0,89 bc	70,10 \pm 2,75 a
3	22 \pm 6,18 a	16,63 \pm 0,67 a	66,42 \pm 18,42 a	26,75 \pm 2,08 a	65,33 \pm 3,48 a
4	22 \pm 5,87 a	17,43 \pm 0,65 a	69,40 \pm 18,55 a	17,99 \pm 1,61 b	70,33 \pm 3,53 a

NHT: Número de hojas totales, **AF:** área foliar, **RAFF:** relación de área foliar por fruto, **NNT:** número de nudos totales y **LRP:** longitud de la rama plagiotrópica.

Tabla 2. Medidas de acumulación de masa seca en los grupos definidos según el número de frutos por rama en las progenies de *C. arabica*. Cada dato es la media \pm error estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre los promedios de los grupos según prueba t-Student ($p < 0,05$).

Grupo	RMF	RMH	RMR	MST	RAE	AFE
	g	g	g	g	cm ² g ⁻¹	cm ² g ⁻¹
1	0,17 \pm 0,01 a	0,46 \pm 0,02 b	0,38 \pm 0,01 a	44,05 \pm 3,12 a	26,72 \pm 2,85 b	50,85 \pm 21,51 b
2	0,15 \pm 0,01 a	0,51 \pm 0,01 b	0,33 \pm 0,01 a	34,54 \pm 2,39 b	27,83 \pm 2,32 b	54,77 \pm 12,56 b
3	0,08 \pm 0,02 b	0,61 \pm 0,03 a	0,31 \pm 0,01 b	19,53 \pm 1,81 c	46,29 \pm 3,46 a	76,51 \pm 21,22 a
4	0,11 \pm 0,01 ab	0,54 \pm 0,02 ab	0,35 \pm 0,01 ab	29,86 \pm 1,39 b	28,19 \pm 2,14 b	53,43 \pm 14,28 b

RMF: relación de masa seca de frutos, **RMH:** relación de masa seca de hojas, **RMR:** relación de masa seca de rama, **MST:** masa seca total, **RAE:** relación del área foliar específica y **AFE:** área foliar específica

En la Figura 2a, se evidencia una asociación negativa y significativa ($p < 0,05$) entre NFR y RMF y las medidas que relaciona la masa seca de los órganos vegetativos (RMH, RAE y AFE), lo que puede respaldar los resultados descritos anteriormente. Estas correlaciones han sido previamente reportadas por León-Burgos et al. (2024b) y resalta que estos datos son de interés porque las medidas de RMH, RAE y AFE están asociadas a la capacidad de interceptación de la radiación solar por unidad de área foliar y de la eficiencia fotosintética de las plantas (Taiz et al., 2015). También en este análisis se destaca el alto grado de correlación, positivo y significativo ($p < 0,05$) entre las medidas NNT, AF y LRP, variables que han sido relacionadas con los patrones de producción de café debido a su influencia en la formación de las estructuras reproductivas que soportan las futuras cosechas (Somarriba y Quesada, 2022; Castro-Tanzi et al., 2014). Lo anterior, está relacionado dado que en cultivos perennes como el café ha sido reportado que hay formación periódica de hojas y nudos en el año, y cuando ocurre la diferenciación de las yemas reproductivas, las cosechas se desplazan hacia los extremos plagiotrópicos y ortotrópicos de la planta (Arcila et al., 2007; DaMatta et al., 2007).

Un análisis de componentes principales-ACP en el que se resumen las asociaciones del crecimiento vegetativo de las plantas por progenie según los grupos definidos por el NFR, se muestra en la Figura 2b. Se graficó en relación a la primera y segunda componente que explica alrededor del 78% de la variabilidad acumulada de los datos. El ACP revela que LRP (17%), MST (16%), NNT (16%) y AF (13%) son las medidas clave que explican la variabilidad del CP1. Las variables RAFF (25%), RAE (23%), AFE (13%), NFR (11%) y RMH (8%) explican la variabilidad del CP2, y en conjunto son las medidas que aportan al entendimiento de

la asociación del crecimiento vegetativo y cantidad de frutos de las progenies en este estudio. Según la confianza de las elipses en el biplot (95%), fácilmente pueden reconocerse agrupaciones según la intensidad de la carga de frutos en formación por rama. En el cuadrante a la izquierda fueron agrupados G1 y G2, reconocidos por presentar mayores valores de NFR, RMF y MST. En el cuadrante a la derecha se reporta el G3 y G4 con valores altos de RAFF, RAE, RMH y AFE (Figura 2b).

Los resultados de ACP demuestran que mayor cantidad de frutos en formación tienen una correlación negativa con el crecimiento vegetativo y esto explica que con cargas mayores a 75 frutos por rama, hay alteraciones en las medidas de formación foliar y acumulación de masa seca determinadas en las progenies. Estos resultados concuerdan con los estudios de DaMatta et al. (2008) y Bote y Vos. (2016) en el que evidenciaron los efectos en el crecimiento de plantas de café con cargas entre 50 a 130 frutos por rama. Finalmente, las técnicas multivariadas usadas permitieron identificar rasgos idénticos entre la población evaluada en este estudio y constituyen una alternativa eficaz para identificar la diversidad genética y rasgos similares de las progenies que conforman las variedades de café desarrolladas en Colombia (Zafar et al., 2022; Baraki et al., 2020), incluso esta técnica ya ha sido implementada en programas de mejoramiento genético de otros países cafeteros, para el reconocimiento de los rendimientos en diversos genotipos de *C. arabica* (Gebreselassie et al., 2024; Weldemichael Abrha et al., 2022; Montagnon & Bouharmont, 1996)

Variación del desempeño agronómico por progenie

La altura, el número de ramas productivas y la cantidad de frutos en toda la planta fueron evaluadas como medidas fenotípicas, para

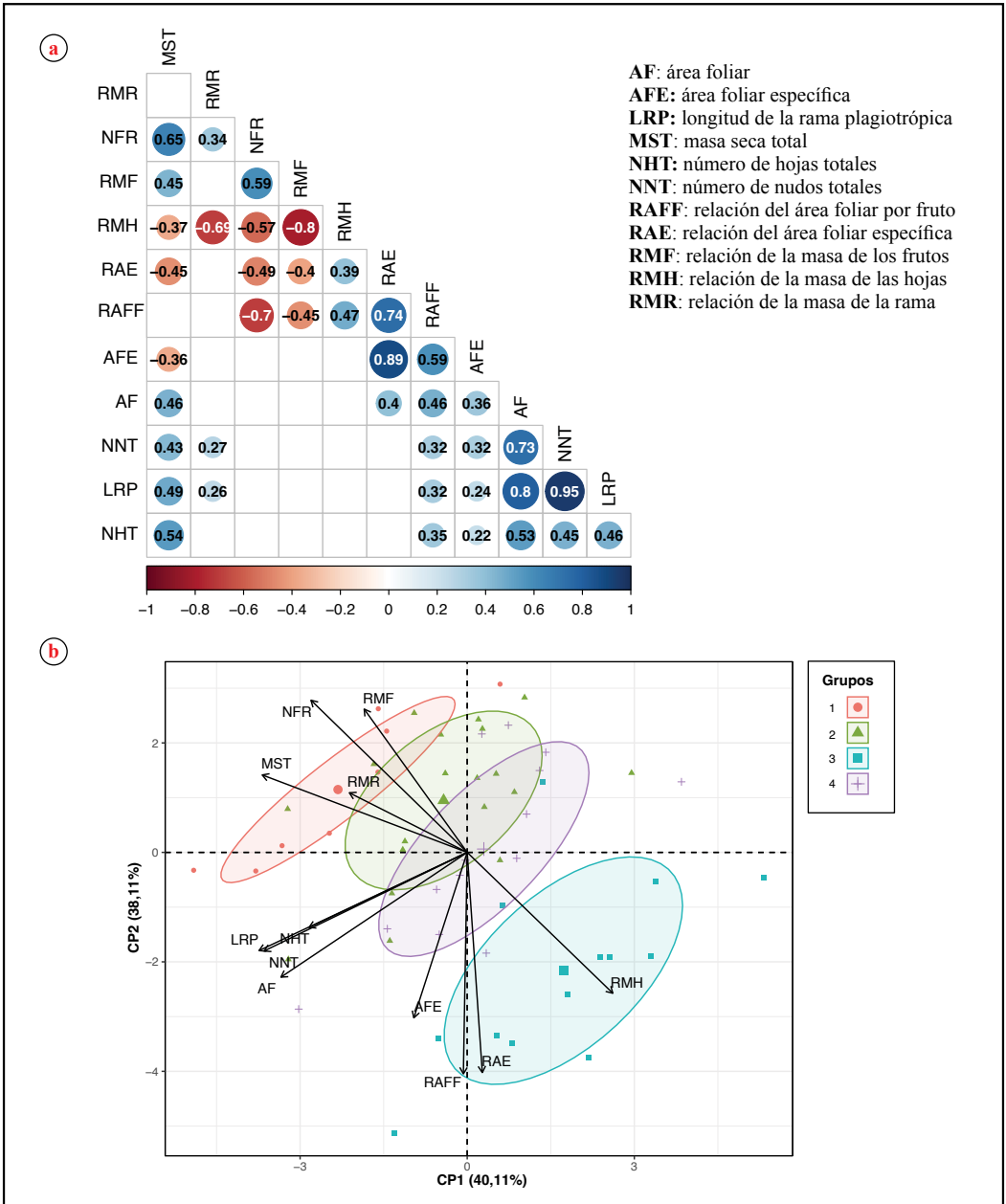


Figura 2. Comparación entre los grupos definidos por el número de frutos por rama y variables de formación foliar y acumulación de masa seca determinadas en las progenies de *C. arabica*. (a) Matriz de correlación Spearman. Correlaciones positivas y significativas (color azul), correlaciones negativas y significativas (color rojo) y no correlación (cuadros blancos). Significancia de correlación: $p < 0,05$. (b) Análisis de componentes principales (ACP) en relación con la primera y segunda componente, con elipses de confianza agrupadas por la cantidad de frutos por rama.

dilucidar el desempeño agronómico de cada progenie, dado que han sido consideradas como componentes de producción o productividad del cultivo de café (Unigarro et al., 2017; Arcila et al., 2007; DaMatta et al., 2004). De manera general, por planta se registraron en promedio 174,92 cm \pm 0,32 (error estándar) en altura, 39 ramas productivas \pm 1,68 y 1.337 frutos \pm 117,63 (Figura 3). En cuanto al análisis por progenie se destaca en altura CU1993 al tener el mayor promedio (179,19 cm \pm 0,25) y CU2034 (172,77 cm \pm 0,39) con la menor altura (Figura 3a). Para la cantidad de ramas productivas, se registró el mayor dato en CU2034 (42 \pm 1,59) y con el menor número de ramas productivas en CU2021 (37 \pm 1,39). Mientras que, para la cantidad de frutos por planta, se resalta la progenie CU1819, con los mayores promedios 1.612 frutos \pm 130,53 en comparación con CU1993 que registró el menor promedio (1.241 \pm 92,68) (Figura 3c).

La cantidad de frutos por planta para CU1819 también es correspondiente a los resultados descritos en la sección anterior, en el que alrededor del 80% de la población de esta progenie fue reportado con cargas de frutos clasificadas como buenas (75 frutos por rama). Por lo tanto, este material se considera con características agronómicas deseables y esto fue previamente reportado por Flórez et al. (2016).

Finalmente, con estos resultados se confirma la variabilidad en rasgos fenotípicos en las progenies de café mejoradas en Colombia, lo cual está relacionado a los procesos de selección y a la interacción con el ambiente (Flórez et al., 2017). Estas características son deseadas en la estrategia de diversificación genética para garantizar resistencia durable a enfermedades y un conjunto de rasgos agronómicos de interés,

que potencializan la adopción de estos materiales por parte de los caficultores, al influir en la productividad y rentabilidad del cultivo (Duque et al., 2021; Flórez et al., 2021). Sin embargo, es necesario profundizar con estudios más detallados, los cuales, corroboren si el efecto de la carga de frutos en el crecimiento vegetativo, puede estar asociado a la diversidad genética presente en las variedades de café desarrolladas en Colombia y con esto constituir si podría ser una estrategia técnica para contrarrestar los agotamientos de las plantas durante y después de años de alta producción.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que hay una relación negativa entre la carga de frutos en formación y el crecimiento vegetativo de las progenies evaluadas en este estudio. Esto constituye un referente en el que se evidencia un desbalance temprano en la relación fuente-vertedero para etapas de crecimiento inicial de los frutos. Se confirma que con cargas mayores a los 75 frutos en formación por rama, hay modificaciones significativas en las medidas de acumulación de la masa seca, lo que evidencia que los frutos de café son órganos que compiten prematuramente en la asignación de carbono. Por otro lado, se provee evidencia en el que se corrobora la hipótesis donde se soporta que las técnicas multivariadas empleadas definieron rasgos agronómicos relacionados con el impacto negativo en el crecimiento de órganos vegetativos y reproductivos, así como se identificó rasgos fenotípicos compartidos y propios de la población estudiada, en el que se resalta las progenies CU1819 y CU1825 por su capacidad de carga de frutos en las ramas. Con esto se destaca la utilidad de estas herramientas estadísticas para los estudios de diversidad genética de las variedades de café desarrolladas en Colombia.

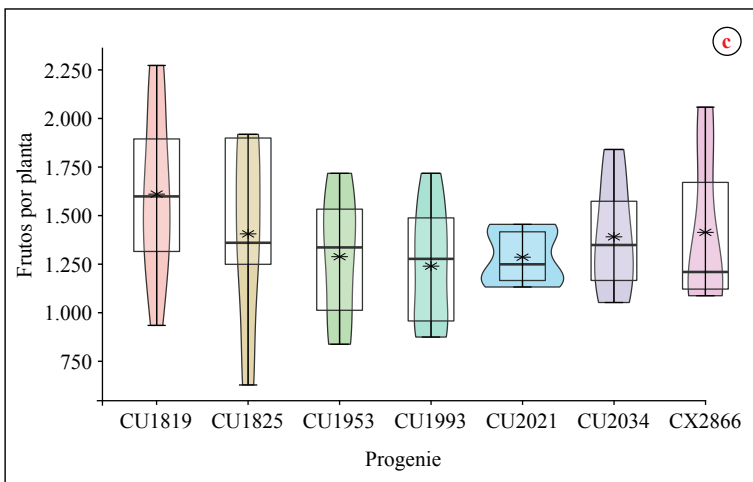
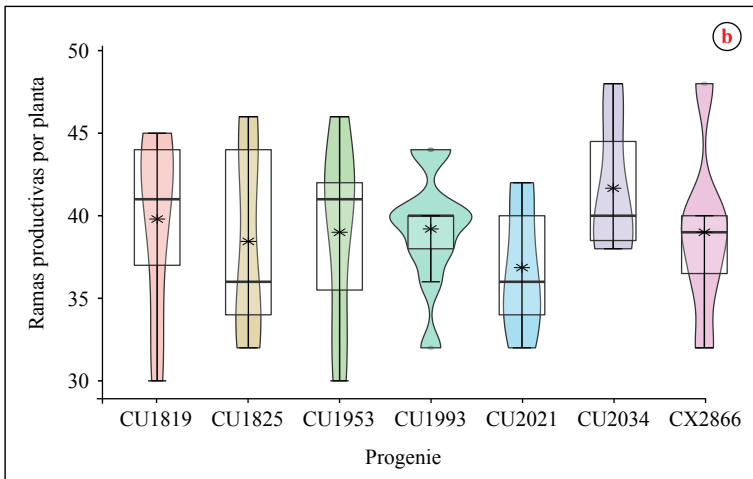
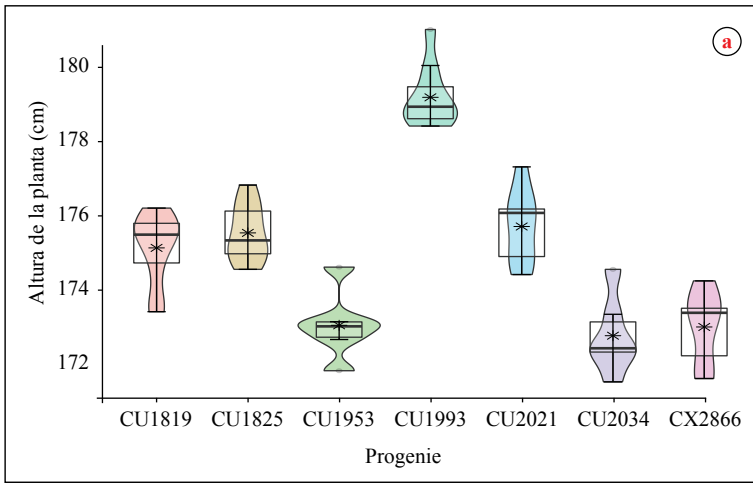


Figura 3. Medidas fenotípicas asociadas al componente de producción por progenie de *C. arabica*. Cada asterisco corresponde a la media y la línea transversal denota la mediana del conjunto de los datos. Los colores diferencian las progenies evaluadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y al Centro Nacional de Investigaciones del Café-Cenicafé por el soporte y financiamiento de esta investigación (Crossref Funder ID 100019597), adscrito al proyecto FIT102035. También a Jhon Félix Trejos, Carlos Gonzalo Mejía y Andrea Monroy García por su apoyo en las mediciones de campo.

Contribución de autores: **AFLB**; Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos,

Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Software, Supervisión, Visualización, Redacción–borrador original, Redacción–revisión y edición. **JRR**; Conceptualización, Adquisición de fondos, Administración del proyecto, Redacción–revisión y edición. **AJJ**; Curación de datos, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Redacción–revisión y edición. **LCI**; Análisis formal, Metodología, Software, Visualización, Redacción–revisión y edición. **CPF**; Conceptualización, Análisis formal, Metodología, Redacción–revisión y edición. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.





LITERATURA CITADA

- Agroclima-Agroclimática cafetera. (2024). Plataforma, disponible en: <https://agroclima.cenicafe.org/> (Consultada en febrero, 2024).
- Almeida, W. L., Ávila, R. T., Pérez-Molina, J. P., Barbosa, M. L., Marçal, D. M. S., de Souza, R. P. B., Martino, P. B., Cardoso, A. A., Martins, S. C. V., & DaMatta, F. M. (2021). The interplay between irrigation and fruiting on branch growth and mortality, gas exchange and water relations of coffee trees. *Tree Physiology*, *41*(1), 35-49. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa116>
- Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A. M., Salazar, L. F., & Hincapié, E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/720>
- Arias, J. C. (2023). *La Colección Colombiana de Café: Conservando la diversidad genética para una caficultura sostenible*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0021>
- Baraki, F., Gebregergis, Z., Belay, Y., Berhe, M., Teame, G., Hassen, M., Gebremedhin, Z., Abadi, A., Negash, W., Atsbeha, A., & Araya, G. (2020). Multivariate analysis for yield and yield-related traits of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes. *Heliyon*, *6*(10), e05295. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05295>
- Bote, A. D., & Jan, V. (2016). Branch growth dynamics, photosynthesis, yield and bean size distribution in response to fruit load manipulation in coffee trees. *Trees*, *30*(4), 1275–1285. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1365-x>
- Cambou, A., Thaler, P., Clément-Vidal, A., Barthès, B. G., Charbonnier, F., Van den Meersche, K., Aguilar Vega, M. E., Avelino, J., Davrieux, F., Labouisse, J.-P., de Melo Virginio Filho, E., Deleporte, P., Brunet, D., Lehner, P., & Rouspard, O. (2021). Concurrent starch accumulation in stump and high fruit production in coffee (*Coffea arabica*). *Tree Physiology*, *41*(12), 2308–2325. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab075>
- Castro-Tanzi, S., Flores, M., Wanner, N., Dietsch, T. V., Banks, J., Ureña-Retana, N., & Chandler, M. (2014). Evaluation of a non-destructive sampling method and a statistical model for predicting fruit load on individual coffee (*Coffea arabica*) trees. *Scientia Horticulturae*, *167*, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.013>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2021). *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3a ed.). Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0014>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2020). *Manejo Agronómico de los Sistemas de Producción de Café*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0002>
- DaMatta, F. M., Avila, R. T., Cardoso, A. A., Martins, S. C. V., & Ramalho, J. C. (2018). Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change and Global Warming: A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *66*(21), 5264-5274. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04537>

- DaMatta, F. M., Cunha, R. L., Antunes, W. C., Martins, S. C. V., Araujo, W. L., Fernie, A. R., & Moraes, G. A. B. K. (2008). In field-grown coffee trees source-sink manipulation alters photosynthetic rates, independently of carbon metabolism, via alterations in stomatal function. *New Phytologist*, *178*(2), 348–357. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02367.x>
- DaMatta, F. M. (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: A review. *Field Crops Research*, *86*(2–3), 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.001>
- Duque-Orrego, H., Salazar, H. M., Rojas-Sepúlveda, L. A., & Gaitán, Á. (2021). *Análisis económico de tecnologías para la producción de café en Colombia*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0016>
- Echeverría-Beirute, F., Murray, S. C., Klein, P., Kerth, C., Miller, R., & Bertrand, B. (2018). Rust and Thinning Management Effect on Cup Quality and Plant Performance for Two Cultivars of *Coffea arabica* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *66*(21), 5281–5292. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03180>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-FNC. (2022). Publicaciones en Informe de Gestión 2022. <https://doi.org/10.38141/10793/2022>. (Consultado, mayo, 2024).
- Flórez, C. P., Quiroga-Cardona, J., & Arias, J. C. (2021). Variedades del Café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café, *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3a ed., pp. 11–29). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_1
- Flórez, C. P., Arias, J. C., & Duque-Orrego, H. (2017). Guía para la caracterización de las variedades de café: Claves para su identificación. *Avances Técnicos Cenicafé*, *47*(6), 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0476>
- Flórez, C. P., Maldonado, C. E., Cortina, H. A., Moncada, M. D. P., Montoya, E. C., Ibarra, L. N., Unigarro, C. A., Rendón, J. R., & Duque-Orrego, H. (2016). Cenicafé 1: Nueva variedad de porte bajo altamente productiva resistente a la roya y al CBD con mayor calidad física del grano. *Avances Técnicos Cenicafé*, *46*(9), 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0469>
- García, J. C., Posada-Suárez, H., & Läderach, P. (2014). Recommendations for the Regionalizing of Coffee Cultivation in Colombia: A Methodological Proposal Based on Agro-Climatic Indices. *PLOS ONE*, *9*(12), e113510. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113510>
- Gebreselassie, H., Tesfaye, B., & Gedebo, A. (2024). Genetic diversity of Arabica coffee genotypes in south Ethiopia using quantitative agro-morphological traits. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *71*(7), 3485–3506. <https://doi.org/10.1007/s10722-023-01853-9>
- Hunt, R. (1990). *Basic Growth Analysis*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-9117-6>
- Jaramillo-Robledo, A. (2018). *El clima de la caficultura en Colombia*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0031>
- Kassambara, A. (2020). *factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses* (Versión 1.0.7, p. 1.0.7) [Software]. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
- León-Burgos, A. F., Rendón, J. R., Imbachi, L. C., Toro-Herrera, M. A., Unigarro, C. A., Osorio, V., & Balaguera-López, H. E. (2024). Increased fruit load influences vegetative growth, dry mass partitioning, and bean quality attributes in full-sun coffee cultivation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *8*, 1379207. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1379207>
- León-Burgos, A. F., Sáenz, J. R., Imbachi, L. C., Unigarro, C. A., Osorio, V., Sadeghian, S., & Balaguera-López, H. E. (2024). Varying fruit loads modified leaf nutritional status, photosynthetic performance, and bean biochemical composition of coffee trees. *Scientia Horticulturae*, *329*, 113005. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113005>
- León-Burgos, A. F., Unigarro, C. A., & Balaguera-López, H. E. (2022a). Soil Waterlogging Conditions Affect Growth, Water Status, and Chlorophyll “a” Fluorescence in Coffee Plants (*Coffea arabica* L.). *Agronomy*, *12*(6), 1270. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061270>
- León-Burgos, A. F., Unigarro, C. A., & Balaguera-López, H. E. (2022b). Can prolonged conditions of water deficit alter photosynthetic performance and water relations of coffee plants in central-west Colombia? *South African Journal of Botany*, *149*, 366–375. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.034>
- Lince, L. A., Sadeghian-Khalajabadi, S., & Sarmiento Herrera, N. G. (2024). Evaluación de parámetros relacionados con el crecimiento de plantas de café (*Coffea arabica* L.) en respuesta al déficit hídrico del suelo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, *15*(2), 11–34. <https://doi.org/10.22490/21456453.6805>
- Maldonado, C. E., & Ángel-Giraldo, L. (2020). Resistencia genética a la Enfermedad de la Cereza del Café en variedades cultivadas en Colombia. *Revista Cenicafé*, *71*–I, 68–90. <https://doi.org/10.38141/10778/1121>
- Malik, R., Sharma, H., Sharma, I., Kundu, S., Verma, A., Sheoran, S., Kumar, R., & Chatrath, R. (2014). Genetic diversity of agro-morphological characters in Indian wheat varieties using GT biplot. *Australian Journal of Crop Science*, *8*(9), 1266–1271. https://www.croplink.com/malik_8_9_2014_1266_1271.pdf

- Montagnon, C., & Bouharmont, P. (1996). Multivariate analysis of phenotypic diversity of *Coffea arabica*. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 43(3), 221–227. <https://doi.org/10.1007/BF00123274>
- Ocampo, D. M., Riaño, N. M., López-Ruiz, J. C., & López-Forero, Y. (2010). Intercambio de dióxido de carbono y cambios bioquímicos del pericarpio durante el desarrollo del fruto del café. *Revista Cenicafe*, 61(4), 327–343. <http://hdl.handle.net/10778/507>
- Quiroga-Cardona, J. (2021). La resistencia incompleta del café a la roya: Una revisión. *Revista Cenicafe*, 72(2), e72208. <https://doi.org/10.38141/10778/72208>
- R Software Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing (4.4.2). [Computer software]. <https://www.r-project.org>
- Rakocevic, M., Braga, K. S. M., Batista, E. R., Maia, A. H. N., Scholz, M. B. S., & Filizola, H. F. (2020). The vegetative growth assists to reproductive responses of Arabica coffee trees in a long-term FACE experiment. *Plant Growth Regulation*, 91(2), 305–316. <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00607-2>
- Rathinavel, K. (2018). Principal Component Analysis with Quantitative Traits in Extant Cotton Varieties (*Gossypium Hirsutum* L.) and Parental Lines for Diversity. *Current Agriculture Research Journal*, 6(1), 54–64. <https://doi.org/10.12944/CARJ.6.1.07>
- Rendón, J. R. (2020). Administración de sistemas de producción de café a libre exposición solar. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *Manejo Agronómico de los Sistemas de Producción de Café* (pp. 34–71). Cenicafe. https://doi.org/10.38141/10791/0002_2
- Rendón, J. R., & Montoya, E. C. (2015). ¿Cómo registrar las floraciones en los cafetales?. *Avances Técnicos Cenicafe*, 45, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0455>
- Ságio, S. A., Lima, A. A., Barreto, H. G., De Carvalho, C. H. S., Paiva, L. V., & Chalfun-Junior, A. (2013). Physiological and molecular analyses of early and late *Coffea arabica* cultivars at different stages of fruit ripening. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(11), 3091–3098. <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1342-6>
- Silva, M. D. C., Guerra-Guimarães, L., Diniz, I., Loureiro, A., Azinheira, H., Pereira, A. P., Tavares, S., Batista, D., & Várzea, V. (2022). An Overview of the Mechanisms Involved in Coffee-Hemileia vastatrix Interactions: Plant and Pathogen Perspectives. *Agronomy*, 12(2), 326. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020326>
- Somarriba, E., & Quesada, F. (2022). Modeling age and yield dynamics in *Coffea arabica* pruning systems. *Agricultural Systems*, 201, 103450. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103450>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology & Development* (6a ed.). Oxford University Press.
- Toro-Herrera, M. A., Pennacchi, J. P., Vieira, D. A., Costa, V. E., Honda Filho, C. P., Barbosa, A. C. M. C., & Barbosa, J. P. R. A. D. (2024). Source-sink patterns on coffee trees related to annual climate variability: An approach through stable isotopes analysis. *Annals of Applied Biology*, 184(2), 183–195. <https://doi.org/10.1111/aab.12872>
- Unigarro, C. A., Bejarano, L. M. D., & Acuña, J. R. (2021). Effect of fruit load of the first coffee harvests on leaf gas exchange. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 51, e69865. <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v51e69865>
- Unigarro, C. A., Medina, R. D., & Flórez, C. P. (2017). Relación entre producción y características fenotípicas en *Coffea arabica* L. *Revista Cenicafe*, 68(1), 62–67. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/816>
- Unigarro, C. A., Hernández-Arredondo, J. D., Montoya-Restrepo, E. C., Medina, R. D., Ibarra-Ruales, L. N., Carmona-González, C. Y., & Flórez, C. P. (2015). Estimation of leaf area in coffee leaves (*Coffea arabica* L.) of the Castillo® variety. *Bragantia*, 74(4), 412–416. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0026>
- Vaast, P., Angrand, J., Franck, N., Dauzat, J., & Genard, M. (2005). Fruit load and branch ring-barking affect carbon allocation and photosynthesis of leaf and fruit of *Coffea arabica* in the field. *Tree Physiology*, 25(6), 753–760. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.6.753>
- Wei T, & Simko V. (2021). R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix. <https://github.com/taiyun/corrplot>. R package Version 0.92.
- Weldemichael Abrha, G., Kebede, S. A., Bedada, L. T., Berecha Yadessa, G., & Adugna Gutu, A. (2022). Genotype by Environment Interaction and Yield Stability of Coffee (*Coffea arabica* L.) Genotypes Evaluated in Western Ethiopia. *Plant Production Science*, 25(4), 467–483. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2022.2136722>
- Zafar, M. M., Jia, X., Shakeel, A., Sarfraz, Z., Manan, A., Imran, A., Mo, H., Ali, A., Youlu, Y., Razaq, A., Iqbal, M. S., & Ren, M. (2022). Unraveling Heat Tolerance in Upland Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) Using Univariate and Multivariate Analysis. *Frontiers in Plant Science*, 12, 727835. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.727835>

COMPOSICIÓN QUÍMICA E INOCUIDAD DE *Coffea arabica* L. PROCESADO POR VÍA SECA EN COLOMBIA

Claudia Patricia Gallego Agudelo *, Luz Fanny Echeverri Giraldo *, Jenny Paola Pabón Usaquén *,
Valentina Osorio Pérez **

Gallego, C. P., Echeverri, L. F., Pabón, J., & Osorio, V. (2024). Composición química e inocuidad de *Coffea arabica* L. procesado por vía seca en Colombia. *Revista Cenicafé*, 75(2), e75202. <https://doi.org/10.38141/10778/75202>



La creciente demanda del mercado mundial, evidencia una tendencia por cafés con perfiles sensoriales con atributos diferenciados. El café procesado por vía seca, denominado natural (CN), viene presentándose como una alternativa, de la cual es importante conocer sus características químicas y microbiológicas para garantizar la calidad final de la bebida. Para lograr lo anterior, fueron evaluados cinco tratamientos, en los cuales el CN se sometió a secado solar (S), secado mecánico (M) ($40\pm 5^\circ\text{C}$) y tres combinaciones: S45%+M, S50%+M, S55%+M, realizando secado solar hasta alcanzar diferentes contenidos de humedad en el café y finalizando con secado mecánico hasta el porcentaje de humedad final. Adicionalmente, se consideró un testigo con café lavado obtenido por vía húmeda (CL) secado mecánicamente. El CN y CL alcanzaron una humedad del 10% al 12% en los diferentes tratamientos, al finalizar el proceso de secado. En promedio para el CN, los contenidos químicos para las variables lípidos totales, ácidos grasos, ácidos orgánicos, ácidos clorogénicos totales, alcaloides y sacarosa no presentaron diferencias significativas con respecto al CL, mientras que las concentraciones de glucosa, fructosa y proteína fueron significativamente mayores en el CN que en el CL. La detección de microorganismos mostró que, mohos y levaduras para CN secado mecánicamente presentaron un valor promedio de $3,0 \times 10^5$ UFC/g en el grano almendra y para café lavado secado mecánicamente un valor de $1,1 \times 10^4$ UFC/g. La concentración de Ocratoxina A, no presentó efecto por tipos de secado y los valores fueron en promedio 7,0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ para CN y 6,4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ para el CL.

Palabras clave: Beneficio del café, café natural, café lavado, secado solar, secado mecánico, composición química, inocuidad, Ocratoxina A, Colombia.

CHEMICAL COMPOSITION AND SAFETY OF DRY PROCESSED *Coffea arabica* L IN COLOMBIA

The growing demand of the world market shows a trend for coffees with sensory profiles with differentiated attributes. Dry-processed coffee, called natural (CN), has been presented as an alternative, of which it is important to know its chemical and microbiological characteristics to guarantee the final quality of the drink. To achieve the above, five treatments were evaluated, in which the CN was subjected to solar drying (S), mechanical drying (M) ($40\pm 5^\circ\text{C}$) and three combinations: S45%+M, S50%+ M, S55%+M, performing solar drying until different moisture contents are reached in the coffee and ending with mechanical drying until the final moisture percentage is reached. In addition, a control was demonstrated with coffee washing obtained by wet method (CL) mechanical drying. The CN and CL reached a humidity of 10% to 12% in the different treatments, at the end of the drying process. On average for the CN, the chemical contents for the variables total lipids, fatty acids, organic acids, total chlorogenic acids, alkaloids and sucrose did not present significant differences with respect to the CL; The data were within the ranges reported by other authors for *C. arabica* L. The concentrations of glucose, fructose and protein were significantly higher in the CN than in the CL. The detection of microorganisms showed that molds and yeasts for mechanically dried CN presented an average value of 3.0×10^5 CFU/g in the almond bean and for mechanically dried washed coffee a value of 1.1×10^4 CFU/g. The concentration of Ochratoxin A did not present an effect due to drying types and the values were on average 7.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ for CN and 6.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ for CL.

Keywords: Coffee processing, natural coffee, washed coffee, sun drying, mechanical drying, chemical composition, innocuous, Ochratoxin A, Colombia.

*Asistente de Investigación. Disciplina de Calidad, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-1532-8055>, <https://orcid.org/0000-0002-9866-6147>, <https://orcid.org/0000-0003-1576-2297>, respectivamente.

** Investigador Científico I. Disciplina de Calidad, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-1166-0165>

El café natural (CN) es un producto que se obtiene a partir del procesamiento del fruto de café por vía seca, que se ha destacado como una alternativa de bajo consumo de agua en el proceso de poscosecha, y se usa a menudo en países donde las precipitaciones son escasas y hay largos períodos de sol para secar adecuadamente los frutos de café (Silva et al., 2008; Vincent, 1987). Etiopía y Yemen fueron pioneros en su comercialización y en la actualidad Brasil, Etiopía, Haití, Indonesia, Paraguay, Nueva Guinea e India, son los países con mayor oferta de este tipo de café en el mercado (Silva et al., 2008).

Mediante el procesamiento vía seca no se retiran las partes constitutivas del fruto, este se seca en su totalidad hasta alcanzar una humedad entre el 10,0% y el 12,5%, generando características específicas y diferenciales en la bebida (Osorio et al., 2022; Puerta, 1996). Este proceso es amigable con el medio ambiente, debido a que disminuye notablemente la huella hídrica (Borém et al., 2018; Isquierdo et al., 2013), pero hay un mayor consumo de energía (secado mecánico) y se requiere mayor área de secado (secado solar), así como mayor cantidad de mano de obra (Osorio et al., 2022). Adicionalmente, en la etapa de trilla debe contarse con una máquina específica para el café cereza seco (ccs).

Para obtener café natural es recomendable iniciar con una masa de café constituida por frutos maduros, cosechados manualmente (Martínez et al., 2022; Osorio et al., 2022; Smrke et al., 2014), seguido por el proceso de secado, que se considera la etapa más crítica, ya que implica un período de tiempo mayor respecto al requerido durante el proceso del café lavado (Malta et al., 2013). Por consiguiente, el secado lento y controlado, que puede fluctuar entre 12 a 21 días al sol y/o complementado mecánicamente, en el que la almendra consolida mayor concentración de azúcares, permite el

desarrollo de las características que identifican al café natural (Knopp et al., 2006). Entre los cambios más destacables en el grano están el cambio del color del grano a pardo–amarillento y diferentes descriptores del atributo fragancia/aroma como chocolate, frutal, caramelo, miel, pulpa dulce y vinoso sabor dulce; lo anterior como respuesta diferencial del tipo de secado (Gallego et al., 2023; Osorio et al., 2022).

Pese a que el mercado ofrece una importante expectativa para el consumo de café natural, es evidente que en muchos casos los procedimientos para su obtención suelen generar atributos variables y no consistentes, los cuales se derivan principalmente de la aparición de hongos y microorganismos que alteran la calidad final (Borém et al., 2008; Elhalis et al., 2023). Es así que, en un escenario con bajo control en el procedimiento, particularmente por efecto de la humedad en el grano y la temperatura ambiental, la inocuidad del producto puede deteriorarse debido a la aparición de hongos filamentosos como *Aspergillus ochraceus*, *Penicillium verrucosum* y *Penicillium viridicatum*, productores de micotoxinas, como la ocratoxina A (OTA) (Batista et al., 2009; Vanesa & Ana, 2013); este compuesto micotóxico que aparte de representar un riesgo permanente para la comercialización del café, pone en riesgo la salud de quien consume la bebida (Milla Flores et al., 2020).

Como resultado de la interacción de la humedad en el grano y de los procesos no controlados durante el secado del café natural se originan compuestos químicos derivados de la actividad microbiológica (de Melo Pereira et al., 2019); la concentración de estos compuestos está influenciada por los diferentes métodos de procesamiento, el origen genético y las condiciones de producción local. Debido a que, durante el secado del café natural estos compuestos químicos pueden alterar la inocuidad y la calidad sensorial de café,

generando resultados poco consistentes, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la composición química, microbiológica y el contenido de OTA de diferentes métodos de secado del café natural, obtenido en la zona cafetera central colombiana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. La investigación se llevó a cabo en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (5° 00' latitud Norte, 75° 36' longitud Oeste y 1.310 m de altitud, con temperatura media de 21,2°C, temperatura máxima de 27,9°C, temperatura mínima de 17°C y humedad relativa del 82,3%, ubicado en Manizales, Caldas. Se emplearon frutos de café 100% maduros, de variedad Cenicafé 1, provenientes de la Estación Experimental Naranjal, durante las cosechas de los años 2020 y 2021. Los frutos se clasificaron hidráulicamente, para eliminar aquellos de inferior calidad, luego se llevó a cabo una clasificación manual consistente en retirar los frutos verdes y pintones. De la unidad experimental de 200 kg, fueron distribuidos aleatoriamente a cada tratamiento 18 kg de café, que conformaron los diferentes procesos de secado: solar (S), mecánico (M) y combinaciones de secado S+M hasta alcanzar el porcentaje de humedad correspondiente para los tratamientos 2 al 4 (Tabla 1). Se incluyó como

testigo, el tratamiento 1 compuesto por café lavado (CL) secado mecánicamente (control). Cada tratamiento contó con nueve unidades experimentales (Gallego et al., 2023).

El proceso de secado solar se realizó en un secador parabólico, garantizando 2,0 cm de altura de capa de café, con una frecuencia de volteo de cuatro veces al día. Para los tratamientos de secado mecánico se utilizó un silo de capa estática con combustión directa (gas propano) y un caudal de aire de 100 m³ min⁻¹, garantizando una capa fija de altura de 35 cm y temperatura constante del aire de secado correspondiente a 40±5°C. Finalmente, el café lavado (CL) se obtuvo despulpando la masa cosechada en un tiempo inferior a 6 horas, permitiendo la fermentación espontánea, con estimación del tiempo de lavado asociado al uso del Fermaestro™ (Peñuela et al., 2013), y secado mecánicamente, hasta alcanzar un porcentaje de humedad, entre el 10% y el 12%.

Una vez la humedad del café alcanzó un nivel entre el 10% al 12%, los granos se trillaron hasta obtener el café almendra, retirando los defectos físicos e impurezas. La almendra sana fue dividida para realizar las diferentes determinaciones bioquímicas y microbiológicas.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos.

Tratamiento	Procesos de secado	Nomenclatura
1	CN secado solar 100%	S100%
2	CN secado solar hasta 45% de humedad + secado mecánico	S45%+M
3	CN secado solar hasta 50% de humedad + secado mecánico	S50%+M
4	CN secado solar hasta 55% de humedad + secado mecánico	S55%+ M
5	CN secado mecánico 100%	M100%
6	Café lavado con secado mecánico (Control)	CL

Determinación de lípidos y ácidos grasos.

La determinación de lípidos totales se realizó en un equipo Soxhlet según el método de la AOAC 945.1 (Kinton, 2005) mediante una extracción sólido-líquido, a partir de la almendra de café molida criogénicamente y extraída con éter de petróleo. Posteriormente, en la fracción lipídica se realizó la determinación de ácidos grasos libres, empleando un equipo de cromatografía de gases (HP-8860) acoplada a un detector selectivo de masas (HP-6890), según el método de referencia AOAC 969.33 (Firestone, 2005). La cuantificación de cada compuesto se realizó por normalización y su identificación por comparación de los espectros obtenidos con la base de datos de la librería NIST 2017.

Determinación de ácidos clorogénicos y orgánicos.

La extracción de ácidos clorogénicos totales se realizó siguiendo el método DIN 10767 a partir de muestras desengrasadas de café almendra con metanol al 70% y posterior purificación del extracto con reactivos de Carrez I y II. La cuantificación se llevó a cabo en un equipo de espectrofotometría UV/VIS (Beckham DU-650) utilizando tres longitudes de onda de 265, 328 y 380 nm, empleando como referencia en la curva de calibración un estándar de ácido clorogénico 5-CQA (Marín & Puerta, 2008)

Los ácidos orgánicos fueron extraídos con agua a 90°C por 5 min, separados y cuantificados en un cromatógrafo líquido de alta eficiencia acoplado a un detector de arreglo de diodos (Alliance 2690-996 PDA), utilizando una columna Supelcogel C-610H de 300 mm x 7,8 mm, a un flujo de 0,5 mL min⁻¹, con una fase móvil isocrática al 0,1% de H₃PO₄ y una temperatura de 35°C. Los diferentes ácidos fueron detectados a 210 nm y cuantificados a partir de la construcción de curvas de calibración realizadas con

estándares de referencia de cada ácido orgánico (Echeverri-Giraldo et al., 2024).

Determinación de los alcaloides (cafeína, trigonelina y teobromina) y proteína.

La determinación de los alcaloides (cafeína, trigonelina y teobromina), se realizó según la Norma ISO 20481:2008 por cromatografía líquida de alta eficiencia con un detector de arreglo de diodos (Alliance 2690-996 PDA), utilizando para la separación una columna Symmetry C18 (Waters, 4,6 × 250 mm, 100 Å, 5 μm) y una solución de agua, metanol, ácido acético (59:40:1 v/v/v) como fase móvil. Los alcaloides fueron detectados a 273 nm y la cuantificación fue realizada con curvas de calibración empleando estándares de referencia.

El contenido de proteína cruda se determinó por el método combustión seca (Dumas) AOAC 990.03 (Wendt, 2005) en un analizador elemental marca LECO a partir de la cuantificación de nitrógeno presente en la muestra aplicando el factor 6,25.

Determinación de azúcares.

Los azúcares se determinaron según el método de referencia ISO 10504:2013, empleando un cromatógrafo líquido de alta eficiencia (Alliance e2690) acoplado a un detector de índice de refracción (Waters 2475). En la separación se empleó una columna Sugar-pak I (5 μm; 4,6 X 350 mm) con una fase móvil 100 mM EDTA-Ca, a un flujo de 0,5 mL min⁻¹ y una temperatura de 85°C. La cuantificación de cada analito se realizó a partir de curvas de calibración, empleando estándares de referencia.

Determinación de OTA y microbiota.

Para la detección de OTA se empleó el método de fluorescencia de Vicam Ochrastest[®], empleando columnas de inmunoafinidad (OchraTestTM), realizando una extracción del café almendra molido con bicarbonato de sodio en metanol

al 1%. Posteriormente, a través de la columna de inmunoafinidad que contiene anticuerpos específicos para la OTA, el extracto obtenido fue cuantificado en un fluorómetro serie 4 EX en un rango de cuantificación entre 1-50 ppb ($\mu\text{g kg}^{-1}$).

Para la determinación de la microbiota se efectuaron conteos de tres grupos de microorganismos, en los frutos secos y en el café almendra para cada uno de los tratamientos evaluados después de los procesos de secado; se cuantificaron las unidades formadoras de colonia (UFC) tanto en el fruto seco, café pergamino seco y su correspondiente almendra. Se realizó la siembra en un sistema de medio de cultivo 3M™ Petrifilm™, siguiendo la metodología para bacterias mesófilas aerobias (AOAC 990.12), y para mohos y levaduras (AOAC 997.02) (Andrews & Hammack, 2005). Para el recuento de las bacterias mesófilas el tiempo de incubación fue de 24 horas a $35\pm 1^\circ\text{C}$, mientras que, para el crecimiento de mohos y levaduras, el tiempo de incubación fue de dos a tres días a una temperatura de $25\pm 1^\circ\text{C}$.

Análisis de información

Se realizó un análisis de varianza con nivel de significancia del 5,0% en todas las variables, cuando se identificó efecto de tratamientos se aplicó una prueba múltiple Tukey al 5%, con el fin de establecer las diferencias entre los respectivos tratamientos y la prueba de comparación Dunnett al 5%, para las comparaciones con respecto al tratamiento testigo CL. Específicamente para las variables de tipo microbiológico, se evaluaron los promedios e intervalos de confianza al 95%, con el fin de establecer los cambios en sus poblaciones, entre la matriz fruto vs café almendra, a nivel de cada tratamiento para el CN y en café pergamino vs café almendra para el CL.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lípidos totales y ácidos grasos. Para todos los tratamientos de secado de CN y CL se calcularon los contenidos de lípidos, expresados en base húmeda (b.h). Los lípidos, que constituyen en el grano del café, contribuyen al transporte de los aromas y sabores (Figueiredo et al., 2015), así como al cuerpo de la bebida y al transporte de vitaminas liposolubles (Oestreich-Janzen, 2010). Los promedios de lípidos totales en todos los tratamientos de secado estuvieron entre 10,2% a 10,5% (Tabla 2), siendo inferiores a los registrados por Rendón et al. (2014), quienes hallaron valores cercanos al 12% en la variedad IPR98 (Híbrido de Timor \times Villa Sarchí), procesada como café natural y café semi-húmedo. Sin embargo, concuerdan con los valores entre 10,7% y 12,3% (b.s) reportados por Echeverri-Giraldo et al. (2020) en variedades mejoradas de *Coffea arabica* L., cultivadas en Colombia procesadas por vía húmeda.

En estudios anteriores, Villareal-Peña et al. (2012) establecieron que los ácidos grasos con contenidos superiores al 0,5% se consideraban como ácidos grasos mayoritarios y los ácidos grasos con contenidos inferiores como minoritarios. Por consiguiente, los ácidos grasos libres mayoritarios identificados fueron: palmítico, linoleico, esteárico, oleico y araquídico. Los ácidos grasos libres presentes en la fracción lipídica del café natural y del café lavado no presentaron diferencias en su concentración para los dos tipos de procesamiento de café evaluados, en los seis tratamientos de secado probados (Tabla 2). Estos valores estuvieron de acuerdo con los reportados para *C. arabica* en variedades sembradas en Colombia (Osorio et al., 2022) sin detectarse cambios significativos por efecto de tratamientos.

Tabla 2. Promedios de los compuestos químicos (%) del café almendra en seis procesos de secado.

Compuesto (%)	S100%		S45%+M		S50%+M		S55%+M		M100%		CL (Control)							
	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv						
Lípidos totales	10,45	a	1,17	10,47	a	0,83	10,32	a	1,47	10,23	a	0,76	10,46	a	1,23	9,85	a	0,80
Palmitico	41,49	a	2,29	41,16	a	1,89	41,44	a	1,90	40,89	a	1,85	40,83	a	2,05	41,06	a	1,82
Linoleico	34,63	a	1,56	34,9	a	1,59	35,07	a	1,97	34,91	a	1,38	34,89	a	1,62	34,87	a	1,17
Oleico	10,14	a	0,68	10,19	a	0,70	10,02	a	0,61	10,18	a	0,84	10,46	a	0,75	10,26	a	0,59
Esteárico	9,43	a	1,05	9,37	a	0,94	9,22	a	0,76	9,6	a	0,95	9,3	a	0,87	9,43	a	0,83
Araquídico	4,29	a	0,93	4,37	a	0,89	4,24	a	0,93	4,44	a	0,86	4,51	a	1,19	4,37	a	0,91

* Letras no comunes en las filas indican diferencias estadísticas entre los tratamientos según prueba Tukey al 5%.

Ácidos clorogénicos y ácidos orgánicos.

Respecto al contenido total de ácidos clorogénicos (CQA), estos pueden variar según la especie de café (Higdon & Frei, 2006), el grado de maduración de los frutos, las condiciones ambientales donde se desarrolla el cultivo y las prácticas de manejo del producto agrícola tanto en el campo como en la fase de poscosecha (Bauer et al., 2018). En este estudio no hubo diferencias estadísticas entre los cinco procesos de secado de CN y el CL, registrándose promedios de ácidos clorogénicos totales entre 3,72%–4,70% para el CN y 3,79% para el café lavado. Estos niveles estuvieron por debajo de los reportados en Brasil por Scholz et al. (2019), donde obtuvieron contenidos de CQA entre 7,9% a 8,1%; confirmando que las condiciones ambientales tienen mayor influencia sobre el contenido de estos ácidos, aún por encima del proceso mismo de secado.

En el contenido de ácidos orgánicos no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de procesamiento de CN y el testigo CL (Tabla 3). De forma similar, Osorio et al. (2023) reportaron contenidos similares en los ácidos cítrico, quínico, málico y acético en CN. Por su parte, para cafés lavados, Santiago et al. (2020) y Echeverri-Giraldo et al. (2024) reportaron contenidos de ácido cítrico entre 7,5-13 g kg⁻¹, oxálico entre 0,4- 0,8 g kg⁻¹, málico entre 2,6-4,4 g kg⁻¹, quínico entre 1,9-3,4 g kg⁻¹, succínico entre 1,5 – 3,7 g kg⁻¹, láctico entre 0,5- 1,2 g kg⁻¹ y acético entre 9,3 -14 g kg⁻¹; de estos ocho ácidos, el acético y láctico pueden generarse por actividad de la microbiota presente en el grano de café lavado (Clarke & Vitzthum, 2001; Silva et al., 2008; Koshiro et al., 2015; Osorio Pérez et al., 2023) y estos a su vez, se relacionan con el dulzor y la acidez de la bebida de café.

En general, no se detectaron variaciones significativas por efecto de los tratamientos evaluados en los promedios de lípidos totales, ácidos grasos libres y en la concentración de ácidos orgánicos en las muestras de café almendra, con valores similares a los reportados para la especie *C. arabica* (Echeverri-Giraldo et al., 2020; Nikolova-Damyanova et al., 1998).

Azúcares. Los contenidos de azúcares reductores presentaron diferencias estadísticamente significativas en los tratamientos de secado de CN con respecto al CL, para la glucosa y la fructuosa (Figura 1). El promedio de glucosa fue de 0,14% en todos los tratamientos de secado del CN, triplicando significativamente los contenidos hallados en el tratamiento testigo (CL) con 0,06% (Figura 1a). Este comportamiento se reflejó también para los contenidos de fructosa, cuyos promedios fueron 0,16% superiores en todas las modalidades de secado de CN, con respecto al encontrado en el testigo (CL) 0,08% (Figura 1b). Con relación a la sacarosa, su contenido estuvo entre 8,66%–8,84% sin presentar efecto de tratamientos (Figura 1c). En contraste, el contenido de fructosa y glucosa (azúcares reductores) suele ser mayor en el procesamiento de café vía seca que en el café lavado (Knopp et al., 2006), siendo importante resaltar que dichas estructuras cumplen la función como precursores del aroma (Scholz et al., 2019). Estudios recientes realizados en la zona cafetera colombiana por Osorio et al. (2022), reportan contenidos de sacarosa de 9,6% para CN a partir de combinaciones de secado solar y mecánico.

Cafeína, trigonelina, teobromina y proteína total.

Los alcaloides (cafeína, trigonelina y teobromina) no mostraron diferencias estadísticas en los tratamientos evaluados (Tabla 4). El contenido de cafeína, en promedio estuvo en 1,09% para café lavado

Tabla 3. Promedios, rangos y variación de los ácidos orgánicos (g kg⁻¹) en el café natural y lavado, en los tratamientos evaluados.

Ácido (g kg ⁻¹)		S100%	S45%+M	S50%+M	S55%+M	M100%	CL(Control)
Cítrico	Promedio	9,69	10,23	9,92	10,06	9,51	9,43
	Mín-Máx	8,2-11,2	9,3-11,6	8,8-11,0	9,2-10,9	8,3-10,7	8,5-10,3
	Desv. Est.	1,95	1,20	1,40	1,08	1,59	1,19
Málico	Promedio	4,76	5,11	4,77	4,51	4,29	3,62
	Mín-Máx	3,9-5,5	4,5-5,7	3,7-5,8	3,6-5,4	3,3-5,3	2,7-4,5
	Desv. Est.	1,03	0,84	1,35	1,18	1,26	1,15
Oxálico	Promedio	0,04	0,03	0,03	0,06	0,04	0,14
	Mín-Máx	0,02-0,07	0,0-0,07	0,0-0,06	0,01-0,11	0,0-0,09	0,01-0,25
	Desv. Est.	0,04	0,04	0,04	0,07	0,06	0,16
Succínico	Promedio	1,72	1,78	1,72	1,73	1,67	1,45
	Mín-Máx	1,1-2,3	1,5-2,1	1,4-2,1	1,4-2,0	1,3-2,1	0,8-2,0
	Desv. Est.	0,78	0,43	0,48	0,41	0,54	0,78
Quínico	Promedio	7,39	8,64	7,99	8,06	8,35	7,64
	Mín-Máx	5,6-9,2	7,5-9,8	6,6-9,4	6,4-9,7	6,4-10,3	6,0-9,3
	Desv. Est.	2,38	1,52	1,80	2,10	2,59	2,10
Láctico	Promedio	0,36	0,31	0,34	0,35	0,35	0,30
	Mín-Máx	0,29-0,4	0,27-0,34	0,27-0,4	0,3-0,4	0,29-0,41	0,25-0,35
	Desv. Est.	0,09	0,05	0,08	0,06	0,08	0,06
Acético	Promedio	3,90	3,78	4,38	4,01	2,68	2,68
	Mín-Máx	2,4-5,4	2,2-5,3	2,5-6,3	2,7-5,3	1,9-3,4	1,2-4,1
	Desv. Est.	1,90	2,01	2,49	1,74	0,96	1,87
Tartárico	Promedio	0,71	0,69	0,71	0,71	0,53	0,51
	Mín-Máx	0,5-0,9	0,5-0,8	0,4-0,9	0,4-1,03	0,3-0,7	0,2-0,8
	Desv. Est.	0,28	0,22	0,36	0,41	0,29	0,44

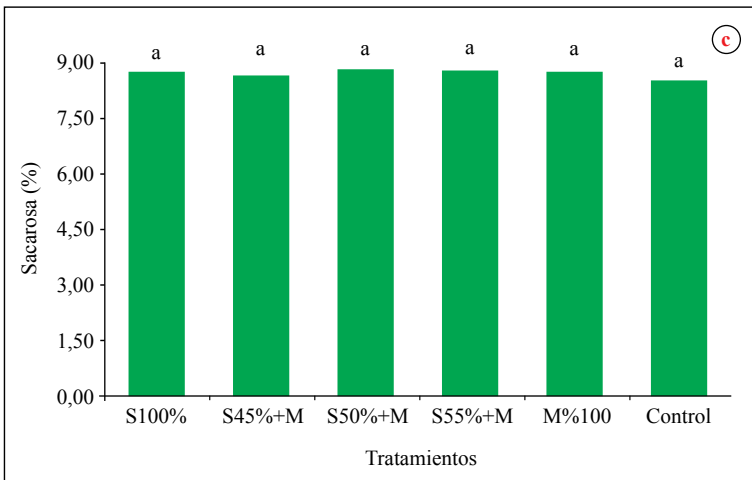
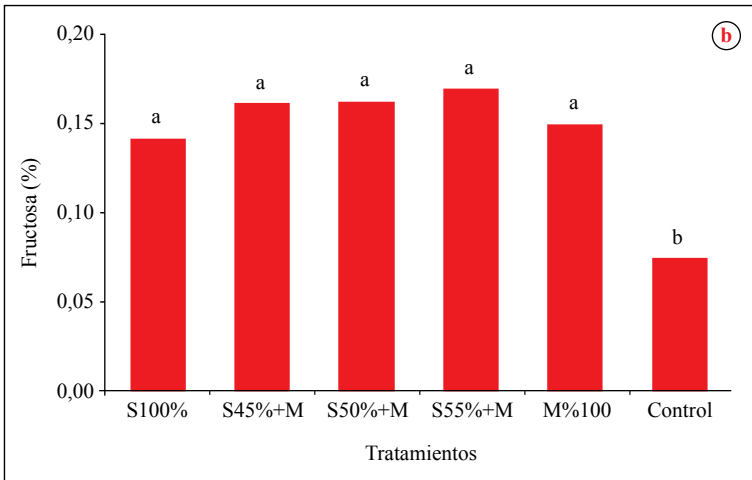
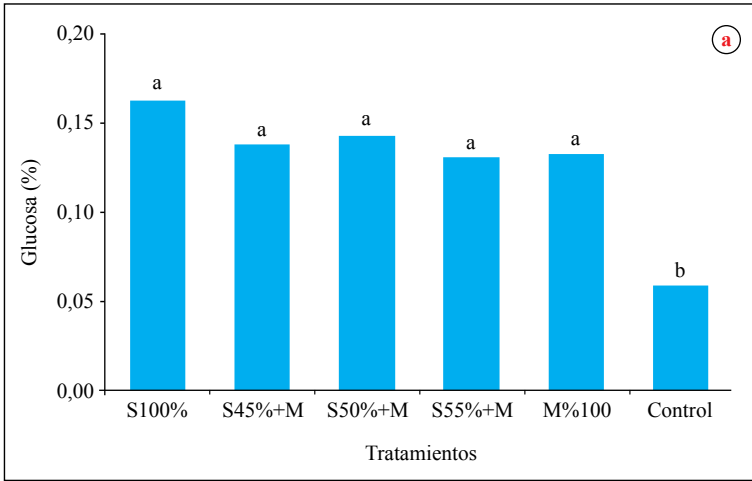


Figura 1. Concentración promedio de azúcares por efecto de los tratamientos. a. Glucosa, b. Fructosa, c. Sacarosa. Letras no comunes indican diferencias estadísticas según prueba Tukey al 5%.

y 1,12% para el café natural (Tabla 4). Con respecto a la trigonelina, los valores promedios fueron de 1,02% y 0,95% para el CN y CL, respectivamente (Tabla 4). Estos contenidos fueron similares a los reportados por Scholz et al. (2019) para CN, entre 1,22% a 1,23% para cafeína y entre 1,06% a 1,19% para trigonelina. Para la teobromina todos los tratamientos y el testigo presentaron el mismo promedio.

Los contenidos de proteína total fluctuaron entre 12,91% a 14,55% (Tabla 4); comportamiento similar se presenta en los estudios realizados por Barbosa et al. (2019), quienes reportan contenidos de proteína entre 13,55% – 15,23%. Al respecto, Franca et al. (2005) establecieron que un mayor contenido de proteínas en los granos de café estaba asociado con mayor calidad sensorial.

Ocratoxina A – (OTA). El promedio de OTA fue de $7,0 \mu\text{g kg}^{-1}$ (ppb) (Tabla 4). Las muestras de café natural secadas 100% al sol y 100% mecánicamente, presentaron concentraciones similares de OTA. En los tres procesos de secado combinando secado solar y mecánico, se presentaron concentraciones de OTA entre $6,16$ a $8,16 \mu\text{g kg}^{-1}$. En el café lavado el contenido de OTA fue $6,4 \mu\text{g kg}^{-1}$, evidenciando que las muestras de café verde, provenientes tanto del CN como del CL se encuentran dentro de los rangos reportados para estos tipos de cafés. Estudios realizados por Paterson & Taniwaki (2014) mostraron valores en el rango de $4,90$ a $37,73 \mu\text{g kg}^{-1}$ para café almendra y estudios realizados por Vanesa & Ana (2013) reportan para el café colombiano niveles promedios de OTA de $10,0$ y $6,8 \mu\text{g kg}^{-1}$ para café almendra y soluble, respectivamente.

Los límites permitidos de OTA en el café almendra no han sido regulados, pero pueden acercarse a niveles tan bajos como $2,0$ a $4,0 \mu\text{g kg}^{-1}$ (Puerta, 2003; Pabón et al., 2023). Cabe

resaltar que los límites permitidos según la regulación internacional de la Unión Europea (UE) publicado en 2022 (N° 1370/2022) para granos de café tostado y café tostado molido es de $3,0 \mu\text{g kg}^{-1}$ y para el café soluble (café instantáneo) de $5,0 \mu\text{g kg}^{-1}$; Sin embargo, la UE aún no ha establecido los límites máximos para el café almendra.

Microbiota. La variación de la temperatura y del tiempo de secado es un factor crítico para crecimiento de diversos microorganismos (Silva et al., 2008). En el presente estudio las poblaciones de bacterias mesófilas aerobias presentaron valores de $2,47 \times 10^7$ UFC/g, iguales estadísticamente, tanto para los frutos de café como para el café almendra (Figura 2).

El secado solar presentó $1,0 \times 10^7$ UFC/g, siendo los menores promedios, así como la más baja variabilidad de bacterias aerobias, seguidas por el tratamiento S50%+M y S55%+M, cuyas poblaciones fueron de $1,28 \times 10^7$ y $1,92 \times 10^7$ UFC/g, respectivamente. Estudios de Nakayama et al. (2020) reportan que de las tres poblaciones de microorganismos (bacterias aerobias, mohos y levaduras), en el café natural las bacterias aerobias totales disminuyen con el tiempo de secado y la reducción de la actividad de agua; y los cafés secados al sol por más de 18 días favorecen el crecimiento de bacterias.

Finalmente, las evaluaciones del número de UFC de mohos y levaduras presentaron promedios superiores a $4,4 \times 10^5$ UFC/g en las poblaciones del fruto seco de todos los tratamientos, con respecto a los valores obtenidos en el café almendra. Este comportamiento fue diferente en el secado mecánico, donde las poblaciones de estos grupos de microorganismos predominaron en el café almendra con valores de $3,0 \times 10^5$ UFC/g (Figura 3). Puede observarse una mayor variabilidad en los contenidos promedios de microbiota,

Tabla 4. Promedio y desviación estándar (desv) de cafeína, teobromina, trigonelina, CQA, proteína y OTA en las muestras de café almendra.

Compuesto	S100%		S45%+M		S50%+M		S55%+M		M100%		CL(Control)							
	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv						
Cafeína (%)	1,11	a	0,09	1,12	a	0,135	1,11	a	0,142	1,14	a	0,125	1,12	a	0,108	1,09	a	0,097
Teobromina (%)	0,02	a	0,008	0,02	a	0,006	0,02	a	0,007	0,02	a	0,004	0,02	a	0,007	0,02	a	0,007
Trigonelina (%)	1,02	a	0,143	1,02	a	0,124	1,02	a	0,129	1,02	a	0,116	1,01	a	0,125	0,95	a	0,123
CQA (%)	3,85	a	0,756	3,81	a	0,756	4,05	a	0,789	3,72	a	0,873	3,89	a	0,852	3,79	a	1,069
Proteína (%)	13,73	a	0,652	13,85	a	0,53	13,70	a	0,611	13,83	a	0,456	13,64	a	0,511	12,33	b	4,664
OTA (µg/kg)	6,99	a	4,42	8,16	a	5,57	7,08	a	5,04	6,16	a	4,81	7,07	a	3,72	6,4	a	6,44

particularmente en la cereza seca, indicando que no es posible generar una relación entre los microorganismos presentes y el proceso de obtención de CN bajo las condiciones de secado evaluadas en este estudio.

Hamdouche et al. (2016) encontraron que la ecología microbiana varió en función del tipo de procesamiento (húmedo o seco), del origen geográfico y de las especies de café utilizadas. Además, las diferentes etapas del proceso pueden influir en la estructura de las comunidades microbianas encontradas en las muestras de café. Así mismo, Nakayama et

al. (2020) establecieron que la prevalencia de una especie y su sucesión microbiana en el grano de café depende de las condiciones fisicoquímicas del medio ambiente y de la composición química del fruto. En este estudio no se observaron diferencias en la microbiota, debido posiblemente al uso de una misma variedad en todos los tratamientos, así como de un origen único del cultivo. Adicionalmente, a las diferentes clasificaciones previas al proceso de secado que eliminaron frutos de inferior calidad y que de esta manera redujeron la variabilidad de poblaciones de microorganismos.

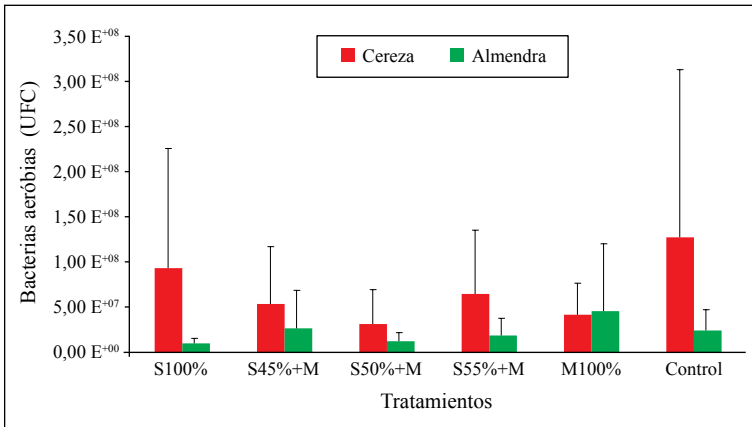


Figura 2. Valores de las poblaciones de bacterias aeróbicas en el fruto de café seco y en el café almendra de los tratamientos evaluados (UFC). En el tratamiento control la comparación de la concentración promedio de comunidades microbianas se hizo respecto al café en pergamino. Barras en los promedios indican intervalos de confianza al 5% de significancia.

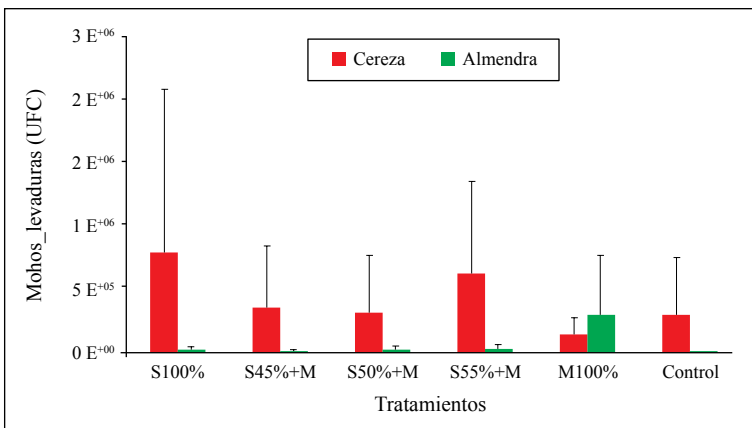


Figura 3. Valores de las poblaciones de mohos-levaduras en el fruto de café seco y en el café almendra para los tratamientos evaluados (UFC). En el tratamiento control la comparación de la concentración promedio de comunidades microbianas se hizo respecto al café en pergamino. Barras en los promedios indican intervalos de confianza al 5% de significancia.

Este estudio permitió establecer que es posible obtener café natural (CN) con características de calidad química e inocuidad reproducible, sin que la dinámica microbiana afecte negativamente el producto final. Los principales cambios están relacionados con el contenido de azúcares reductores y proteínas, los cuales están influenciados por los procesos de poscosecha más que por el origen. La concentración de lípidos totales y el promedio de los ácidos orgánicos estuvo dentro de los rangos registrados por otros estudios para *C. arabica* en variedades sembradas en Colombia, en todos los tratamientos, así como los promedios de sacarosa que se encontraron entre 8,53% y 8,85%, tanto para el café natural como para el café lavado. La concentración de OTA no presentó variaciones por tipo de procesamientos; cuyos niveles fueron en promedio 7,0 $\mu\text{g kg}^{-1}$ para café natural y 6,4 $\mu\text{g kg}^{-1}$ para el café lavado. Microbiológicamente, hubo una gran variación en los promedios en UFC de bacterias aerobias y mohos-levaduras en el fruto seco y en el café almendra, sin afectar la calidad y la inocuidad del café natural. Los resultados permiten establecer que, bajo condiciones adecuadas y procesos

de clasificación que aseguraron la calidad y el estado de madurez del fruto, además de los controles en el secado, es posible obtener café natural con características de calidad y de inocuidad, las cuales son similares o mejores que las obtenidas en el proceso del café lavado.

AGRADECIMIENTOS

En la Disciplina de Biometría a Luis Carlos Imbachí y en la Disciplina de Experimentación a Carlos Gonzalo Mejía, José Farid López y Jhon Félix Trejos. En la Disciplina de Calidad a Claudia Gómez, Paola Calderón, Wilson Vargas y Víctor Castañeda. La investigación fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), código CAL102003.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, Curación de datos, Redacción–borrador original: **CPG** y **VO**; Análisis formal, Metodología, Validación: **CPG**, **LFE** y **VO**; Redacción- revisión y edición: **CPG**, **LFE**, **VO** y **JP**. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.





LITERATURA CITADA

- Andrews, W., & Hammack, T. (2005). Microbiological Methods. En W. Horwitz & G. W. Latimer (Eds.), *Official Methods of Analysis of AOAC International* (18.^a ed., pp. 1-252). AOAC International.
- Barbosa, M. de S. G., Scholz, M. B. dos S., Kitzberger, C. S. G., & Benassi, M. de T. (2019). Correlation between the composition of green Arabica coffee beans and the sensory quality of coffee brews. *Food Chemistry*, 292, 275-280. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.072>
- Batista, L. R., Chalfoun, S. M., Silva, C. F., Cirillo, M., Varga, E. A., & Schwan, R. F. (2009). Ochratoxin A in coffee beans (*Coffea arabica* L.) processed by dry and wet methods. *Food Control*, 20(9), 784-790. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.10.003>
- Bauer, D., Abreu, J., Jordão, N., Rosa, J. S. D., Freitas-Silva, O., & Teodoro, A. (2018). Effect of Roasting Levels and Drying Process of *Coffea canephora* on the Quality of Bioactive Compounds and Cytotoxicity. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(11), 3407. <https://doi.org/10.3390/ijms19113407>
- Borém, F. M., Coradi, P. C., Saath, R., & Oliveira, J. A. (2008). Qualidade do café natural e despulpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. *Ciência e Agrotecnologia*, 32(5), 1609–1615. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500038>
- Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Alves, G. E., Ribeiro, D. E., Siqueira, V. C., & Taveira, J. H. da S. (2018). Quality of Natural Coffee Dried Under Different Temperatures and Drying Rates. *Coffee Science*, 13(2), 159–167.

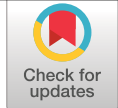
- Clarke, R. J., & Vitzthum, O. G. (Eds.). (2001). *Coffee: Recent Developments* (1a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470690499>
- Echeverri-Giraldo, L. F., Ortiz, A., Gallego, C. P., & Imbachí, L. C. (2020). Caracterización de la fracción lipídica del café verde en variedades mejoradas de *Coffea arabica* L. *Revista Cenicafé*, 71(2), 39–52. <https://doi.org/10.38141/10778/71203>
- Echeverri-Giraldo, L. F., Osorio Pérez, V., Tabares Arboleda, C., Vargas Gutiérrez, L. J., & Imbachí Quinchua, L. C. (2024). Content of Acidic Compounds in the Bean of *Coffea arabica* L., Produced in the Department of Cesar (Colombia), and Its Relationship with the Sensorial Attribute of Acidity. *Separations*, 11(2), 52. <https://doi.org/10.3390/separations11020052>
- Elhalis, H., Cox, J., & Zhao, J. (2023). Coffee fermentation: Expedition from traditional to controlled process and perspectives for industrialization. *Applied Food Research*, 3(1), 100253. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100253>
- Figueiredo, L., Meira Borem, F., Carmanini Ribeiro, F., Silva Giomo, G., Henrique Da Silva Taveira, J., & Ribeiro Malta, M. (2015). Fatty acid profiles and parameters of quality of specialty coffees produced in different Brazilian regions. *African Journal of Agricultural Research*, 10(35), 3484–3493. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9697>
- Firestone, D. (2005). Oils and Fats. En W. Horwitz & G. W. Latimer (Eds.), *Official Methods of Analysis of AOAC International* (18.^a ed., pp. 1-72). AOAC International.
- Franca, A. S., Mendonça, J. C. F., & Oliveira, S. D. (2005). Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. *LWT—Food Science and Technology*, 38(7), 709–715. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.08.014>
- Gallego, C. P., Imbachí, L. C., & Osorio, V. (2023). Influencia del proceso de secado del café natural en las características físicas del grano y la calidad sensorial. *Revista Cenicafé*, 74(1), e74107. <https://doi.org/10.38141/10778/74107>
- Hamdouche, Y., Meile, J. C., Nganou, D. N., Durand, N., Teyssier, C., & Montet, D. (2016). Discrimination of post-harvest coffee processing methods by microbial ecology analyses. *Food Control*, 65, 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.022>
- Higdon, J. V., & Frei, B. (2006). Coffee and Health: A Review of Recent Human Research. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(2), 101-123. <https://doi.org/10.1080/10408390500400009>
- Isquierdo, E., Borém, F., Andrade, E., Corrêa, J., Oliveira, P., & Alves, G. (2013). Drying Kinetics and Quality of Natural Coffee. *Transactions of the ASABE*, 56(3), 995–1001. <https://doi.org/10.13031/trans.56.9794>
- Kinton, V. (2005). Malt Beverages and Brewing Materials. En W. Horwitz & G. W. Latimer (Eds.), *Official Methods of Analysis of AOAC International* (18.^a ed., pp. 1-42). AOAC International.
- Knopp, S., Bytof, G., & Selmar, D. (2006). Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans. *European Food Research and Technology*, 223(2), 195-201. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0172-1>
- Koshiro, Y., Jackson, M. C., Nagai, C., & Ashihara, H. (2015). Changes in the content of sugars and organic acids during ripening of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* fruits. *European Chemical Bulletin*, 4(8), 378–383. <https://www.eurchembull.com/?mno=66742>
- Malta, M. R., Rosa, S. D. V. F. D., Lima, P. M., Fassio, L. D. O., & Santos, J. B. (2013). Alterações na qualidade do café submetido a diferentes formas de processamento e secagem. *Revista Engenharia na Agricultura*, 21(5), 431–440. <https://doi.org/10.13083/reveng.v21i5.450>
- Marin, C., & Puerta, G. I. (2008). Contenido de ácidos clorogénicos en granos de *Coffea arabica* L. y *C. Canephora*, según el desarrollo del fruto. *Revista Cenicafé*, 59(1), 7–28. <http://hdl.handle.net/10778/60>
- Martinez, S. J., Batista, N. N., Bressani, A. P. P., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2022). Molecular, Chemical, and Sensory Attributes Fingerprinting of Self-Induced Anaerobic Fermented Coffees from Different Altitudes and Processing Methods. *Foods*, 11(24), 3945. <https://doi.org/10.3390/foods11243945>
- Milla Flores, F. H., & Castro Luna, A. (2020). Evaluación del nivel contaminante de ocratoxina a (ota) mediante columnas de inmunoespecificidad y cromatografía líquida de alta eficiencia en coffeea arabica l. “Café”. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 86(2), 164–174. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v86i2.286>
- Nakayama, C. C., Teixeira, A. A., Teixeira, R. R., Reis, M., Monteiro, A., Bueno, J., & Taniwaki, M. H. (2020). Sucessão de microrganismos em diferentes estádios de secagem do café e sua influência na bebida. *Brazilian Journal of Development*, 6(1), 2402–2418. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-177>
- Nikolova-Damyanova, B., Velikova, R., & Jham, G. N. (1998). Lipid classes, fatty acid composition and

- triacylglycerol molecular species in crude coffee beans harvested in Brazil. *Food Research International*, 31(6–7), 479–486. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(99\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00016-2)
- Oestreich-Janzen, S. (2010). Chemistry of Coffee. En H.-W. Liu & L. Mander (Eds.), *Comprehensive Natural Products II* (Vol. 3, pp. 1085–1117). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008045382-8.00708-5>
- Osorio Pérez, V., Matallana Pérez, L. G., Fernandez-Alduenda, M. R., Alvarez Barreto, C. I., Gallego Agudelo, C. P., & Montoya Restrepo, E. C. (2023). Chemical Composition and Sensory Quality of Coffee Fruits at Different Stages of Maturity. *Agronomy*, 13(2), 341. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020341>
- Osorio, V., Pabón, J., Shuler, J., & Fernández-Alduenda, M. R. (2022). Efecto de la combinación de procesos de secado en la calidad del café natural obtenido vía seca. *Revista Cenicafé*, 73(1), e73101. <https://doi.org/10.38141/10778/73101>
- Pabón, J., Osorio, V., & Gallego, C. P. (2023). Inocuidad del café durante la interrupción del secado mecánico. *Revista Cenicafé*, 74(2), e74205. <https://doi.org/10.38141/10778/74205>
- Paterson, R. R. M., Lima, N., & Taniwaki, M. H. (2014). Coffee, mycotoxins and climate change. *Food Research International*, 61, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.037>
- Peñuela-Martínez, A. E., Pabón, J., & Sanz-Uribe, J. R. (2013). Método fermaestro: Para determinar la finalización de la fermentación del mucilago de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 431, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0431>
- Puerta, G. I. (2003). Prevenga la ochratoxina A y mantenga la inocuidad y la calidad del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 317, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0317>
- Puerta, G. I. (1996). Evaluación de la calidad del café colombiano procesado por vía seca. *Revista Cenicafé*, 47(2), 85–90. <http://hdl.handle.net/10778/63>
- Rendón, M. Y., de Jesus García Salva, T., & Bragagnolo, N. (2014). Impact of chemical changes on the sensory characteristics of coffee beans during storage. *Food Chemistry*, 147, 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.123>
- Santiago, W. D., Teixeira, A. R., Santiago, J. D. A., Lopes, A. C. A., Brandão, R. M., Caetano, A. R., Cardoso, M. D. G., & Resende, M. L. V. (2020). Development and validation of chromatographic methods to quantify organic compounds in green coffee (*Coffea arabica*) beans. *Australian Journal of Crop Science*, 14(08):2020, 1275–1282. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.08.p2433>
- Scholz, M. B. D. S., Prudencio, S. H., Kitzberger, C. S. G., & Silva, R. (2019). Physico-chemical characteristics and sensory attributes of coffee beans submitted to two post-harvest processes. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(1), 831–839. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9995-x>
- Silva, C., Batista, L., Abreu, L., Dias, E., & Schwan, R. (2008). Succession of bacterial and fungal communities during natural coffee (*Coffea arabica*) fermentation. *Food Microbiology*, 25(8), 951–957. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2008.07.003>
- Smrke, S., Kros拉克ova, I., Gloess, A. N., & Yeretizian, C. (2015). Differentiation of degrees of ripeness of Catuai and Tipica green coffee by chromatographical and statistical techniques. *Food Chemistry*, 174, 637–642. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.060>
- Vanesa, D., & Ana, P. (2013). Occurrence of Ochratoxin A in coffee beans, ground roasted coffee and soluble coffee and method validation. *Food Control*, 30(2), 675–678. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.09.004>
- Villarreal, D., Baena, L. M., & Posada, H. E. (2012). Análisis de lípidos y ácidos grasos en café verde de líneas avanzadas de *Coffea arabica* cultivadas en Colombia. *Revista Cenicafé*, 63(1), 19–40. <http://hdl.handle.net/10778/520>
- Vincent, J.-C. (1987). Green Coffee Processing. En R. J. Clarke & R. Macrae (Eds.), *Coffee* (pp. 1–33). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3417-7_1
- Wendt, N. J. (2005). Animal Feed. En W. Horwitz & G. W. Latimer (Eds.), *Official Methods of Analysis of AOAC International* (18.^a ed., pp. 1–72). AOAC International.

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CAFÉ PERGAMINO SECO Y ALMENDRA VERDE MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CERCANO

Claudia R. Gómez Parra *, Aristóteles Ortiz **, Jenny Paola Pabón Usaquén *,
Valentina Osorio Pérez *

Gómez, C. R., Ortiz, A., Pabón, J., & Osorio, V. (2024). Determinación del contenido de humedad del café pergamino seco y almendra verde mediante espectroscopia de infrarrojo cercano. *Revista Cenicafé*, 75(2), e75203. <https://doi.org/10.38141/10778/75203>



El contenido de humedad es un parámetro físico de especial importancia, debido a que es el punto de partida para la conservación de la calidad durante la comercialización y vida útil del café. En esta investigación, se evaluó la viabilidad de la técnica de Espectroscopia de Infrarrojo Cercano NIRS como una alternativa para la predicción del contenido de humedad del café pergamino seco (cps) y café almendra. La humedad se determinó por el método de referencia de acuerdo a la NTC 2325 de 2005 y las mismas muestras fueron analizadas por NIRS en un rango de longitud de onda de 400 nm a 2.490 nm. Para el desarrollo de los modelos se utilizaron 433 muestras de cps y 430 muestras de café almendra. La regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) fue la que presentó un mejor ajuste para las dos matrices de café, lo cual se evidencia por el valor de los indicadores estadísticos. Para el cps, el coeficiente de determinación de la validación cruzada (1-VR) fue de 0,91, el coeficiente de determinación de la calibración (RSQ) fue de 0,93 y el error estándar de calibración (SEC) de 0,17. Para el café almendra el 1-VR el valor fue 0,95, RSQ de 0,96 y el SEC 0,14. Con los valores obtenidos de los indicadores estadísticos de bondad puede concluirse que la técnica NIRS es una herramienta rápida, confiable y reproducible que puede ser utilizada para determinar la humedad en granos de café.

Palabras clave: Calidad del café, espectro, indicador, regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS), Colombia.

DETERMINATION OF MOISTURE CONTENT OF DRY PARCHMENT COFFEE AND GREEN COFFEE BY NEAR INFRARED SPECTROSCOPY

Moisture content is a physical parameter of particular importance, as it is the starting point for quality preservation during the marketing and shelf life of coffee. In this research, the feasibility of the Near Infrared Spectroscopy technique NIRS was evaluated as an alternative for the prediction of the moisture content of dry parchment coffee (cps) and green coffee. Moisture was determined by the reference method according to NTC 2325 of 2005 and the same samples were analysed by NIRS in a wavelength range of 400 nm to 2490 nm. For the development of the models, 433 samples of cps and 430 samples of almond coffee were used. Partial least squares (PLS) regression was the best fit for the two coffee matrices, as evidenced by the value of the indicator statistics. For cps, the cross-validation coefficient of determination (1-VR) was 0.91, the calibration coefficient of determination (RSQ) was 0.93 and the standard error of calibration (SEC) was 0.17. For green coffee the 1-VR value was 0.95, RSQ was 0.96 and the SEC was 0.14. With the values obtained for the statistical indicators of goodness of fit, it can be concluded that the NIRS technique is a fast, reliable and reproducible tool that can be used to determine moisture in coffee beans.

Keywords: Coffee quality, spectrum, indicator, partial least squares (PLS) regression, Colombia.

* Asistente de Investigación e Investigador Científico I. Disciplina de Calidad, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-0685-8337>, <https://orcid.org/0000-0003-1576-2297> y <https://orcid.org/0000-0002-1166-0165>, respectivamente.

** Investigador Científico I. Disciplina de Fisiología, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-3242-1948>



El contenido de humedad en el café es un parámetro esencial debido a su influencia en la vida útil, la inocuidad, la calidad sensorial y física, así como la posibilidad de comercialización. Mantener el contenido de humedad en un rango específico, como el recomendado del 10% al 12%, ayuda a preservar la frescura y calidad del café durante el almacenamiento (Oliveros et al., 2010; Puerta, 2015; Reh et al., 2006). Un alto contenido de humedad puede propiciar la proliferación de insectos (Alba-Alejandre et al., 2018; Mendoza-Cervantes et al., 2021; Valentine, 2005), hongos y la producción de micotoxinas, que son un riesgo para la salud humana; además, de generar sabores desagradables como moho, terroso y reposo, lo que afecta negativamente el sabor y la calidad del café (Escobar et al., 2020; Palacios-Cabrera et al., 2004). Por otro lado, un contenido de humedad demasiado bajo (< 9%) tampoco es favorable, puesto que los granos de café pueden volverse quebradizos, afectando las reacciones que desarrollan el aroma, al tiempo que dificulta el proceso de tueste y, en consecuencia, la calidad sensorial (Osorio, 2021; Pabón & Osorio, 2019).

Existen diferentes métodos para realizar la determinación de la humedad, los directos como los estandarizados con normas de referencia (ISO 1446, ISO 1447 e ISO 6673), que permiten una determinación cuantitativa del agua a través de la pérdida de masa o cantidad de agua obtenida. Los químicos, basados en la reacción del agua principalmente con carburo de calcio o hidruro de calcio, los cuales requieren mayor tiempo (Morgano et al., 2008). Y otros métodos indirectos, que se basan principalmente en la reacción de las moléculas del agua a una influencia física como es el caso de la resonancia magnética nuclear de baja resolución, la espectroscopia de microondas y la espectroscopia de infrarrojo cercano

(NIRS) (Büning-Pfaue, 2003; Morgano et al., 2008; Patiño-Velasco et al., 2016).

La espectroscopia de infrarrojo cercano NIRS (por sus siglas en inglés), ha sido un método utilizado para la evaluación de la calidad, composición química y características físicas, como la determinación de humedad en diferentes productos agrícolas. Heman & Hsieh (2016) determinaron el contenido de humedad en arroz, desarrollaron un modelo de calibración con la regresión lineal mínimos cuadrados parciales – PLSR y obtuvieron un error estándar de calibración (SEC) de 1,30 y el error estándar de predicción de 2,51. Hayati et al. (2021) desarrollaron un modelo de predicción en cacao, para determinar el contenido de humedad, reportando que la regresión PLSR fue la que presentó un mejor resultado con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,81 y un error medio cuadrático de predicción de 0,41. En espárragos, Flores (2009) desarrolló un modelo para la determinación de la calidad de la textura en este producto, aplicó la regresión de mínimos cuadrados parciales modificados-MPLS, con valores de R^2 de 0,55 y un error estándar de validación cruzada de 7,81. En términos generales, las ventajas que mencionan del NIRS es la rapidez del análisis, la confiabilidad, no requerir de preparación de la muestra, ni se utilizan reactivos químicos; lo que la hace una técnica sostenible ambientalmente, además es un método multianalítico, es decir, que puede realizar múltiples determinaciones de propiedades físicas y químicas simultáneamente (Büning-Pfaue, 2003; Morgano et al., 2008; Patiño-Velasco et al., 2016).

Específicamente en café se encuentran diferentes trabajos referenciados utilizando la técnica NIRS para la evaluación de la calidad sensorial, ya sea por el puntaje total de catador o la predicción de atributos, como la acidez, el cuerpo, el dulzor o defectos sensoriales

(Baqueta et al., 2019; Craig et al., 2014; Ribeiro et al., 2011), determinación de compuestos químicos como cafeína, lípidos, sacarosa y ácidos clorogénicos totales (Gallignani et al., 2008; Gómez et al., 2021; Llano Suárez, 2016; Vigo et al., 2022), en la identificación de adulteraciones o mezclas de café (Buratti et al., 2015; Ebrahimi-Najafabadi et al., 2012; Ribeiro et al., 2014), para la identificación del origen o zona de producción del café (Gómez et al., 2022; Siregar et al., 2020) y para la determinación de propiedades físicas como el contenido de humedad para el café almendra de diferentes especies como *Coffea liberica*, *C. arabica* y *C. canephora* (Adnan et al., 2017; Caporaso et al., 2018; Kyaw et al., 2020).

La tecnología NIRS consiste en la emisión de un haz de luz sobre la muestra. Dependiendo de la naturaleza de ésta y de los enlaces presentes en sus moléculas, principalmente los de tipo -CH, -NH, -OH y -CO, la radiación interactúa con dichos enlaces, provocando la absorción de una cantidad específica de radiación en la región NIR (Gómez et al., 2023; Shenk & Westerhaus, 1994). Las bandas de absorción en los espectros presentan diferentes intensidades, las cuales pueden clasificarse como fuertes, medias, débiles, anchas o agudas (Valenciaga & Saliba, 2006).

La información espectral se repite a lo largo de todo el espectro electromagnético; sin embargo, se ha identificado que las señales de las bandas tienden a debilitarse en orden de magnitud. Por ejemplo, en la región visible, de 400 a 800 nm, las intensidades de las bandas son considerablemente más débiles en comparación con las de la región cercana al infrarrojo (NIR), que abarca de 800 a 2.500 nm (Osborne et al., 1993). Esta tecnología se fundamenta en la ley de Lambert-Beer, la cual establece que el valor de absorbancia obtenido de una muestra, cuando esta tiene la capacidad de

absorber radiación en la región NIR, es directamente proporcional a la concentración del analito (Gómez et al., 2023; Shenk & Westerhaus, 1994).

El agua es un fuerte absorbente en el infrarrojo (IR), debido a su capacidad para asociarse intensamente con iones, monómeros orgánicos y polímeros mediante enlaces de hidrógeno. Por esta razón, las bandas de absorción del agua en el espectro de infrarrojo cercano (NIR) están influenciadas por los efectos de los solutos presentes en el agua. Se ha identificado que las bandas o sobretonos dominantes, amplios y cercanos a 1.440 y 1.930 nm, observados en casi todos los espectros NIRS, se deben principalmente al agua (Büning-Pfaue, 2003). En el caso del café, algunas estructuras químicas específicas han sido asignadas a bandas de absorción en el espectro NIR. Por ejemplo, el agua presenta una fuerte absorción en la región de 1.900 a 1.950 nm y, con menor intensidad, en torno a 1.400 nm. La cafeína muestra absorciones características entre 1.650 y 1.750 nm, con una intensidad reducida alrededor de 1.100 nm, mientras que los lípidos presentan bandas en el rango de 2.100 a 2.150 nm (Barbin et al., 2014; Corti et al., 1991; Cozzolino et al., 2006).

En esta investigación se evaluó la técnica NIRS como una alternativa para determinar el contenido de humedad del café almendra y el café pergamino seco, a partir del desarrollo de modelos de calibración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron por la técnica NIRS, 863 muestras de café en dos matrices, 433 muestras en pergamino seco-cps y 430 muestras de café almendra sana, especie *Coffea arabica* L., provenientes de los departamentos de Caldas, Cauca, Nariño y Tolima. La preparación de

las muestras consistió básicamente en la trilla y análisis físico separando la almendra defectuosa y la almendra sana.

Determinación de humedad

La determinación del contenido de humedad, en las dos matrices de café (almendra y cps), se realizó de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana 2325 de 2005 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2005). Se pesaron $10 \pm 0,05$ gramos de café para cada una de las matrices evaluadas, utilizando cajas de Petri de 35 x 10 mm, a las cuales se les tomó el peso inicial. La estufa utilizada fue la VWR 1370GM de convección calibrada a una temperatura de 105°C , el tiempo de secado fue de $16 \pm 0,5$ horas, una vez cumplido el tiempo, las muestras fueron dispuestas en desecadores por una hora, para su posterior pesaje, el cual se realizó en una balanza analítica Mettler Toledo AB-S/FACT, con una precisión de 0,01 mg; se realizó por duplicado la determinación del contenido de humedad, para cada una de las muestras analizadas. El valor de referencia utilizado para el modelo es el resultado del promedio de las dos repeticiones.

El contenido de humedad se determinó a partir de la diferencia del peso del café húmedo (antes de colocarlo en la estufa) y peso del café seco (después de transcurrido el tiempo en la estufa), como se observa en la Ecuación <1>:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad <1>$$

Donde:

W_1 = peso inicial del café

W_2 = peso del café después de secado

Técnica Espectroscopia de Infrarrojo cercano - NIRS

El equipo utilizado fue el NIRS XDS RCA (2012) de FOSS, ubicado en el laboratorio de instrumental de Cenicafé. Las muestras fueron analizadas en un rango de longitud de onda del 400 – 2.490 nanómetros. Se pesaron 110 gramos por cada matriz de café (pergamino seco -cps y almendra); las muestras fueron colocadas en celdas para reflectancia de transporte rectangular de 16 cm de largo, 5 cm de ancho y 5 cm de alto; las muestras fueron analizadas por duplicado. Para el análisis de la información espectral y el desarrollo de los modelos predictivos se utilizó el software WinISI (versión 4 Foss Infrasoftware International, USA) incorporado en el equipo. Se analizaron 863 muestras, se obtuvieron 1.726 espectros, los cuales fueron promediados para el posterior análisis de la información y desarrollo de los modelos de calibración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollo de los modelos de calibración

En los sobretonos del enlace OH (color negro), en ambas matrices, se observaron incrementos en los valores de la absorbancia (Figura 1), con valores que concuerdan con los sobretonos de la molécula de H_2O reportada en la región NIRS de 1.440 nm y 1.930 nm y 1.950 nm (Barbin et al., 2014; Büning-Pfaue, 2003; Osborne et al., 1993). Al comparar la tendencia de la absorbancia se observa que el café almendra presentó valores más altos a lo largo de toda la longitud de onda respecto al cps (Figura 1).

En cuanto al café almendra, los valores de absorbancia obtenidos en este estudio (Tabla 1) son consistentes con los reportados por Adnan et al. (2017), quienes identificaron el mayor pico de absorbancia en 1.930 nm. Estos autores también observaron valores más elevados de

absorbancia (1.611nm) en muestras de café con niveles de humedad superiores al 12%. Por su parte, Reh et al. (2006) señalaron que el máximo punto de absorbancia ocurre en 1.940 nm, atribuyendo la eficacia de la técnica NIRS para la determinación de humedad a la alta sensibilidad de la molécula de agua a la luz infrarroja. Esto ha permitido identificar con precisión la región de sobretono entre 1.900 y 1.950 nm (Büning-Pfaue, 2003; Reh et al., 2006).

Tabla 1. Mayor valor de absorbancia media por rango de humedad en cps y almendra.

Humedad (%)	cps Absorbancia (1.920 nm)	Almendra Absorbancia (1.930 nm)
< 8,9	1 .023	1 .301
9,0–9,9	1 .014	1 .284
10,0–10,9	1 .032	1 .282
11,0- 11,9	1 .050	1 .273
>12,0	1 .048	1 .299

Posteriormente se realizó el análisis de componentes principales –PCA, el cual

permitió identificar las muestras anómalas (*outlier*) las cuales presentaron un valor de distancia Mahalamobis >3. Para las muestras de cps se identificaron 14 y cuatro para el café almendra, estas muestras fueron eliminadas del colectivo de calibración; para garantizar que el grupo de muestras con el cual se desarrolló el modelo tuviera las características requeridas (Figura 2).

Para el desarrollo de los modelos de calibración de café cps y almendra, se separaron las muestras en dos grupos, el primero con el mayor número de muestras se utilizó para desarrollar el modelo, y el segundo se reservó para realizar la validación cruzada. Los valores de humedad de las muestras utilizadas oscilaron entre 8,1% y 17,6%.

Para el modelo de **café pergamino seco**, del total de 433 muestras analizadas, se excluyeron 14 *outliers*, quedando un total de 419 muestras válidas. De estas, 341 se utilizaron para el desarrollo del modelo y 78 para la validación cruzada (22%). El modelo se construyó mediante regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS), aplicando

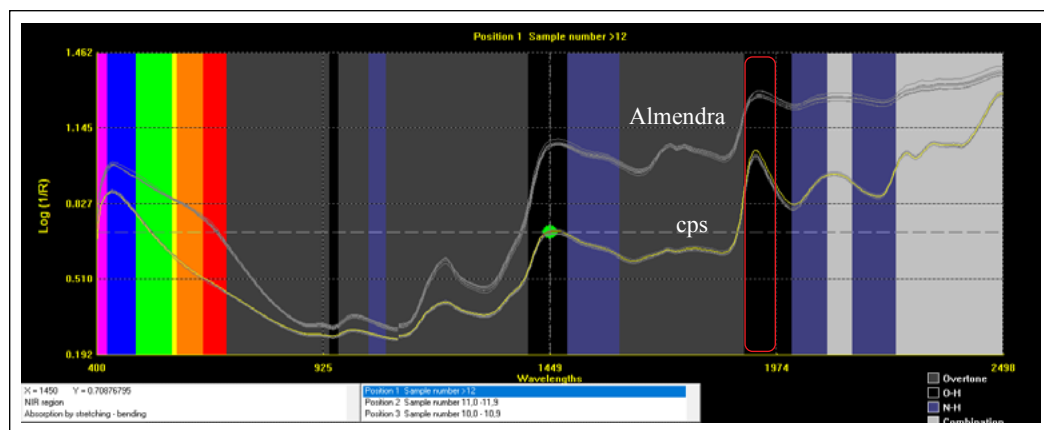


Figura 1. Absorbancia media por contenido de humedad respecto a la longitud de onda para cps y almendra sana.

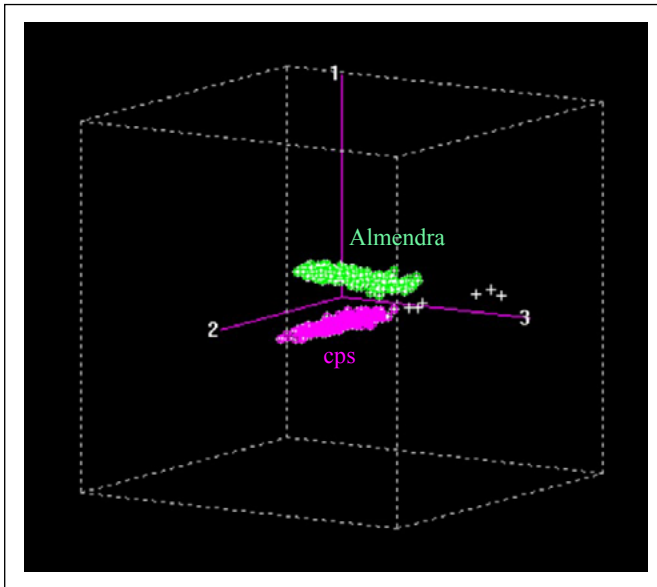


Figura 2. Box Plot del análisis de componentes principales PCA, café pergamino seco – cps y almendra.

la corrección *scatter* de los espectros mediante la técnica *Scale and Quadratic*, lo que permitió obtener los mejores resultados (Tabla 3). Entre los parámetros más destacados, se encontró el coeficiente de determinación de la validación cruzada (1-VR), cuyo valor fue de 0,91. Este coeficiente, que debe ser cercano a uno, indica la proporción de los constituyentes explicados por el modelo. Así mismo, el coeficiente de determinación de calibración (R^2), que refleja la correlación entre los datos de referencia y los predichos por el equipo, obtuvo un valor de 0,92, indicando una alta precisión del modelo, siendo el valor ideal cercano a uno. El error estándar de calibración (SEC), que mide la diferencia media entre los valores de referencia y los predichos, fue de 0,17, mientras que la desviación estándar (SD) fue de 0,64. Estos resultados reflejan la solidez y fiabilidad del modelo desarrollado para la predicción de la humedad en café pergamino seco.

Para el modelo de **café almendra**, del total de 430 muestras analizadas, se excluyeron cuatro *outliers*, quedando un

total de 426 muestras válidas. De estas, 349 se utilizaron para desarrollar el modelo, mientras que las 77 restantes (22%), se emplearon para su validación. El modelo se construyó utilizando regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) y aplicando la corrección *scatter* de los espectros mediante la técnica *Derivative Scale and Offset*. Los indicadores estadísticos obtenidos fueron altamente satisfactorios. El coeficiente de variación (1-VR) fue de 0,95, y el coeficiente de determinación (R^2) alcanzó un valor de 0,96, lo que indica una alta correlación entre los datos de referencia y los predichos por el equipo. Además, el error estándar de calibración (SEC) fue de 0,14, y la desviación estándar (SD) fue de 0,70 (Tabla 2). De acuerdo con Fonseca (2012) y Shenk & Westerhaus (1994), una calibración se considera excelente cuando el valor del coeficiente de variación (1-VR o R^2) supera 0,90. En este caso, los resultados obtenidos en los modelos desarrollados superaron ampliamente este umbral, destacando la alta precisión y robustez del modelo.

Tabla 2. Indicadores estadísticos del modelo desarrollado para la determinación de humedad de café.

Matriz de café	SD	Estimado Mínimo	Estimado Máximo	SEC	RSQ	SECV	1-VR
cps	0,64	8,90	12,72	0,17	0,93	0,19	0,91
Almendra	0,69	9,09	13,21	0,14	0,96	0,16	0,95

SD, desviación estándar; SEC, error estándar de calibración; RSQ, coeficiente de determinación de la calibración; SECV, error estándar de validación cruzada; 1-VR, determinación de la validación cruzada.

Los indicadores estadísticos obtenidos en los modelos de calibración desarrollados para las dos matrices de café evaluadas, permiten establecer que la Técnica NIRS es adecuada para la determinación de humedad. Para confirmar el resultado de los modelos de calibración se realiza la validación cruzada, la cual permite evaluar el desempeño de los modelos.

Validación cruzada

Para el **café pergamino seco**, la validación cruzada se realizó utilizando las 78 muestras. Los resultados estadísticos obtenidos, que se detallan en la Tabla 5, muestran una diferencia de 0,054 entre los valores reportados por el modelo y los valores de referencia (BIAS). Además, el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0,92, con una correlación de 0,94. En la Figura 4 se observa la relación entre los valores de referencia y los predichos por el modelo. Es importante resaltar que el modelo desarrollado para la predicción de humedad en café pergamino seco mediante NIRS representa una alternativa eficaz para complementar la función multianalítica de esta técnica. Cabe destacar que la mayoría de los trabajos referenciados están relacionados con las propiedades físicas en la matriz de almendra sana.

Para el **café almendra**, la validación cruzada se realizó con un grupo de 77 muestras. En este

caso, la diferencia entre la predicción del modelo y los valores de referencia (BIAS) fue de 0,01, y el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0,95. En la Tabla 5 se presentan los indicadores de bondad obtenidos al realizar la validación. Las Figuras 3 y 4 muestran la relación entre los valores de referencia (determinados en el laboratorio) y los valores predichos por el modelo NIRS, evidenciando la excelente calibración de los modelos desarrollados para la determinación de humedad tanto en café pergamino seco como en café almendra.

Los resultados obtenidos en esta investigación, específicamente en el desarrollo de los modelos (Tabla 3), coinciden con los reportados por diversos autores, quienes han demostrado que la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) es la técnica que ofrece los mejores resultados para el desarrollo de modelos de predicción de humedad en café. Por ejemplo, Adnan et al. (2017) desarrollaron un modelo de predicción para café almendra verde utilizando 108 muestras, con un rango de humedad entre 7% y 22% y un R^2 de 0,97. Morgano et al. (2008) desarrollaron un modelo con 157 muestras de café almendra, con un rango de humedad entre 7% y 12%, reportando un R^2 de 0,82. Caporaso et al. (2018) utilizaron 350 muestras de café, con un rango de humedad entre 7% y 12%, obteniendo un R^2 de 0,96. Por último, Escobar et al. (2020) utilizaron

Tabla 3. Indicadores estadísticos de la validación cruzada para café pergamino seco y café almendra.

Indicadores estadísticos	Café pergamino seco - cps Valores	Café almendra valores
No. de muestras	78	77
Pendiente	0,94	0,91
Intercepto	0,61	0,94
Bias	0,05	0,01
Error estándar de calibración (SEC)	0,19	0,17
Error estándar de predicción (SEP)	0,20	0,18
Error estándar de predicción Corregido– SEP(C)	0,19	0,18
Coefficiente de determinación (RSQ)	0,92	0,95
Promedio–Predicción	10,78	11,01
Promedio – valor de referencia	10,72	11,09
Desviación estándar (SD) de predicción	0,69	0,80
Desviación estándar SD de valor de referencia	0,67	0,79

100 muestras, con un rango de humedad similar y un R^2 de 0,99. Estos resultados confirman que la técnica de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) es una herramienta confiable para determinar el contenido de humedad en café pergamino seco y café almendra.

En este estudio, se evaluó la técnica NIRS y se desarrollaron modelos de calibración para la determinación de la humedad en

café pergamino seco y café almendra. Los resultados obtenidos mostraron indicadores estadísticos sólidos que respaldan la alta confiabilidad, precisión y reproducibilidad de esta técnica. Estos hallazgos posicionan a la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) como una herramienta altamente eficaz para la medición de humedad en café, con un gran potencial para su implementación en procesos de control de calidad y en la industria del café en general.

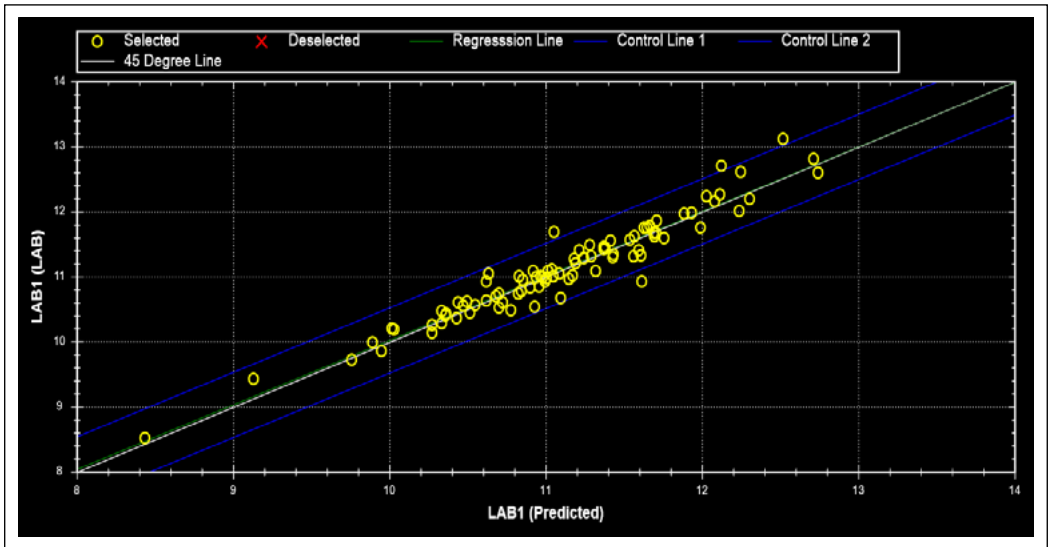


Figura 3. Relación de los valores de referencia respecto a los predichos por el modelo para café pergamino seco - cps.

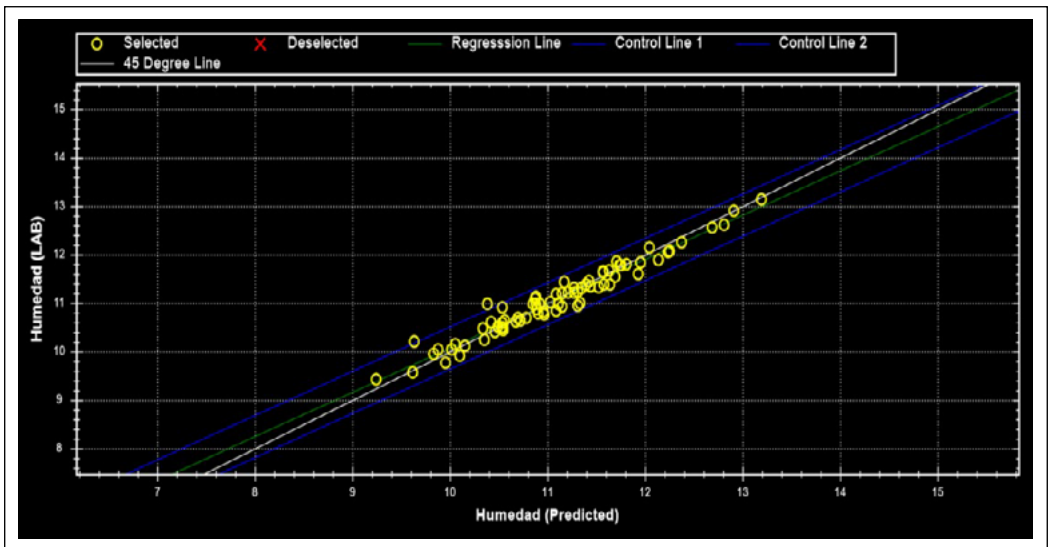


Figura 4. Relación de los valores de referencia respecto a los predichos por el modelo para café almendra.

AGRADECIMIENTOS

Al doctor Álvaro Gaitán Director de Cenicafé, Gerencia Técnica, en la Disciplina de Calidad Paola Calderón, Wilson Vargas, Víctor Castañeda; en Almacafé a Fernando Osorio Director de calidad, y al personal del apoyo Anderson Arias. Esta investigación fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), proyecto número CAL1010007.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, Administración de proyecto, Curación de datos, Metodología, Análisis formal, Redacción - borrador original: **CRG**; Curación de datos, Redacción - borrador original, Redacción - revisión y edición: **AO, JP, y VO**. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Alba-Alejandre, I., Alba-Tercedor, J., & Vega, F. E. (2018). Micro-CT to Document the Coffee Bean Weevil, *Araecerus fasciculatus* (Coleoptera: Anthribidae), Inside Field-Collected Coffee Berries (*Coffea canephora*). *Insects*, 9(3), 100. <https://doi.org/10.3390/insects9030100>
- Adnan, A., Hörsten, D. V., Pawelzik, E., & Mörlein, A. D. (2017). Rapid Prediction of Moisture Content in Intact Green Coffee Beans Using Near Infrared Spectroscopy. *Foods*, 6(5), 38. <https://doi.org/10.3390/foods6050038>
- Baqueta, M. R., Coqueiro, A., & Valderrama, P. (2019). Brazilian Coffee Blends: A Simple and Fast Method by Near-Infrared Spectroscopy for the Determination of the Sensory Attributes Elicited in Professional Coffee Cupping. *Journal of Food Science*, 84(6), 1247–1255. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14617>
- Barbin, D. F., Felicio, A. L. D. S. M., Sun, D.-W., Nixdorf, S. L., & Hirooka, E. Y. (2014). Application of infrared spectral techniques on quality and compositional attributes of coffee: An overview. *Food Research International*, 61, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.005>
- Büning-Pfaue, H. (2003). Analysis of water in food by near infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 82(1), 107–115. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00583-6](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00583-6)
- Buratti, S., Sinelli, N., Bertone, E., Venturello, A., Casiraghi, E., & Geobaldo, F. (2015). Discrimination between washed *Arabica*, natural *Arabica* and *Robusta* coffees by using near infrared spectroscopy, electronic nose and electronic tongue analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(11), 2192–2200. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6933>
- Caporaso, N., Whitworth, M. B., Grebby, S., & Fisk, I. D. (2018). Rapid prediction of single green coffee bean moisture and lipid content by hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 227, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.01.009>
- Corti, P., Dreassi, E., Ceramelli, G., Lonardi, S., Viviani, R., & Gravina, S. (1991). Near infrared reflectance spectroscopy applied to pharmaceutical quality control. Identification and assay of cephalosporins. *Analisis*, 19(7), 198–204.
- Cozzolino, D., Fernández, E., Restaino, E., & La Manna, A. (2006). Determinación de la composición química de heno mediante la espectrofotometría en el infrarrojo cercano [NIRS]. *Revista argentina de producción animal*, 26(3), 203–209. <http://www.aapa.org.ar/rapa/26/3/003-PP-Cozzolino.pdf>
- Craig, A. P., Franca, A. S., Oliveira, L. S., Irudayaraj, J., & Illeleji, K. (2014). Application of elastic net and infrared spectroscopy in the discrimination between defective and non-defective roasted coffees. *Talanta*, 128, 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.05.001>
- Ebrahimi-Najafabadi, H., Leardi, R., Oliveri, P., Chiara Casolino, M., Jalali-Heravi, M., & Lanteri, S. (2012). Detection of addition of barley to coffee using near infrared spectroscopy and chemometric techniques. *Talanta*, 99, 175–179. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.05.036>
- Escobar, M., Torres, A., & Rodriguez, N. J. M. (2020). Non-Destructive Prediction of Moisture Content of Philippine *Coffea arabica* and *Coffea liberica* Green Beans Using Locally-Developed NIR Spectroscopy Instrument. *Mindanao Journal of Science and Technology*, 18(2),

- 208–223. <https://mjst.ustp.edu.ph/index.php/mjst/article/view/544>
- Flores, K. U. (2009). *Determinación no destructiva de parámetros de calidad de frutas y hortalizas mediante espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano* [Tesis de Doctorado, Universidad de Córdoba]. <http://hdl.handle.net/10396/2070>
- Fonseca, I. (2012). *Caracterización y tratamiento de la señal espectroscópica NIRS obtenida in-situ/on-line, para el desarrollo de modelos quimiométricos y su aplicación en la valoración nutritiva del ensilado de maíz* [Tesis de Maestría, Universidad de Oviedo]. <http://hdl.handle.net/10651/4240>
- Galignani, M., Torres, M., Ayala, C., & Brunetto, M. del R. (2008). Determination of Caffeine in Coffee by Means Fourier Transform Infrared Spectrometry. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 31(2), 159–168. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/6302>
- Gómez, C. R., Gallego, C. P., Echeverri, L. F., Pabón, J., Ortiz, A., & Osorio, V. (2023). Determinación de compuestos químicos del café tostado por Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIRS). *Revista Cenicafé*, 74(1), e74104. <https://doi.org/10.38141/10778/74104>
- Gómez, C. R., Ortiz, A., Gallego, C., & Echeverri, L. F. (2021). Validación de curvas de calibración por NIRS para la predicción de compuestos químicos de café almendra. *Revista Cenicafé*, 72(2), e72204. <https://doi.org/10.38141/10778/72204>
- Gómez, C. R., Ortiz, A., & Osorio, V. (2022). Predicción del origen regional del café de Colombia a partir de la técnica de espectroscopia de infrarrojo cercano—NIRS. *Revista Cenicafé*, 73(2), e73205. <https://doi.org/10.38141/10778/73205>
- Hayati, R., Zulfahrizal, Z., & Munawar, A. A. (2021). Robust prediction performance of inner quality attributes in intact cocoa beans using near infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Heliyon*, 7(2), e06286. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06286>
- Heman, A., & Hsieh, C.-L. (2016). Measurement of moisture content for rough rice by visible and near-infrared (NIR) spectroscopy. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 9(3), 280–290. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.02.002>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2005). *NTC 2325:2005 Café verde. Determinación de la pérdida de masa a 105°C*. <https://tienda.icontec.org/gp-cafe-verdedeterminacion-de-la-perdida-de-masa-a-105-c-ntc2325-2005.html>
- Kyaw, E. M., Budiastira, I. W., Sutrisno, & Samsudin. (2020). Estimation of moisture content in Liberica coffee by using near infrared spectroscopy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 542(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/542/1/012013>
- Llano Suárez, P. (2016). *Desarrollo y Validación de Modelos Quimiométricos Cuantitativos para la Predicción del Perfil de Ácidos Grasos en Leche* [Tesis de Maestría, Universidad de Oviedo]. <http://hdl.handle.net/10651/39005>
- Mendoza-Cervantes, G., Guzmán-López, O., & Salinas-Castro, A. (2021). Manejo de la broca del café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), con atrayentes etanólicos en cultivos de café de Coatepec, Veracruz, México. *Revista Chilena de Entomología*, 47(2), 265–273. <https://doi.org/10.35249/rche.47.2.21.14>
- Morgano, M. A., Faria, C. G., Ferrão, M. F., Bragagnolo, N., & Ferreira, M. M. D. C. (2008). Determinação de umidade em café cru usando espectroscopia NIR e regressão multivariada. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 28(1), 12–17. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000100003>
- Oliveros, C. E., Lopez, L., Buitrago, C. M., & Moreno, E. L. (2010). Determinación del contenido de humedad del café durante el secado en silos. *Revista Cenicafé*, 61(2), 108–118.
- Osborne, B. G., Fearn, T., & Hindle, P. H. (1993). *Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis* (2nd ed). Longman Scientific & Technical.
- Osorio, V. (2021). La calidad del Café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café, *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3a ed., pp. 219–234). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_12
- Pabón, J., & Osorio, V. (2019). Factores e indicadores de la calidad física, sensorial y química del café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila* (pp. 162–187). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0005_7
- Palacios-Cabrera, H., Taniwaki, M. H., Menezes, H. C., & Iamanaka, B. T. (2004). The production of ochratoxin A by *Aspergillus ochraceus* in raw coffee at different equilibrium relative humidity and under alternating

- temperatures. *Food Control*, 15(7), 531–535. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2003.08.006>
- Patiño-Velasco, M. M., Pencue Fierro, E. L., & Vargas Cañas, R. (2016). Determinación del contenido de humedad en granos de café pergamino seco utilizando speckle dinámico. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 84–91. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)84-91](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)84-91)
- Puerta, G. I. (2015). Buenas prácticas para la prevención de los defectos de la calidad del café: fermento, reposado, fenólico y mohoso. *Avances Técnicos Cenicafé*, 461, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0461>
- Reh, C., Gerber, A., Prodolliet, J., & Vuataz, G. (2006). Water content determination in green coffee – Method comparison to study specificity and accuracy. *Food Chemistry*, 96(3), 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.055>
- Ribeiro, B. B., Mendonça, L. M. V. L., Assis, G. A., Mendonça, J. M. A., Malta, M. R., & Montanari, F. F. (2014). Avaliação química e sensorial de blends de *Coffea canephora* Pierre e *Coffea arabica* L. *Coffee Science*, 9(2), 178–186. <https://coffeescience.ufla.br/index.php/coffeescience/article/view/596>
- Ribeiro, J. S., Ferreira, M. M. C., & Salva, T. J. G. (2011). Chemometric models for the quantitative descriptive sensory analysis of Arabica coffee beverages using near infrared spectroscopy. *Talanta*, 83(5), 1352–1358. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.11.001>
- Shenk, J. S., & Westerhaus, M. O. (2015). The Application of near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) to Forage Analysis. En G. C. Fahey (Ed.), *Forage Quality, Evaluation, and Utilization* (pp. 406–449). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c10>
- Siregar, S. D., Rindang, A., & Ayu, P. C. (2020). Principle Component Analysis (PCA)—Classification of Arabica green bean coffee of North Sumatera Using FT–NIRS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 454(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/454/1/012046>
- Valenciaga, D., & Saliba, E. (2006). La espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) y sus potencialidades para la evaluación de forrajes. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 40(3), 259–267. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193017723001>
- Valentine, B. D. (2005). The scientific name of the coffee bean weevil and some additional bibliography (Coleoptera: Anthribidae: *Araecerus* Schönherr). *Insecta Mundi*, 19(4), 247–254. <https://digitalcommons.unl.edu/insectamundi/98/>
- Vigo, A., Latorre, M. Á., & Ripoll, G. (2022). Espectroscopia en el infrarrojo cercano por transmitancia y reflectancia para la predicción de la composición química de cereales en grano y molidos. *Información Técnica Económica Agraria*, 118(4), 565–579. <https://doi.org/10.12706/itea.2022.001>

DIAGNÓSTICO DE LA ACIDEZ DEL SUELO EN LA ZONA CAFETERA DE COLOMBIA

Siavosh Sadeghian Khalajabadi *, Luz Adriana Lince Salazar *

Sadeghian, S., & Lince-Salazar, L.A. (2024). Diagnóstico de la acidez del suelo en la zona cafetera de Colombia. *Revista Cenicafé*, 75(2), e75204. <https://doi.org/10.38141/10778/75204>



Check for updates

La acidez del suelo afecta el crecimiento del café, *Coffea arabica* L., en todas las etapas del cultivo. La información regional de la acidez del suelo puede ayudar a identificar áreas con limitaciones para el crecimiento de las plantas y planear acciones correctivas. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar y mapear la acidez del suelo en la zona cafetera de Colombia. Se consolidó una base de datos con resultados de 344.652 análisis de suelos, correspondientes a 460 municipios de 22 departamentos de Colombia. Se realizó estadística descriptiva de pH a nivel de departamento y se calculó la frecuencia porcentual de muestras en cinco rangos: $\text{pH} \leq 4,5$; $4,5 < \text{pH} \leq 5,0$; $5,0 < \text{pH} \leq 5,5$; $5,5 < \text{pH} \leq 6,0$ y $\text{pH} > 6,0$. Para cada municipio se calcularon las frecuencias de registros en los rangos críticos de acidez ($\text{pH} \leq 5,0$, $\text{Al}^{3+} > 1,0 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$ y saturación de $\text{Al}^{3+} - \text{SAI}^{3+} > 40\%$), valores que se clasificaron en cinco categorías: muy baja ($< 20\%$), baja (20%-40%), media (40%-60%), alta (60%-80%) y muy alta ($> 80\%$). Para todos los departamentos, la distribución del pH fue simétrica, pero no cuando se analizaron todos los datos en su conjunto. De los 460 municipios, 58 presentaron promedios de $\text{pH} \leq 4,5$; 217 de $4,5 \leq \text{pH} < 5,0$; 169 de $5,0 \leq \text{pH} < 5,5$ y 16 de $5,5 \leq \text{pH} < 6,1$. Los departamentos con mayor frecuencia de acidez fueron Bolívar, Meta, Caquetá, Casanare y Putumayo, mientras que en el Valle del Cauca, La Guajira, Risaralda, Nariño y Caldas se detectaron las frecuencias más bajas. Se halló una relación negativa de pH con Al^{3+} y SAI^{3+} , y una relación positiva de pH con $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. Se elaboraron mapas de pH, Al^{3+} y SAI^{3+} a escala municipal.

Palabras clave: Aluminio intercambiable, calcio, magnesio, mapeo digital del suelo, pH, predicción espacial, saturación de aluminio.

SOIL ACIDITY DIAGNOSIS IN THE COFFEE-GROWING REGION OF COLOMBIA

Soil acidity affects the growth of coffee (*Coffea arabica* L.) at all stages of cultivation. Regional information on soil acidity can help identify areas with limitations for plant growth and plan corrective actions. This study aimed to characterize and map soil acidity in the coffee-growing region of Colombia. A database was consolidated with results from 344,652 soil analyses, corresponding to 460 municipalities in 22 departments of Colombia. Descriptive statistics of pH were conducted at the departmental level, and the percentage frequency of samples was calculated within five ranges: $\text{pH} \leq 4.5$; $4.5 < \text{pH} \leq 5.0$; $5.0 < \text{pH} \leq 5.5$; $5.5 < \text{pH} \leq 6.0$; and $\text{pH} > 6.0$. For each municipality, frequencies of records in critical acidity ranges ($\text{pH} \leq 5.0$, $\text{Al}^{3+} > 1.0 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$, and $\text{Al}^{3+} \text{ saturation} > 40\%$) were calculated and classified into five categories: very low ($< 20\%$), low (20%-40%), medium (40%-60%), high (60%-80%), and very high ($> 80\%$). For all departments, the pH distribution was symmetrical, unlike when all the data was analyzed together. Out of the 460 municipalities, 58 reported average pH values below 4.5; 217 fell between 4.5 and 5.0; 169 ranged from 5.0 to 5.5; and 16 were between 5.5 and 6.1. The departments with the highest frequency of acidity were Bolívar, Meta, Caquetá, Casanare, and Putumayo, while the lowest frequencies were detected in Valle del Cauca, La Guajira, Risaralda, Nariño, and Caldas. A negative relationship was found between pH and Al^{3+} and Al^{3+} saturation, and a positive relationship between pH and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. Finally, maps of pH, Al^{3+} , and Al^{3+} saturation were created at the municipal level.

Keywords: Exchangeable aluminum, calcium and magnesium, digital soil mapping, pH, spatial prediction, aluminum saturation.

* Investigador Científico III e Investigador Científico I. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-1266-0885> y <https://orcid.org/0000-0003-4263-5357>, respectivamente.



Las propiedades del suelo determinan el crecimiento de las raíces y la absorción del agua y los nutrientes, condicionando así la producción de los cultivos. Entre estas propiedades están las que se relacionan con la acidez (Havlin et al., 2014; Sparks, 2003). El proceso de la acidificación del suelo ocurre de manera espontánea durante la pedogénesis y se intensifica por la actividad antropogénica. Entre las principales causas están: la lixiviación de las bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y Na^{+}) por la lluvia e incremento concomitante de cationes metálicos (Al^{3+} , Fe^{3+} y Mn^{4+}) que pueden sufrir hidrólisis ácida; además de la erosión, la meteorización de los minerales primarios, la descomposición de la materia orgánica (MO), la oxidación del azufre, la nitrificación de NH_4^{+} y la liberación de H^{+} por las raíces cuando absorben Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} . Adicionalmente, los aniones NO_3^{-} , SO_4^{-2} y Cl^{-} que proceden de los fertilizantes se unen a las bases intercambiables de la solución del suelo y los arrastran, utilizando como vehículo el agua (Foth & Ellis, 1997; Weil & Brady, 2017; Zapata, 2022).

La acidez del suelo afecta el crecimiento del café en todas las etapas del cultivo; condición que generalmente se remedia mediante el uso de enmiendas calcáreas (Barbosa et al., 2020; Corrêa et al., 2007; Chaves et al., 1984; Parecido et al., 2021; Parecido et al., 2021; Pavan et al., 1982; Rodrigues et al., 2001; Rodrigues et al., 2006; Sadeghian & Díaz, 2020a), sin descartar otras soluciones como el establecimiento de genotipos resistentes (Acuña & Sadeghian 2020; Braccini et al., 1998).

La propiedad por excelencia para medir la acidez del suelo es el pH. Este ejerce una influencia enorme en los procesos biogeoquímicos del suelo y, en razón de

ello, se considera la “variable maestra” que influye en innumerables propiedades y procesos biológicos, químicos y físicos del suelo que afectan el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos (Neina, 2019). En general, se considera que un suelo es ácido cuando presenta un valor de pH menor que 5,5 durante la mayor parte del año (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024).

La principal limitante para el crecimiento de las plantas en los suelos ácidos tiene que ver con la alta presencia de Al^{3+} soluble, elemento que resulta tóxico cuando es absorbido por las raíces (Havlin et al., 2014). En café, se han corroborado sus efectos en el retraso del crecimiento radicular y las malformaciones de raíces y hojas (Pavan & Bingham, 1982).

Existe una relación estrecha entre Al^{3+} y pH; al respecto, puede decirse que la solubilidad y las formas químicas del Al en agua están determinadas por una secuencia de etapas de hidrólisis que finalizan en la precipitación del $\text{Al}(\text{OH})_3$, hecho que sucede a pH 5,5 (Sparks, 2003; Zapata, 2022). Esto ha sido corroborado tanto para suelos de la zona cafetera de Colombia (Sadeghian, 2003; Sadeghian, 2022; Sadeghian & Díaz, 2020b; Sadeghian & Zapata, 2014), como para otros países productores del grano, especialmente Brasil (Pavan & Bingham, 1982).

Los resultados de investigaciones desarrolladas en Colombia indican que los rendimientos de café se reducen cuando el pH es menor que 5,0; situación en la que el contenido de Al^{3+} es generalmente mayor que $1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ o, en su defecto, el porcentaje de saturación de Al^{3+} (SAI^{3+}) está por encima del 30% (Sadeghian, 2022). Cabe aclarar que, en los suelos derivados de cenizas volcánicas

de Colombia, caracterizados por ser ricos en materia orgánica, los altos contenidos de Al^{3+} en la fase intercambiable no se ven reflejados en la solución del suelo (Ortiz et al., 2004), fenómeno que explica la poca probabilidad de encontrar patologías de su toxicidad. Pese a ello, el crecimiento y desarrollo de las plantas de café pueden verse más afectados por otras variables relacionadas con la acidez.

Dada la importancia que tiene la acidez del suelo en la productividad de los cultivos, sumado al creciente aumento de las áreas afectadas, se han realizado estudios para diagnosticar su situación en diferentes regiones y países, generando mapas para identificar áreas con limitaciones por acidez. Son ejemplos de lo anterior, los trabajos dirigidos por Reuter et al. (2008), Geng et al. (2024) y Yüzügüllü et al. (2024) para Europa, la investigación conducida por Behera & Shukla (2015) en cuatro series de suelos de la India, las investigaciones desarrolladas por Chen et al. (2019) y Guo et al. (2022) para la China, la información generada para Suroeste y Noroeste de Etiopía por Sori et al. (2021) y Belay et al. (2023), respectivamente, y el estudio ejecutado Roudier et al. (2020) para Nueva Zelanda.

Reportes recientes ponen al descubierto que, en una proporción importante del área cafetera de Colombia ocurren condiciones de acidez del suelo (Sadeghian, 2016; Sadeghian, 2022), las cuales pueden afectar el crecimiento de las plantas si no se toman las medidas del caso. Estos resultados se presentan a escala departamental y no reflejan lo que sucede, por ejemplo, a nivel de municipio. El presente estudio, de tipo exploratorio, tuvo como objetivo caracterizar y mapear la acidez del suelo en la zona cafetera de Colombia a escala municipal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Base de datos

En una base de datos, en el formato Excel, se reunió la información de los análisis de suelos realizados desde el año 1989, en 460 municipios de 22 departamentos de Colombia. Los resultados correspondían a muestras tomadas de 0 a 20 cm de profundidad y analizadas en los diferentes laboratorios del país, para evaluar la fertilidad del suelo en lotes cultivados en café, con fines de generar las recomendaciones de fertilizantes y enmiendas.

Las propiedades analizadas incluyeron pH (método potenciométrico, relación suelo:agua desionizada 1:1 p/p), materia orgánica (Walkley & Black y determinación por colorimetría), fósforo disponible (extracción con Bray II y determinación por Bray-Kurtz colorimétrica), Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ (extracción con acetato de amonio 1,0 N apH 7,0 y determinación por espectrofotómetro de absorción atómica), Al^{3+} (extracción con KCl 1,0 N y determinación por espectrofotómetro de absorción atómica o titulación) y SAI^{3+} (calculada, de acuerdo con la Ecuación <1>).

$$\text{Saturación de } Al^{3+} = \frac{Al^{3+} * 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Al^{3+}} <1>$$

Se consolidó una base de datos que contenía para cada registro los valores de las anteriores propiedades del suelo y la correspondiente información de la localización (municipio y departamento). Seguidamente, se llevó a cabo la depuración de la base de datos, considerando como valores atípicos o extremos aquellos que no cumplieran con los siguientes criterios: $3,0 < pH < 7,5$, $Ca^{2+} \leq 30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $Mg^{2+} \leq 10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $K^+ \leq 5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y $Al^{3+} \leq 10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Por último, se retiraron de la base de datos aquellos municipios que contaban con menos

de 25 registros; quedando de esta manera un total de 344.652 registros, correspondientes a 460 municipios.

Análisis de datos

Se utilizó el diagrama de cajas y bigotes para describir las variaciones del pH a nivel departamental y se calculó la frecuencia porcentual de muestras en los siguientes rangos de la acidez activa: 1) $\text{pH} \leq 4,5$, 2) $4,5 < \text{pH} \leq 5,0$, 3) $5,0 < \text{pH} \leq 5,5$, 4) $5,5 < \text{pH} \leq 6,0$ y 5) $\text{pH} > 6,0$. Para cada municipio se calculó la frecuencia de los datos de pH, Al^{3+} y SAI^{3+} en los rangos considerados de baja fertilidad para café en Colombia: $\text{pH} \leq 5,0$, $\text{Al}^{3+} > 1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y $\text{SAI}^{3+} > 40\%$ (adaptado de Sadeghian, 2018). Cabe aclarar que, para el caso de SAI^{3+} se tomó un rango crítico más alto que el de referencia (30%); buscando así identificar niveles de saturación de aluminio que pudieran llegar a generar toxicidad en plantas de café. Los anteriores valores de frecuencias porcentuales se clasificaron en las siguientes categorías: muy baja (menor que 20%), baja (20% a 40%), media (40% a 60%), alta (60% a 80%) y muy alta (mayor que 80%). Basados en las anteriores categorías, se elaboraron mapas de pH, Al^{3+} y SAI^{3+} a escala municipal.

Mediante la regresión simple se determinó la relación entre el pH y Al^{3+} , SAI^{3+} y la suma de Ca^{2+} y Mg^{2+} ; así mismo, se empleó la regresión múltiple para explicar la variabilidad del pH en función de las demás propiedades analizadas de manera conjunta. Para el procesamiento de los datos se utilizó el software Rbio (Bhering, 2017).

Mapas de fertilidad

Soportado en las categorías de las frecuencias de muestras en el rango de baja fertilidad de

los municipios, se elaboraron mapas digitales para pH, Al^{3+} y SAI^{3+} con el software ArcGis (V.10.3.1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estadística descriptiva para pH

La significancia de la prueba de Shapiro-Wilk ($p=0,001174$) indica que la distribución de los datos de pH no fue normal. Esta presentó una distribución tendiente a ser plana (mesocúrtica), con poca ocurrencia de datos extremos y colas cortas (Figura 1), resultados que se reflejaron en el valor de la curtosis (-0,199). La asimetría positiva (0,272) revela que la distribución se sesgó hacia la izquierda.

Para todos los departamentos, la distribución de los datos fue simétrica, con valores extremos que pueden inducir alargamiento de las colas en algunos casos (Figura 2). Por lo general, la mayor parte de los datos atípicos ocurrieron para valores altos, resultado que puede tener su explicación en el incremento del pH, ocasionado por el sobre-encalamiento. Los coeficientes de variación fueron bajos (7,44% a 14,16%), resultado que coincide con los reportes de Patiño et al. (2006) para la zona cafetera del departamento del Valle del Cauca y lo comunicado por Jaramillo et al. (2013) y Lince & Sadeghian (2012) a nivel del lote cafetero en Colombia.

De los 460 municipios estudiados, 58 presentaron valores promedio de pH menor que 4,5; 217 entre 4,5 y 5,0; 169 entre 5,0 y 5,5; y 16 entre 5,5 y 6,1. Lo anterior pone al descubierto que el 60% de los municipios cafeteros presentan condiciones de acidez del suelo que puede afectar el crecimiento del café; siendo más crítica la situación para el 13%, donde los valores del pH son menores que 4,5.

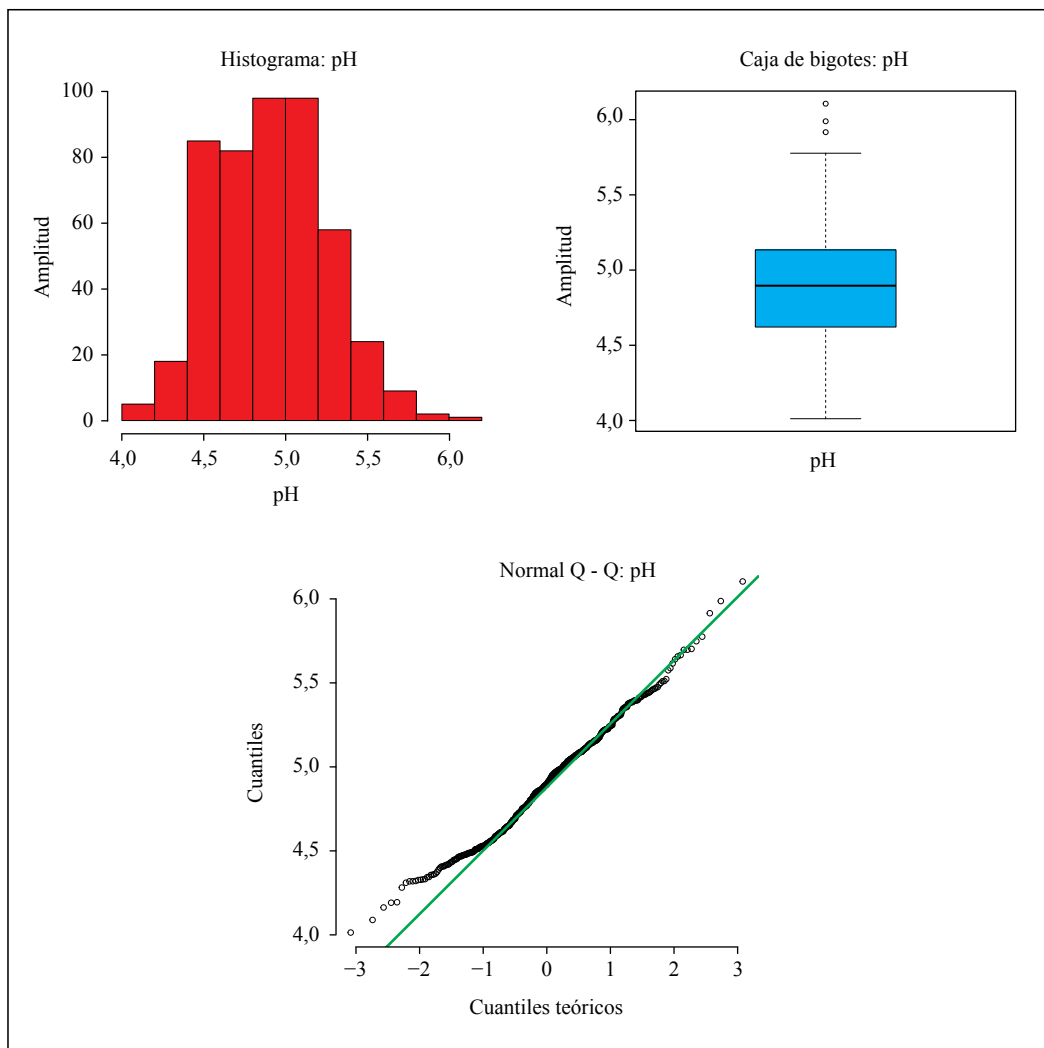


Figura 1. Histograma, diagrama de caja y bigotes, y gráfico Q-Q (cuantil-cuantil) para pH (n=460, municipios).

Los promedios más bajos de pH (<4,5) se detectaron en Bolívar, Meta, Caquetá, Casanare y Putumayo, departamentos en los cuales la mayor parte de los datos estuvieron por debajo de 5,0. Los promedios más altos (>5,0) se encontraron en el Valle del Cauca, La Guajira, Risaralda, Nariño y Caldas.

En algunos municipios, el promedio del pH estuvo cercano a 4,0, mientras que en otros llegó hasta 6,0. El contenido de Al^{3+} fluctuó entre 0,1 y 4,7 $cmol_c\ kg^{-1}$ y SAI^{3+} entre 0,2% y 91,1%. El nivel más bajo de Ca^{2+} fue 0,2 $cmol_c\ kg^{-1}$ y el más alto 17,9 $cmol_c\ kg^{-1}$; a su vez, el rango de Mg^{2+} estuvo entre 0,12 y 5,7 $cmol_c\ kg^{-1}$.

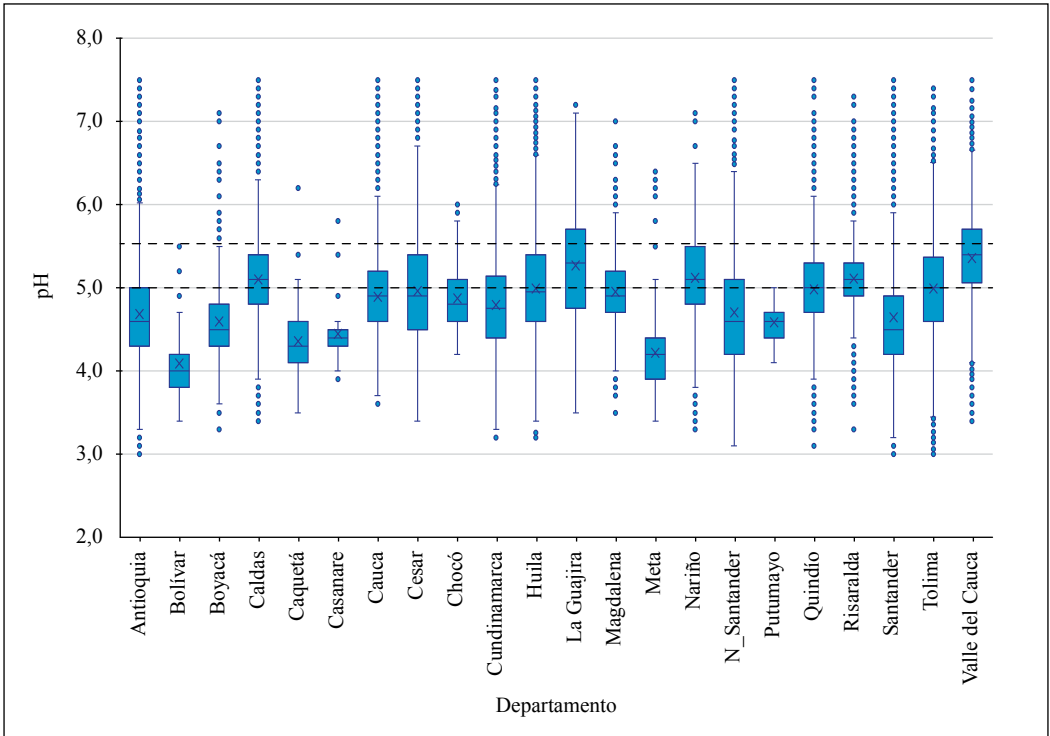


Figura 2. Diagramas de cajas y bigotes de la distribución del pH del suelo (1:1 H₂O) para 22 departamentos de la zona cafetera de Colombia. La letra X denota la media, las líneas continuas dentro de las cajas la mediana y las líneas negras horizontales denotan el rango del pH adecuado para café.

Relación entre el pH y demás propiedades del suelo

Se halló una relación fuerte y negativa tanto entre el pH y el contenido de Al³⁺, como entre pH y SAl³⁺ (Figura 3), siendo más ajustada esta última relación, posiblemente por incluir a Ca²⁺ y Mg²⁺ en la ecuación de la acidez.

Como era de esperarse, el Al³⁺ disminuyó con el aumento del pH, llegando a valores cercanos a cero para pH=5,5, sin alcanzar este límite. Como se mencionó, el aluminio trivalente (Al³⁺) se reduce conforme se incrementa el pH y, deja de existir como especie química con el pH>5,5, dando su lugar a la forma neutralizada Al(OH)₃ (Bleam, 2017; Zapata, 2022), razón

por la cual los laboratorios no lo analizan. Por lo tanto, valores de Al³⁺ y SAl³⁺ mayores que cero para pH>5,5 se deben al efecto de las desviaciones que pueden presentarse alrededor del promedio de los municipios.

Las variaciones de Al³⁺ para un mismo valor de pH fueron altas, especialmente para condiciones de mayor acidez; por ejemplo, para pH=4,5 se detectaron valores de Al³⁺ entre 1,5 y 4,5 cmol_c kg⁻¹, resultado que puede relacionarse con la diversidad de las propiedades de los suelos de la zona cafetera del país en consecuencia de los factores y procesos de su formación. Una tendencia similar se observó para la SAl³⁺. Con base en las ecuaciones de estos dos indicadores de

la acidez, pueden estimarse para $\text{pH}=5,0$ los valores de Al^{3+} y SAI^{3+} de $1,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y 23% , respectivamente.

La relación del pH y la suma de Ca^{2+} y Mg^{2+} tuvo una menor significancia que Al^{3+} y SAI^{3+} (Figura 3); sin embargo, la

tendencia general muestra que los contenidos de estos dos elementos se incrementan conforme al aumento del pH . La ecuación sugiere que, en promedio, el $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ alcanzan $6,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ con el $\text{pH}=5,0$; esto, con extremos de $3,0$ y $12,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ aproximadamente.

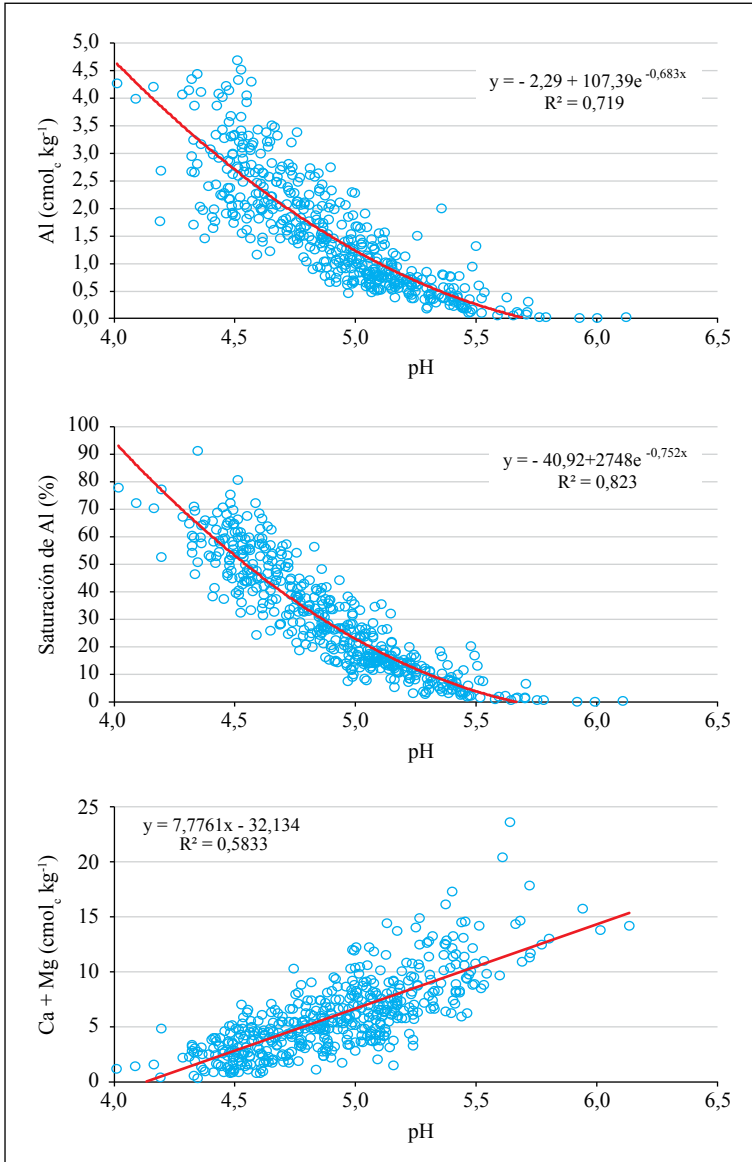


Figura 3. Relación entre pH y Al^{3+} , SAI^{3+} y la suma de Ca^{2+} y Mg^{2+} ($n=460$). Cada punto corresponde al promedio de un municipio de la zona cafetera de Colombia.

En la Figura 4 se representan, mediante mapa de calor y dendograma, las relaciones entre las propiedades del suelo, generadas a partir de valores promedio de cada municipio. Pueden distinguirse los siguientes grupos: i) Ca^{2+} y Mg^{2+} , ii) pH y Al^{3+} , y iii) K. La regresión múltiple reveló que las variaciones del pH pueden explicarse mediante la Ecuación <2>, en la cual no está presente el Mg^{2+} , debido a su alta correlación con Ca^{2+} :

$$\text{pH} = 4,8893 + 0,2703 * \text{K} + 0,0538 * \text{Ca} - 0,1936 * \text{Al} \quad <2>$$

En esta expresión matemática, con $R^2 = 0,84$ y una alta significancia de todos los parámetros de las variables ($p < 0,001$), los signos de estos parámetros indican una relación directa de pH con respecto al Ca^{2+} y K^+ , y una relación inversa entre pH y Al^{3+} , resultados que son coherentes con lo discutido hasta el momento.

Frecuencia de los rangos del pH por departamento

En la Tabla 1 se muestra el porcentaje de muestras en cada rango de pH para cada departamento. Más del 70% de las muestras procedentes de Bolívar, Meta, Casanare y Caquetá presentaron valores de $\text{pH} \leq 4,5$. En los mismos departamentos y Putumayo, más del 95% de los resultados exhibían acidez para café ($\text{pH} \leq 5,0$). Una situación similar, pero de menor magnitud, se detectó en Boyacá, Santander y Antioquia. La condición detectada sugiere la implementación de estrategias para corregir la acidez del suelo en las diferentes etapas del cultivo de café, entre las cuales se destaca el encalado como práctica determinante en el crecimiento y producción de café en Colombia (Sadeghian, 2022).

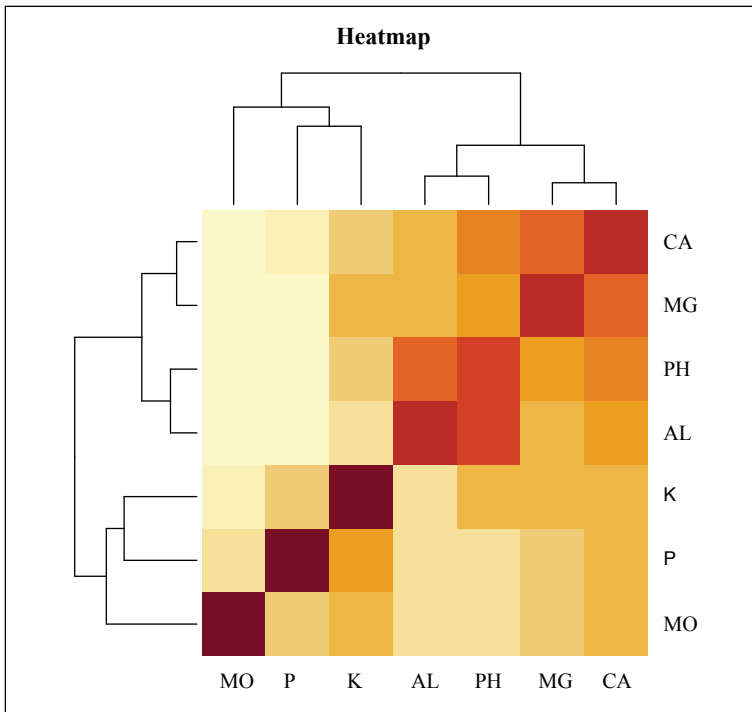


Figura 4. Mapa de calor (heatmap) de las propiedades del suelo.

Para el Valle del Cauca se detectó una condición diferente, pues solo el 4,4% de los resultados tenían valores de $pH \leq 4,5$ y 24,5% $pH \leq 5,0$. Una tendencia similar, pero de menor magnitud, se registró para La Guajira, Risaralda, Caldas y Nariño (entre 40% y 50% de muestras con $pH \leq 5,0$). Tuvieron una baja representación porcentual las muestras de suelo con valores de $pH > 6,0$,

los cuales se consideran altos para café y, en cuyo caso, ameritan tratamientos correctivos (Sadeghian, 2008). Solo en La Guajira y Valle del Cauca se encontraron estas categorías, sin que su proporción excediera el 7%. Los departamentos con mayor porcentaje de muestras en el rango óptimo para café ($5,0 < pH \leq 5,5$) fueron Risaralda y Valle del Cauca.

Tabla 1. Porcentaje de muestras por departamento, según el rango de pH.

Departamento	$pH \leq 4,5$	$4,5 < pH \leq 5,0$	$5,0 < pH \leq 5,5$	$5,5 < pH \leq 6,0$	$pH > 6,0$
Antioquia	44,03	35,67	14,22	4,69	1,39
Bolívar	87,10	8,06	4,84	-	-
Boyacá	53,81	34,11	6,29	3,48	2,32
Caldas	10,23	36,93	37,93	12,95	1,96
Caquetá	74,25	22,76	2,71	-	0,27
Casanare	77,78	16,67	2,78	2,78	-
Cauca	22,29	44,00	26,05	6,00	1,66
Cesar	28,72	28,62	24,76	12,84	5,05
Chocó	16,79	54,85	24,25	4,10	-
Cundinamarca	34,96	33,64	19,94	7,83	3,62
Huila	23,38	32,80	26,10	13,51	4,20
La Guajira	16,30	22,96	28,89	20,74	11,11
Magdalena	16,94	43,98	31,13	7,23	0,72
Meta	84,65	11,63	1,40	0,47	1,86
Nariño	15,09	33,73	30,77	15,38	5,03
Norte de Santander	46,02	27,00	16,03	7,32	3,63
Putumayo	42,31	57,69	-	-	-
Quindío	15,91	38,91	35,81	8,67	0,70
Risaralda	7,27	35,61	45,20	10,91	1,01
Santander	53,47	26,55	10,05	5,41	4,52
Tolima	20,28	32,53	32,09	12,32	2,77
Valle del Cauca	4,38	20,13	40,66	27,30	7,53

Regionalización de pH

En la Figura 5 se representa, mediante mapa, la frecuencia porcentual de muestras de suelos con $\text{pH} \leq 5,0$. El 60,5% del área con potencial cafetero de Colombia presenta limitantes por acidez, siendo la situación más crítica para el 33% ($\text{pH} \leq 4,5$); escenario en la cual predomina el Al^{3+} sobre Ca^{2+} y Mg^{2+} .

Pueden distinguirse zonas que se caracterizan por su mayor frecuencia de acidez y otras en las que esta condición es menos limitante. En las primeras se tienen:

- **Zona Oriental.** Norte de Santander, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Oriente del Tolima, Suroriente del Huila, Casanare, Meta, Caquetá y Putumayo.
- **Zona Central.** Oriente de Antioquia y de Caldas, y Suroriente de Tolima y de Huila.
- **Zona Occidental.** Occidente de Antioquia, Suroccidente del Valle del Cauca y Noroccidente de Cauca.

Y las zonas donde ocurren menos limitantes por acidez son:

- **Zona Occidental:** Noroeste de Antioquia, Suroeste y Occidente de Risaralda, Valle del Cauca y Nariño.
- **Zona Central:** Centro y Suroeste de Caldas.

La acidez del suelo, entre otros factores y proceso pedogenéticos, está íntimamente relacionada con el material parental. En Antioquia, Tolima, Santander y Cundinamarca, la alta frecuencia de la acidez puede asociarse a rocas de composición ácida; de las cuales, en Antioquia corresponden a dos tipos, la granodiorita biotítica que da origen a la unidad de suelos Oriente, y los esquistos silicatados

que dan origen a las unidades Aures y Salgar (FNC, 1972, 1992). En Tolima, las rocas que propician la condición ácida son el granito y la cuarzdiorita, representadas por las unidades de suelo San Simón, La Cabaña, Colón y Junín, y las sedimentarias, en su mayoría areniscas pobres en bases, originarias de las unidades Mendarco y Guadalupe. En Santander y Cundinamarca son las rocas sedimentarias, de tipo areniscas cuarzosas de grano fino a medio y lutitas silíceas, que dan origen a las unidades de suelos Llano de Palmas, El Roper, Sargento, Guadalupe y Chanchón (FNC, 1973, 1974, 1981).

Para el Valle del Cauca, esta condición puede asociarse con el material parental del cual provienen los suelos, que en su mayoría corresponden a rocas de composición básica. En las ígneas se tienen peridotitas, diabasas y basaltos hornbléndicos, las cuales dan origen a las unidades de suelo Parnaso, Dovio y Maibá y en las metamórficas a anfíbolitas, y esquistos talcosos, biotíticos y micáceos, originarios de las unidades Chuscal, Catarina y Cascarero (FNC, 1990).

Regionalización de aluminio intercambiable

En la Figura 6 se representa, a manera de mapa, la frecuencia porcentual de muestras de suelos con $\text{Al}^{3+} \geq 1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. En el 42,5% del área con aptitud para el cultivo de café en Colombia se presenta una alta a muy alta frecuencia de posibles problemas por el Al^{3+} . Las siguientes regiones presentan mayores limitantes:

- **Zona Oriental.** Santander, Boyacá, Norte de Cundinamarca, Oriente del Tolima, Suroriente del Huila, Casanare, Meta, Caquetá y Putumayo.
- **Zona Central.** Oriente de Antioquia y de Caldas, y Suroriente de Tolima y de Huila.

- **Zona Occidental.** Occidente de Antioquia, Suroccidente del Valle del Cauca y Noroccidente de Cauca.

Regionalización de la saturación de aluminio intercambiable

En la Figura 7 se representa, a manera de mapa, la frecuencia porcentual de muestras de suelos con porcentaje de $SAI^{3+} > 40\%$. En el 33% del área con aptitud para el cultivo de café en Colombia se presenta una alta a muy alta frecuencia de posibles problemas por el Al^{3+} . Las siguientes regiones se presentan mayores limitantes:

- **Zona Oriental.** Oriente de Santander y de Antioquia, Casanare, Meta, Caquetá y Putumayo.
- **Zona Central.** Oriente de Antioquia y de Caldas, y Suroriente de Tolima y de Huila.
- **Zona Occidental.** Occidente de Antioquia, Suroccidente del Valle del Cauca y Noroccidente de Cauca.

Puede concluirse que la acidez del suelo es un común denominador en muchos territorios de la zona cafetera de Colombia; basta con decir que, el 60,5% del área con potencial

cafetero presenta limitantes por acidez, siendo la situación más crítica para el 33% ($pH \leq 4,5$); escenario en el cual predomina Al^{3+} sobre Ca^{2+} y Mg^{2+} . En las siguientes regiones la frecuencia de acidez es mayor: Norte de Santander, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Oriente del Tolima, Suroriente del Huila, Casanare, Meta, Caquetá, Putumayo, Oriente de Antioquia y de Caldas, Suroriente de Tolima y de Huila, Occidente de Antioquia, Suroccidente del Valle del Cauca y Noroccidente de Cauca. La condición de la acidez está relacionada con el material parental en interacción con otros factores de formación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración y los valiosos aportes de Luis Ignacio Estrada, Rubén Darío Medina, Luis Carlos Imbachí, los revisores del manuscrito y los Comités Departamentales de Cafeteros que proporcionaron los resultados de los análisis de suelos. Proyecto SUE02001.

Contribución de los autores: Conceptualización de la investigación, Administración del proyecto y Recolección de datos: **SSK**; Análisis de la información: **SSK** y **LALS**; Preparación del manuscrito: **SSK**; Revisión del manuscrito: **SSK** y **LALS**; Elaboración de mapas: **LALS**.

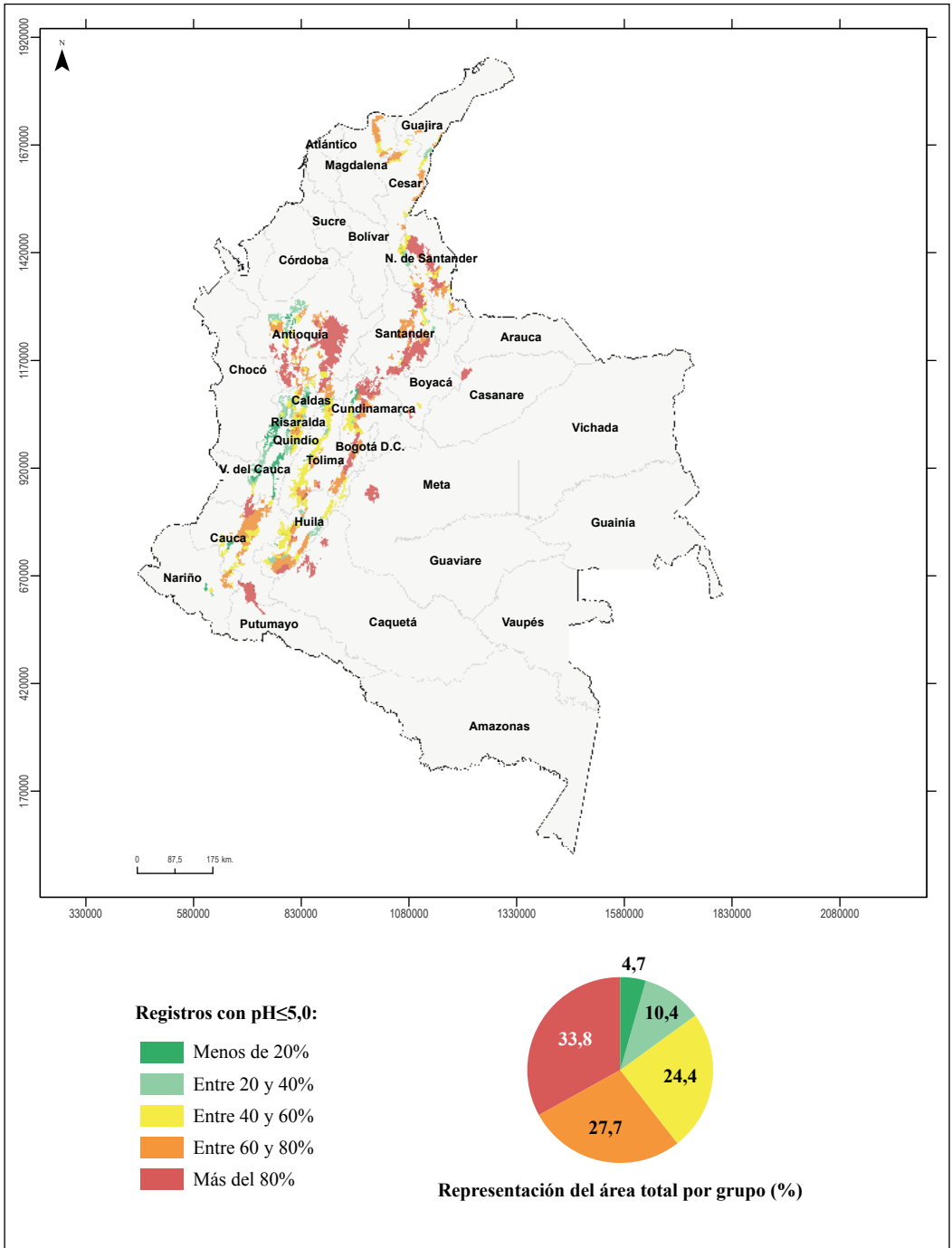


Figura 5. Representación de la frecuencia relativa de muestras de suelo con valores de pH menores que 5,0 en la zona cafetera de Colombia.

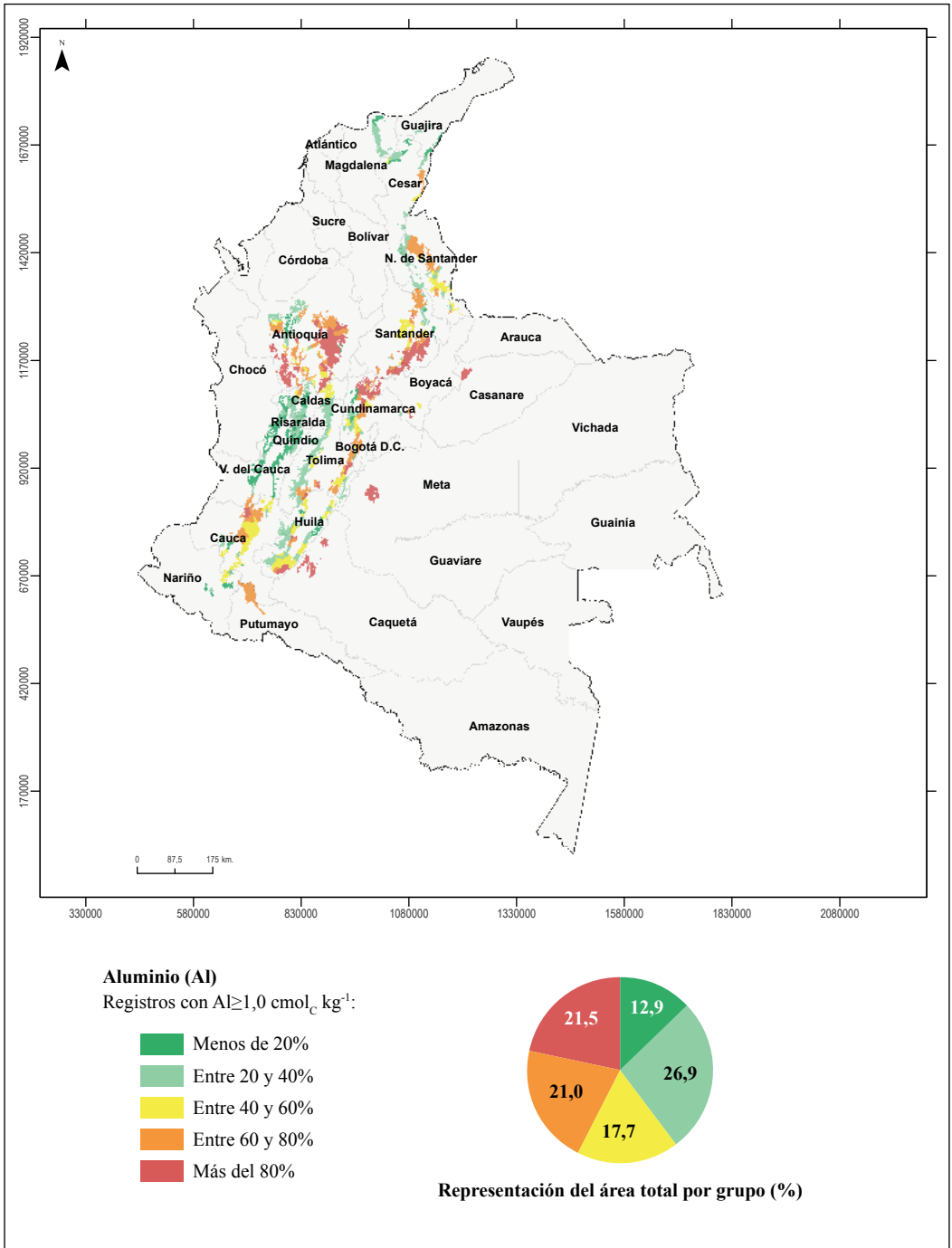


Figura 6. Representación de la frecuencia relativa de muestras de suelo con valores de Al^{3+} mayores que $1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ en la zona cafetera de Colombia.

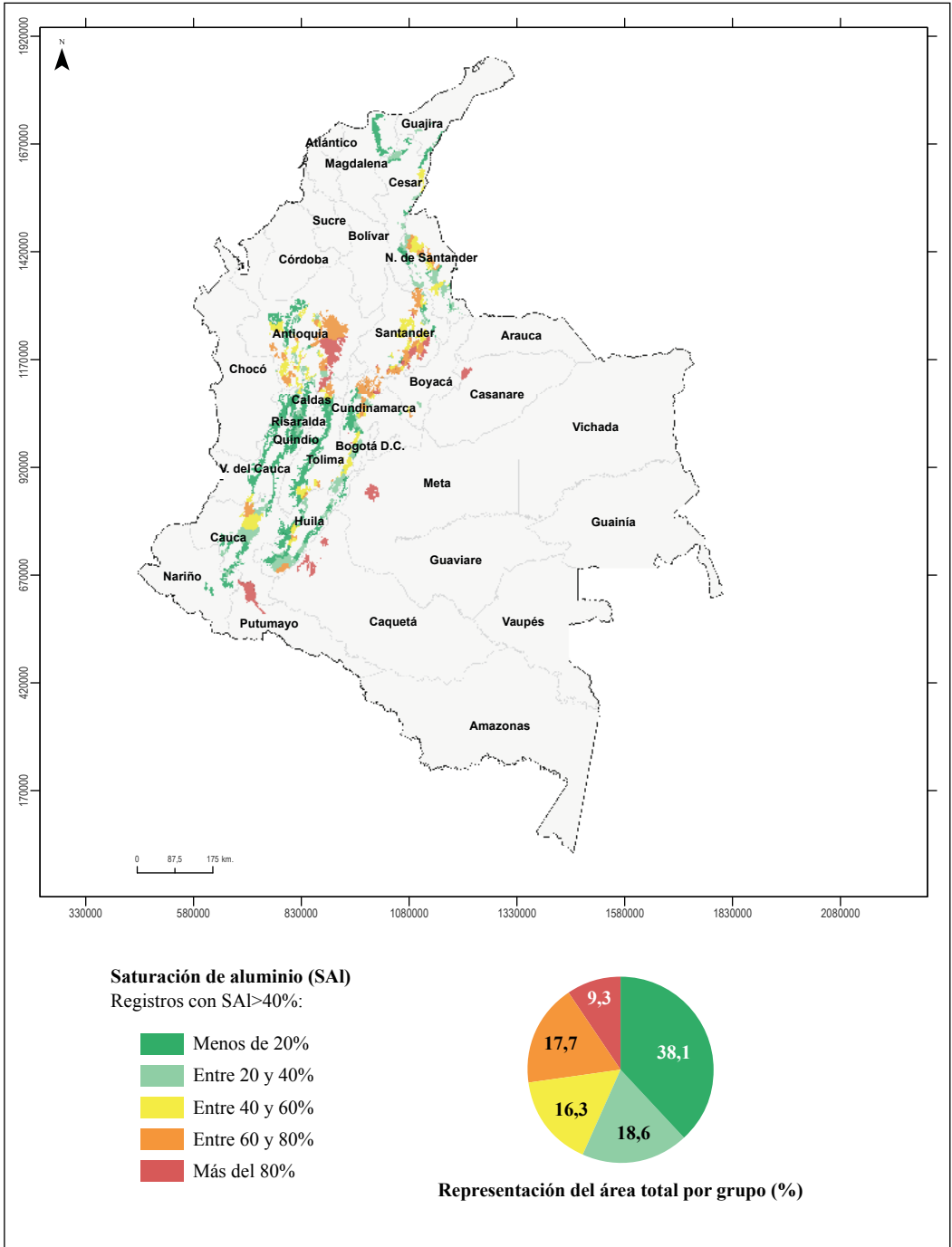


Figura 7. Representación de la frecuencia relativa de muestras de suelo con valores de saturación de Al³⁺ mayores que 40% en la zona cafetera de Colombia.

LITERATURA CITADA

- Acuña-Zornosa, R., & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2020). Identification of acid-tolerant coffee genotypes in a coffee germplasm collection of Colombia. *Coffee Science*, 15, e151727. <https://doi.org/10.25186/v15i.1727>
- Barbosa, S. M., Silva, B. M., Oliveira, G. C. D., Benevenuto, P. A. N., Da Silva, R. F., Curi, N., Da Silva Moretti, B., Silva, S. H. G., Norton, L. D., & Pereira, V. M. (2020). Deep furrow and additional liming for coffee cultivation under first year in a naturally dense inceptisol. *Geoderma*, 357, 113934. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113934>
- Behera, S. K., & Shukla, A. K. (2015). Spatial Distribution of Surface Soil Acidity, Electrical Conductivity, Soil Organic Carbon Content and Exchangeable Potassium, Calcium and Magnesium in Some Cropped Acid Soils of India. *Land Degradation & Development*, 26(1), 71–79. <https://doi.org/10.1002/ldr.2306>
- Belay, A. M., Selassie, Y. G., Tsegaye, E. A., Meshesha, D. T., & Addis, H. K. (2023). Soil pH mapping as a function of land use, elevation, and rainfall in the lake tana basin, northwestern of ethiopia. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 6(4), e20420. <https://doi.org/10.1002/agg2.20420>
- Bhering, L. L. (2017). Rbion: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 17(2), 187–190. <https://doi.org/10.1590/1984-70332017v17n2s29>
- Bleam, W. (2017). *Soil and Environmental Chemistry*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01022-X>
- Braccini, M. C. L., Martínez, H. E. P., Pereira, P. R. G., Sampaio, N. F., & Silva, E. A. M. (1998). Tolerância de genótipos de café ao alumínio em solução nutritiva. I. Crescimento e desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22(3), 435–442. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000300009>
- Chaves, J., Paván, M. A., & Igue, K. (1984). Respostas do caféiro à calagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 19(5), 573–582. <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/15714/9728>
- Chen, S., Liang, Z., Webster, R., Zhang, G., Zhou, Y., Teng, H., Hu, B., Arrouays, D., & Shi, Z. (2019). A high-resolution map of soil pH in China made by hybrid modelling of sparse soil data and environmental covariates and its implications for pollution. *Science of The Total Environment*, 655, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.230>
- Corrêa, J. B., Reis, T. H. P., Pozza, A. A. A., Guimarães, P. T. G., & Carvalho, J. G. de. (2007). Índice de saturação por bases na nutrição e na produtividade de cafeeiros ‘Catuá Vermelho’ (*Coffea arabica* L.). *Coffee Science*, 2(2), 159–167. <https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/62>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1972). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del Suroeste de Antioquia*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1973). *Estudio de zonificación y uso potencial del departamento del Tolima*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1974). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Cundinamarca*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1974). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Cundinamarca*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1990). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Valle del Cauca*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1992). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del oriente de Antioquia*. Cenicafé.
- Foth, H. D., & Ellis, B. G. (1997). *Soil fertility* (2nd ed.). CRC Press.
- Geng, Y., Zhou, T., Zhang, Z., Cui, B., Sun, J., Zeng, L., Yang, R., Wu, N., Liu, T., Pan, J., Si, B., & Lausch, A. (2024). Continental-scale mapping of soil pH with SAR-optical fusion based on long-term earth observation data in google earth engine. *Ecological Indicators*, 165, 112246. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112246>
- Guo, J., Wang, K., & Jin, S. (2022). Mapping of Soil pH Based on SVM-RFE Feature Selection Algorithm. *Agronomy*, 12(11), 2742. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112742>

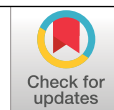
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.
- Jaramillo, D. F., Sadeghian, S., & Lince, L. A. (2013). Variabilidad espacial de las bases en un Andisol de la zona cafetera central colombiana. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 33, 111–124.
- Lince, L. A., & Sadeghian, S. (2012). Número de muestras simples para el análisis de las propiedades del suelo. *Suelos ecuatoriales*, 42(2), 129–137.
- Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019, 5794869. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). *Suelos Ácidos*. Portal de Suelos de la FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/>
- Ortiz, M. E., Zapata, R. D., Sadeghian, S., & Franco, H. F. (2004). Aluminio intercambiable en suelos con propiedades ándicas y su relación con la toxicidad. *Revista Cenicafé*, 55(2), 101–110. <http://hdl.handle.net/10778/165>
- Parecido, R. J., Soratto, R. P., Perdoná, M. J., Guidorizzi, F. V. C., Gomes, G. G., Paula, R. A., & Gitari, H. I. (2021). Limestone increased coffee yield and profitability more than phosphogypsum or their combination. *Agronomy Journal*, 113(4), 3586–3599. <https://doi.org/10.1002/agj2.20712>
- Parecido, R. J., Soratto, R. P., Perdoná, M. J., Gitari, H. I., Dognani, V., Santos, A. R., & Silveira, L. (2021). Liming Method and Rate Effects on Soil Acidity and Arabica Coffee Nutrition, Growth, and Yield. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(4), 2613–2625. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00550-9>
- Patiño, M. A., Sadeghian, S., & Montoya, E. C. (2006). Caracterización de la fertilidad del suelo en la zona cafetera del Valle del Cauca mediante registros históricos. *Revista Cenicafé*, 57(1), 7–16. <http://hdl.handle.net/10778/182>
- Paván, M. A., & Bingham, F. T. (1982). Toxicity of Aluminum to Coffee Seedlings Grown in Nutrient Solution. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 993–997. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050021x>
- Paván, M. A., Bingham, F. T., & Pratt, P. F. (1982). Toxicity of Aluminum to Coffee in Ultisols and Oxisols Amended with CaCO₃, MgCO₃, and CaSO₄ · 2H₂O. *Soil Science Society of America Journal*, 46(6), 1201–1207. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600060017x>
- Reuter, H. I., Rodriguez, L. L., Hengl, T., & Montanarella, L. (2008). Continental-Scale Digital Soil Mapping Using European Soil Profile Data: Soil PH. *Hamburger Beiträge Zur Physischen Geographie Und Landschaftsökologie*, 19(1), 91–102.
- Rodrigues, L., Martínez, H. E. P., Neves, J. C. L., Novais, R. F., & Mendonça, S. M. (2001). Growth response of coffee tree shoots and roots to subsurface liming. *Plant and Soil*, 234(2), 207–214. <https://doi.org/10.1023/A:1017999318532>
- Rodrigues, L. A., Prieto Martínez, H. E., Neves, J. C. L., Novais, R. F., & Mendonça, S. M. D. (2006). Respostas nutricionais de cafeeiros Catuaí e Icatu a doses de calcário em subsuperfície. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(6), 985–995. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600008>
- Roudier, P., Burge, O. R., Richardson, S. J., McCarthy, J. K., Grealish, G. J., & Ausseil, A.-G. (2020). National Scale 3D Mapping of Soil pH Using a Data Augmentation Approach. *Remote Sensing*, 12(18), 2872. <https://doi.org/10.3390/rs12182872>
- Sadeghian, S. (2003). Efecto de la fertilización con nitrógeno fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Revista Cenicafé*, 54(3), 242–257. <http://hdl.handle.net/10778/273>
- Sadeghian, S. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. *Boletín Técnico Cenicafé*, 32, 1–44. <http://hdl.handle.net/10778/587>
- Sadeghian, S. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 466, 1–12. <http://hdl.handle.net/10778/704>
- Sadeghian, S. (2018). Interpretación de los resultados de análisis de suelo: Soporte para una adecuada nutrición de cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé*, 497, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0497>
- Sadeghian, S. (2022). *Nutrición del café. Consideraciones para el manejo de la fertilidad del suelo*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0017>
- Sadeghian, S., & Díaz-Marín, C. (2020a). Corrección de la acidez del suelo: Efectos en el crecimiento inicial del café. *Revista Cenicafé*, 71(1), 21–31. <https://doi.org/10.38141/10778/1117>

- Sadeghian, S., & Díaz-Marín, C. (2020b). Corrección de la acidez del suelo: Alteraciones químicas del suelo. *Revista Cenicafé*, 71(1), 7–20. <https://doi.org/10.38141/10778/1116>
- Sadeghian, S., & Zapata, R. D. (2014). Crecimiento de café (*Coffea arabica* L.) durante la etapa de almácigo en respuesta a la salinidad generada por fertilizantes. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 31(2), 40–50. <https://doi.org/10.22267/rcia.143102.30>
- Sori, G., Iticha, B., & Takele, C. (2021). Spatial prediction of soil acidity and nutrients for site-specific soil management in Bedele district, Southwestern Ethiopia. *Agriculture & Food Security*, 10(1), 59. <https://doi.org/10.1186/s40066-021-00334-5>
- Sparks, D. (2003). *Environmental Soil Chemistry* (2a ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-656446-4.X5000-2>
- Yüzügüllü, O., Fajraoui, N., & Liebisch, F. (2024). Soil Texture and pH Mapping Using Remote Sensing and Support Sampling. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 12685–12705. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3422494>
- Weil, R. R., & Brady, N.C. (2017). *The nature and properties of soil* (15th ed.). Pearson.
- Zapata, R. D. (2022). *Los procesos químicos del suelo*. Universidad Nacional de Colombia.

NOTA CIENTÍFICA: EVALUACIÓN DE UN MÉTODO RÁPIDO PARA LA EXTRACCIÓN DE ADN A PARTIR DE AISLAMIENTOS DE *Colletotrichum* spp.

Camila A. Gutiérrez Góngora *, Rosa Lilia Ferrucho  **, Gustavo Adolfo Marín-Ramírez  **

Gutiérrez-Góngora, C. A., Ferrucho, R. L., & Marín-Ramírez G. A. (2024). Nota científica: Evaluación de un método rápido para la extracción de ADN a partir de aislamientos de *Colletotrichum* spp. *Revista Cenicafé*, 75(2), e75205. <https://doi.org/10.38141/10778/75205>



Se evaluó la aplicabilidad de un método de extracción de ácidos nucleicos para hongos del género *Colletotrichum* basado en el procedimiento desarrollado por Zou et al. (2017). Se modificó el protocolo reportado, para usarlo con cultivos puros del hongo crecidos en PDA. Se evaluaron factores como edad de los aislamientos, tipo de muestra, forma de maceración, y el tiempo de cada paso del proceso. El ADN extraído con este método fue suficiente para realizar la amplificación por PCR de punto final (convencional), lo que sugiere que es un método de extracción que puede ser implementado en laboratorios que requieran procedimientos rápidos y de bajo costo para la detección de *Colletotrichum* spp.

Palabras clave: Extracción de ADN, hongos, *Colletotrichum*, protocolo, Colombia.

EVALUATION OF A RAPID METHOD FOR DNA EXTRACTION FROM *Colletotrichum* spp. ISOLATES

The applicability of a nucleic acid extraction method for fungi of the genus *Colletotrichum* based on the procedure developed by Zou et al. (2017) was evaluated. The reported protocol was modified, using pure cultures grown in PDA, and the time of each step of the process were evaluated. The DNA extracted with this method was sufficient to perform end-point PCR amplification (conventional), suggesting that it is an extraction method that can be implemented in laboratories that require rapid and low-cost procedures for the detection of *Colletotrichum* spp.

Keywords: DNA extraction, fungi, *Colletotrichum*, protocol, Colombia.

* Pasante de microbiología. Universidad de los Andes.

** Investigador Científico I. Disciplina de Fitopatología, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-2362-170X>, <https://orcid.org/0000-0002-2145-9756>, respectivamente.

Colletotrichum es un género de hongos que incluye varias especies fitopatógenas que afectan cultivos de importancia económica como el café, maíz y caña de azúcar, entre otros (Cannon et al., 2012). Este género abarca una amplia diversidad biológica que incluye: rango y preferencia de plantas hospedantes, modo de reproducción y estrategias de infección. Adicionalmente, este género tiene diversidad de estilos de vida. Además de las especies fitopatógenas, existen endófitas y promotoras del crecimiento de plantas, entomopatógenas y patógenas oportunistas en humanos (Talhinhas & Baroncelli, 2021).

En plantas, distintas especies de *Colletotrichum* pueden causar enfermedades con sintomatología similar, por ejemplo, *C. acutatum* y *C. gloeosporioides* que causan antracnosis en frutos de diversas especies de plantas (Gaitán et al., 2013). Adicionalmente, en una misma planta pueden presentarse varias especies simultáneamente; por ejemplo, Oo et al. (2018) reportan cuatro especies de *Colletotrichum* en manzana en Korea y Li et al. (2019) con un registro de 13 especies en mango en China. Algunas especies de *Colletotrichum* tienen múltiples hospedantes y amplia distribución geográfica, mientras que otras son específicas de hospedante y pueden estar restringidas geográficamente, adquiriendo relevancia cuarentenaria. Un ejemplo es *Colletotrichum kahawae*, un patógeno del cultivo del café presente únicamente en África y que representa un riesgo fitosanitario en países productores como Colombia, dado el potencial de daño que posee (Guevara-Suárez et al., 2022; ICA, 2007). En el cultivo de café en Colombia se han reportado especies de *Colletotrichum* de los complejos *C. gloeosporioides* y *C. acutatum* (Guevara-Suárez et al., 2022). Dada la alta diversidad de este patógeno, se resalta la importancia de contar con métodos de diagnóstico que

permitan diferenciar las especies nativas de las cuarentenarias, como también identificar las especies asociadas a un mismo hospedante.

El diagnóstico de las enfermedades en plantas es muy importante, ya que la identificación correcta y oportuna de un patógeno permite planear y ejecutar medidas de manejo oportunas y adecuadas. De lo contrario, puede perderse dinero y tiempo tomando medidas que no resuelvan el problema, llevando a graves consecuencias como la pérdida del cultivo o la afectación del estatus fitosanitario de un país (Riley et al., 2002).

Por mucho tiempo, la morfología macro y microscópica fue utilizada como el principal medio para identificar a los hongos. Los caracteres microscópicos como las estructuras reproductivas sexuales y asexuales han sido de gran utilidad para llegar a distinguirlos. No obstante, la morfología no siempre da una descripción precisa a nivel de especie y puede generar confusión debido a procesos de hibridación, especiación críptica o convergencia de caracteres, incluso puede llegarse a separar la fase asexual y sexual de un mismo hongo como especies distintas (Raja et al., 2017). Por ello, las técnicas de biología molecular basadas en ADN han permitido superar estas limitaciones, debido a que permiten definir con certeza la identidad del microorganismo a nivel de especie. Es posible realizar esta identificación por medio de ensayos inmunológicos, sin embargo, estos suelen ser difíciles y costosos de producir (deben utilizarse anticuerpos muy específicos para que el método funcione). Así mismo, estos pueden llegar a ser menos específicos que los métodos moleculares, ya que suelen ser confiables para identificación sólo hasta nivel de género en organismos complejos como los hongos (Aslam et al., 2017).

La extracción de ácidos nucleicos es fundamental en el desarrollo y estandarización de técnicas de biología molecular, ya que provee el material genético para el estudio del organismo (Ali et al., 2017). Entre los métodos más sencillos y que logran extraer ADN con un alto rendimiento están los de fase sólida, en los cuales se utilizan matrices de sílica, membranas de intercambio aniónico o matrices de celulosa. Sin embargo, los costos asociados a los instrumentos y reactivos, así como los equipos requeridos son un factor importante a tener en cuenta estos procesos (Ali et al., 2017). Entre las alternativas de bajo costo para este tipo de extracción se tiene el uso de matrices simples como el papel filtro. Para agilizar el proceso se ha propuesto omitir el paso de la elución de los ácidos nucleicos, de modo tal que, el papel filtro que atrapa el material genético puede ser directamente utilizado en una reacción de amplificación. (Zou et al., 2017). Este procedimiento ha sido probado con diferentes especies vegetales y con plantas de *Arabidopsis thaliana* infectadas con bacterias, virus y con *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans*, obteniendo una amplificación exitosa de los genes blanco en todos los casos (Zou et al., 2017).

Es importante evaluar la utilidad de métodos rápidos para la extracción de ADN, que puedan usarse de forma rutinaria en laboratorio para el diagnóstico de enfermedades. Por ejemplo, para realizar vigilancia fitosanitaria para patógenos cuarentenarios como *C. kahawae* que aún no se encuentran en Colombia. Por esta razón, el objetivo de la investigación fue evaluar el método rápido de extracción de ADN desarrollado por Zou et al. (2017) para aislamientos del género *Colletotrichum*, pertenecientes a los complejos de especies *C. gloeosporioides* y *C. acutatum* y evaluar su utilidad en la amplificación de diferentes genes por PCR de punto final.

Se seleccionaron aislamientos de estos dos complejos de especies por tener una amplia distribución geográfica y rango de hospedantes en condiciones del trópico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método se evaluó con nueve aislamientos de *Colletotrichum* spp., seis aislados de plantas de café del cepario del Centro Nacional de Investigaciones de Café -Cenicafé (con código Coll) y tres cepas de referencia de la Colección Internacional de Microorganismos de Plantas (*International Collection of Microorganisms from Plants* -ICMP). Los aislamientos se pusieron a crecer en cajas de Petri con PDA (Potato Dextrose Agar) a 20°C, en oscuridad, por un periodo entre cinco y siete días para obtener micelio, y entre diez y 18 días para obtener micelio y conidias para la prueba. Se prepararon las tiras de captura del ADN. Se cortaron hojas de papel filtro grado 1, en fragmentos de 44 mm de alto y 2 mm de ancho. Las tiras se sumergieron en parafina previamente fundida a una temperatura de 85°C, dejando un extremo hidrofílico de aproximadamente 4 mm, para la captura de la muestra. Los tampones de lisis y de lavado se prepararon como se detalla a continuación y siguiendo el protocolo descrito por Zou et al. (2017). La solución de lisis se compuso de Tris [pH 8,0] a una concentración de 20 mM, NaCl a 25 mM, EDTA a 2,5 mM y SDS a una concentración del 0,05%. La solución de lavado contenía Tris [pH 8,0] a una concentración de 10 mM y Tween-20 a una concentración de 0,1%.

Para la extracción de ADN inicialmente se evaluó el protocolo reportado por Zou et al. (2017), sin modificaciones, y posteriormente se ajustaron algunos pasos. Para ello, se consideró la edad del aislamiento y el tipo de inóculo. El material biológico estuvo constituido por micelio y conidias obtenidos

por raspado superficial del hongo fresco crecido en PDA (unos 0,26 g), el cual se depositó en crioviales con 500 µL tampón de lisis. La lisis física se evaluó de dos maneras, la primera usando pistilos para tubos eppendorf con macerado manual (Zou et al., 2017), y la segunda, mediante el equipo FastPrep-24 5G (MP Biomedicals, USA). Para este último se adicionaron a cada tubo tres esferas de tungsteno y se maceró con el protocolo del equipo sugerido para hongos: "*Fusarium solani* cells" por un ciclo de 30 segundos a 6 metros por segundo. Posteriormente, se introdujo la porción hidrofílica de la matriz de captura dentro del macerado evaluando diferentes tiempos (15, 30 o 45 segundos) y luego se transfirió la tira a un tubo eppendorf de 2 ml que contenía 1,75 mL del tampón de lavado, dejándola allí por un tiempo que varió entre 10-15 segundos. Finalmente, se cortó la porción de la tira con la muestra y se depositó en el tubo de 0,2 mL que contenía 15 µL de la mezcla de reacción de PCR (1X búfer con MgCl₂, 0,2 mM dNTPs, 0,2 µM de cada cebador, 0,5 U *Taq* ADN polimerasa, SMOBIO). Se procuró que el fragmento de la tira cortada quedara completamente sumergido en la solución. La amplificación se realizó en un termociclador T100 Thermal Cycler (Bio-Rad, USA). El programa de PCR consistió de una etapa de desnaturalización inicial por tres minutos a 95°C, seguida de 35 ciclos de desnaturalización a 95°C durante 40 segundos (marcador ITS) y 30 s (marcador Cen-CollM9), hibridación de cebadores por 40 s a 55°C para el marcador ITS y 30 s a 56°C para Cen-CollM9, extensión a 72°C por 45 s para el marcador ITS y 30 s a 72°C para el marcador Cen-CollM9, y una extensión final a 72°C por diez minutos para ambos marcadores. Finalmente, las amplificaciones se verificaron mediante electroforesis en geles de agarosa al 1%, con tinción con Sybr Safe (Invitrogen), cargando 7,0 uL del producto de amplificación. Los amplicones se visualizaron

en el Molecular Imager® Gel Doc XR System (Biorad) (Figura 1).

Como control positivo, para cada aislamiento se realizó extracción de ADN utilizando el DNeasy Plant mini kit (Qiagen, Hilden, Germany), siguiendo el protocolo del fabricante. Las reacciones de PCR se realizaron como se describió previamente, adicionando 40 ng de ADN genómico por reacción. Adicionalmente, como control negativo, una tira fue sometida al mismo procedimiento de extracción sin muestra. La amplificación se realizó con los primers universales para hongos ITS5/ITS4, que amplifican un fragmento del DNA ribosomal (White, 1990) (denominado Marcador ITS) y un marcador específico para el complejo de especies *C. gloeosporioides* (Marcador Cen-CollM9) utilizando condiciones previamente estandarizadas en el Laboratorio de Fitopatología de Cenicafé para una investigación en curso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La extracción de ADN es un paso crucial en estudios moleculares y genómicos. En esta investigación se estudió y modificó el protocolo rápido de extracción de ADN desarrollado por Zou et al. (2017) para *Colletotrichum* spp. y se evaluó usando dos marcadores moleculares (ITS y Cen-CollM9).

Se implementaron modificaciones en el método de extracción rápida previamente publicado, resultando en una mayor proporción de aislamientos que amplifican y obteniendo mayor intensidad de banda. Inicialmente, se realizó la maceración manual, utilizando pistilos para tubos eppendorf, pero no había consistencia en la amplificación entre aislamientos, con los marcadores evaluados, ya que en algunas réplicas no se presentó banda en la electroforesis. Por esta razón, se optó por realizar el macerado con esferas de tungsteno

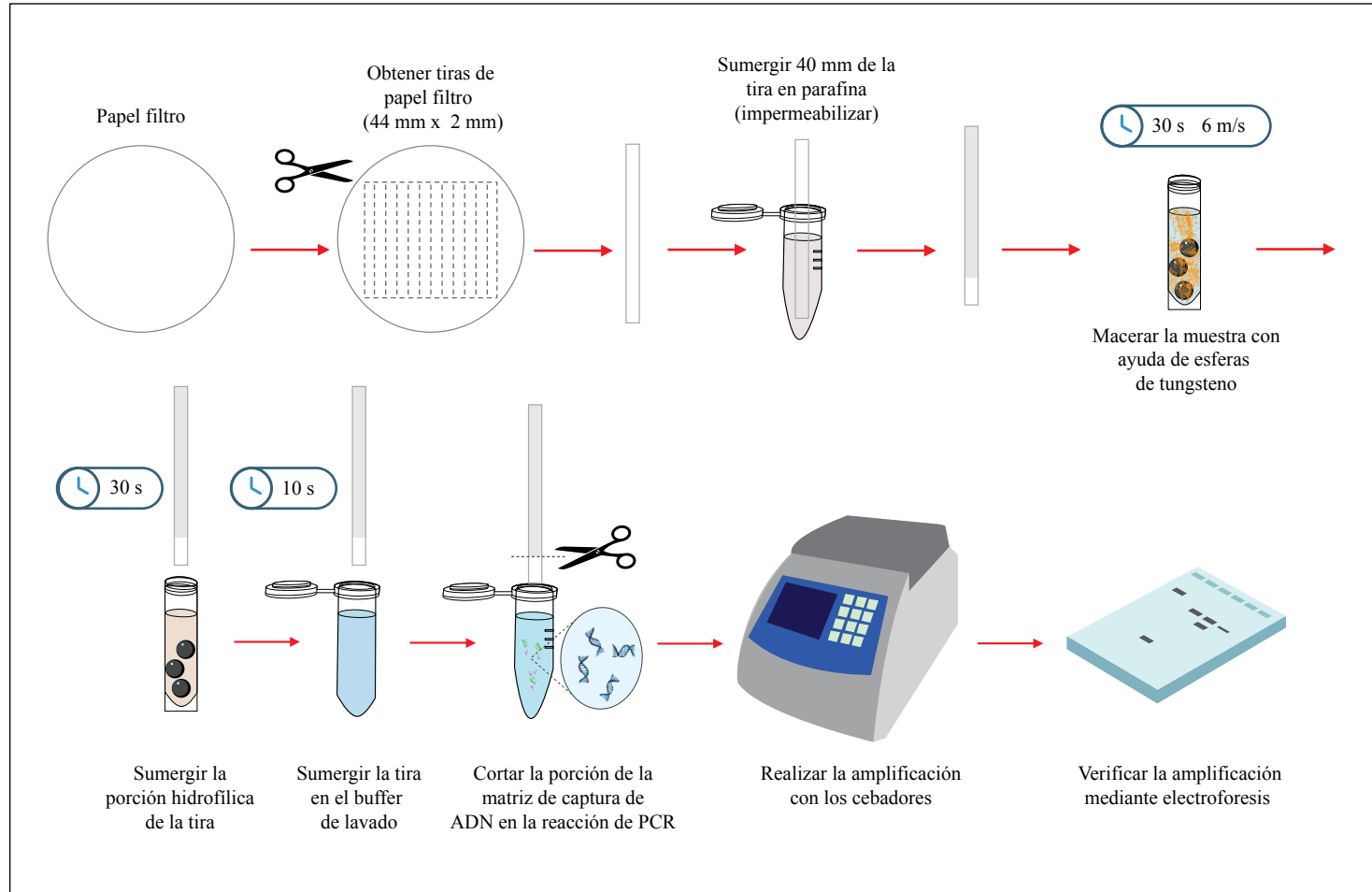


Figura 1. Método de extracción, amplificación y visualización de ácidos nucleicos para hongos del género *Colletotrichum* adaptado del procedimiento desarrollado por Zou et al. (2017).

en el equipo FastPrep-24 5G (MP Biomedicals, USA), con el protocolo “Recommended programs: Fungi: *Fusarium solani* cells” por uno de los ciclos cargados en el equipo. Esta adaptación contribuyó significativamente a mejorar la en la amplificación por PCR.

Adicionalmente, se evaluó la cantidad y el tipo de muestra empleado, con cultivos del hongo de diferentes edades. En cultivos de menos de siete días de edad predominó el micelio y no hubo amplificación consistente que se pudiera evidenciar con bandas intensas en la electroforesis en gel de agarosa. Aproximadamente 0,26 gramos de micelio con presencia de conidias, obtenidos por raspado superficial del cultivo en PDA proporcionaron una cantidad óptima, que generó un producto de amplificación con una alta intensidad de la banda. Cuando solo se utilizó micelio no hubo amplificación o la banda fue tenue (datos no mostrados). Así mismo, se establecieron tiempos específicos de inmersión de las tiras en el tampón de lisis y de lavado, concluyendo que 30 segundos en la solución de lisis y 10 segundos en la de lavado ofrecen resultados óptimos en la recuperación del ADN. Se llegó a la conclusión de que el corte de la tira debe hacerse de forma que esta quede completamente sumergida en la reacción de PCR, lo que evita que la reacción se evapore o quede retenida en el fragmento de papel filtro.

Se evaluaron dos marcadores moleculares para *Colletotrichum* spp. Uno específico para especies del complejo *C. gloeosporioides* de 150 pares de bases (marcador Cen-CollM9) y uno genérico que amplifica un fragmento de 700 pares de bases del DNA ribosomal de hongos (White et al., 1990) (marcador ITS), de modo que se pudiera verificar que el método funcionaba para la amplificación del material genético con sets de cebadores distintos. Para el marcador Cen-CollM9 se

evaluaron cinco aislamientos del complejo *C. gloeosporioides*, de los cuales se conocía que amplificaban para ese marcador, mientras que con el marcador 2 se analizaron nueve aislamientos (Tabla 1). Los cinco aislamientos del complejo *C. gloeosporioides* amplificaron con el marcador Cen-CollM9, específico para este grupo de acuerdo con lo esperado. Con el marcador ITS, amplificaron los nueve aislamientos evaluados correspondientes a los complejos *C. gloeosporioides* y *C. acutatum* (Tabla 1).

En estudios de identificación de *Colletotrichum* spp. se recurre frecuentemente a métodos moleculares para identificar la especie causante de la enfermedad. En particular, se lleva a cabo la amplificación del material genético del hongo, permitiendo su identificación mediante marcadores moleculares de regiones genómicas como ITS, GAPDH, MAT, entre otros (Alhudaib et al., 2023; Cao et al., 2019; Serrato-Diaz et al., 2020; AL-Faifi et al., 2022; Vieira et al., 2019). La extracción de ADN es un paso crucial para realizar la amplificación. Las alternativas para este procedimiento incluyen métodos paso a paso o kits comerciales, como los basados en matrices de sílica, los cuales son de uso único y requieren equipos adicionales (Ali et al., 2017; Cao et al., 2019; Serrato-Diaz et al., 2020; Vieira et al., 2019). Como alternativa a estos métodos, se ha explorado la obtención de ADN mediante modificaciones en la composición de los tampones de extracción y precipitación de la molécula de ADN con acetato de potasio e isopropanol. Estos ajustes pueden resultar exigentes y laboriosos debido a la especificidad de la muestra tratada y a la experiencia que se requiere (Ali et al., 2017; Alhudaib et al., 2023; AL-Faifi et al., 2022).

El procedimiento modificado que se presenta en este estudio logra extraer el ADN

Tabla 1. Resultados de la amplificación por PCR de punto final con dos marcadores moleculares, usando el ADN de *Colletotrichum* spp. obtenido con el método evaluado.

Aislamiento	Complejo de especies de <i>Colletotrichum</i>	Amplificación	
		Marcador Cen-CollM9	Marcador ITS
Coll1	<i>C. gloeosporioides</i>	I	I
Coll2	<i>C. gloeosporioides</i>	T	T
Coll3	<i>C. gloeosporioides</i>	I	I
ICMP12938	<i>C. gloeosporioides</i>	I	I
ICMP6999	<i>C. gloeosporioides</i>	I	T
Coll4	<i>C. acutatum</i>	NE	T
Coll5	<i>C. gloeosporioides</i>	NE	I
Coll7	<i>C. gloeosporioides</i>	NE	T
ICMP20568	<i>C. acutatum</i>	NE	I

T= Presencia de una banda tenue. I = Presencia de banda intensa, y NE= aislamiento no evaluado.

en pocos minutos, proporcionando una cantidad adecuada para amplificación por PCR. Aunque requiere una preparación previa de material, que consume tiempo, no exige otros equipos ni tiempos de incubación prolongados durante la extracción. Tanto los búferes como las tiras se pueden preparar y almacenar de acuerdo con la intensidad de uso.

Este es un método económico que no requiere mayor inversión en reactivos y equipos. Aunque la lisis con el FastPrep-24 5G, fue más eficiente, es viable realizarla con los pistilos. En caso de realizarla de esta manera, debe procurarse que el micelio y las

conidias queden bien macerados y que haya uniformidad entre las muestras, de modo que los resultados sean consistentes.

Al comparar el kit de extracción de ADN basado en matrices de sílica con el método rápido, se redujo significativamente el tiempo de procesamiento. Sin embargo, en algunos casos la intensidad de la banda amplificada no alcanza la misma intensidad que la obtenida con el ADN extraído con kit comercial. Esto puede deberse a que no se realizan los pasos de precipitación de los ácidos nucleicos, lo cual puede afectar la pureza del ADN. Aunque la cantidad de ADN retenida en los 8 mm² de la

tira de papel filtro, puede no ser comparable con la obtenida en el proceso de extracción con el kit comercial, fue suficiente para amplificar los dos marcadores.

En contraste, con la posibilidad de almacenamiento del ADN para procedimientos futuros que ofrece el kit, el método adaptado de Zou et al. (2017) requiere realizar la extracción en cada ocasión que se vaya a realizar la amplificación.

En conclusión, este método tiene un potencial para pruebas de laboratorio donde se requiere una extracción rápida. Por ejemplo, para laboratorios de diagnóstico, en donde los resultados deben generarse en corto tiempo. Sin embargo, no posibilita el almacenamiento del ADN para pruebas adicionales. No se registraron diferencias en la amplificación en la mayoría de los aislamientos evaluados cuando se utilizaron los cebadores universales, evidenciando que es posible utilizar el método para diferentes

especies de *Colletotrichum*, lo cual lo hace apto para diagnóstico de enfermedades en otros patosistemas.

AGRADECIMIENTOS

A Yoni González por la colaboración en procesos de laboratorio, a Carlos Zuluaga, Jorge Dicksson, Rufina Perdomo, Ana Sofía Henao, Carlos Doncel, José Didier Bermúdez, Sergio Alejandro Valencia y José Gilmar Carmona por su apoyo en los procesos y tareas de la Disciplina de Fitopatología durante la pasantía. Esta nota científica fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), Disciplina de Fitopatología.

Contribución de los autores: Investigación, Análisis formal, Visualización, Redacción–borrador original: **CAG**; Conceptualización, Supervisión: **GAM**; Adquisición de fondos, Administración de proyecto, Recursos, Redacción–revisión y edición: **GAM** y **RLF**.

LITERATURA CITADA

- AL-Faifi, Z., Alsolami, W., Abada, E., Khemira, H., Almalki, G., & Modafar, Y. (2022). *Fusarium oxysporum* and *Colletotrichum musae* Associated with Wilt Disease of *Coffea arabica* in Coffee Gardens in Saudi Arabia. *Canadian Journal of Infectious Diseases and Medical Microbiology*, 2022, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2022/3050495>
- Alhudaib, K., Ismail, A. M., & Magistà, D. (2023). Multi-Locus Phylogenetic Analysis Revealed the Association of Six *Colletotrichum* Species with Anthracnose Disease of Coffee (*Coffea arabica* L.) in Saudi Arabia. *Journal of Fungi*, 9(7), 705. <https://doi.org/10.3390/jof9070705>
- Ali, N., Rampazzo, R. D. C. P., Costa, A. D. T., & Krieger, M. A. (2017). Current Nucleic Acid Extraction Methods and Their Implications to Point-of-Care Diagnostics. *BioMed Research International*, 2017, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2017/9306564>
- Aslam, S., Tahir, A., Aslam, M. F., Alam, M. W., Shedayi, A. A., & Sadiá, S. (2017). Recent advances in molecular techniques for the identification of phytopathogenic fungi – a mini review. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 493–504. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1397205>
- Cannon, P. F., Damm, U., Johnston, P. R., & Weir, B. S. (2012). *Colletotrichum* – current status and future directions. *Studies in Mycology*, 73, 181–213. <https://doi.org/10.3114/sim0014>
- Cao, X. R., Xu, X. M., Che, H. Y., West, J. S., & Luo, D. Q. (2019). Characteristics and distribution of *Colletotrichum* species in coffee plantations in Hainan, China. *Plant Pathology*, 68(6), 1146–1156. <https://doi.org/10.1111/ppa.13028>
- Gaitán, Á., Rivillas, C. A., Castro Caicedo, B. L., & Cristancho Ardila, M. A. (2013). Manejo integrado de enfermedades. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de*

- la caficultura* (Vol. 2, pp. 143–178). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_22
- Guevara-Suarez, M., Cárdenas, M., Jiménez, P., Afanador-Kafari, L., & Restrepo, S. (2022). *Colletotrichum* Species Complexes Associated with Crops in Northern South America: A Review. *Agronomy*, 12(3), 548. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030548>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2015). Resolución 3593. Por medio del cual se crea el mecanismo para establecer, mantener, actualizar y divulgar el listado de plagas reglamentadas de Colombia. <https://www.ica.gov.co/getattachment/a6a72675-e009-42f7-8c25-89b406e494d9/2015R3593.aspx>
- Li, Q., Bu, J., Shu, J., Yu, Z., Tang, L., Huang, S., Guo, T., Mo, J., Luo, S., Solangi, G. S., & Hsiang, T. (2019). *Colletotrichum* species associated with mango in southern China. *Scientific Reports*, 9(1), 18891. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54809-4>
- Oo, M. M., Yoon, H.-Y., Jang, H. A., & Oh, S.-K. (2018). Identification and Characterization of *Colletotrichum* Species Associated with Bitter Rot Disease of Apple in South Korea. *The Plant Pathology Journal*, 34(6), 480–489. https://doi.org/10.5423/PPJ_FT.10.2018.0201
- Raja, H. A., Miller, A. N., Pearce, C. J., & Oberlies, N. H. (2017). Fungal Identification Using Molecular Tools: A Primer for the Natural Products Research Community. *Journal of Natural Products*, 80(3), 756–770. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.6b01085>
- Riley, M., Williamson, M., & Maloy, O. (2002). Plant Disease Diagnosis. *Plant Health Instructor*, 02. <https://doi.org/10.1094/PHI-I-2002-1021-01>
- Serrato-Diaz, L. M., Mariño, Y. A., & Bayman, P. (2020). Pathogens Causing Anthracnose and Fruit Rots of Coffee Associated with the Coffee Berry Borer and the Entomopathogenic Fungus *Beauveria bassiana* in Puerto Rico. *Phytopathology*, 110(9), 1541–1552. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-20-0057-R>
- Talhinhas, P., & Baroncelli, R. (2021). *Colletotrichum* species and complexes: Geographic distribution, host range and conservation status. *Fungal Diversity*, 110(1), 109–198. <https://doi.org/10.1007/s13225-021-00491-9>
- Vieira, A., Silva, D. N., Várzea, V., Paulo, O. S., & Batista, D. (2019). Genome-Wide Signatures of Selection in *Colletotrichum kahawae* Reveal Candidate Genes Potentially Involved in Pathogenicity and Aggressiveness. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1374. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01374>
- White, T., Bruns, T., Lee, S., & Taylor, J. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. En M. A. Innis, D. Gelfand, J. Sninsky, & T. White (Eds.), *PCR protocols: A guide to methods and applications* (pp. 315–322). Academic Press.
- Zou, Y., Mason, M. G., Wang, Y., Wee, E., Turni, C., Blackall, P. J., Trau, M., & Botella, J. R. (2017). Nucleic acid purification from plants, animals and microbes in under 30 seconds. *PLOS Biology*, 15(11), e2003916. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003916>

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA
GERENCIA TÉCNICA
PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
Centro Nacional de Investigaciones de Café
“Pedro Uribe Mejía”

DIRECCIÓN

Álvaro León Gaitán B., Microbiólogo, Ph.D.
Diana Marcela Buitrago R., Lic. Biología y Química,
Administradora de Empresas, Esp.

DISCIPLINAS DE INVESTIGACIÓN

Agroclimatología

Juan Carlos García L., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Carolina Ramírez C., Ing. Agrícola, M.Sc.
Ninibeth Gibelli Sarmiento H., Ing. Agrícola, M.Sc.
Wílmar Antonio Rendón G., Tecnólogo en Sistemas
Informáticos
Jorge Wilmar Valencia G., Tecnólogo en Análisis y
Desarrollo de Sistemas de Información
Jorge Alejandro Builes P., Tecnólogo en Sistemas
Luis Gonzaga Henao R.
Jeison Alexander Hoyos G., Técnico en Informática

Biometría

Rubén Darío Medina R., Estadístico, M.Sc.
Luis Carlos Imbachí Q., Estadístico
Beatriz Eugenia Mira R., Estadístico

Calidad

Valentina Osorio P., Ing. Alimentos, Esp., Ph.D. en
Ingeniería
Jenny Paola Pabón U., Ing. Agrícola, M.Sc.
Claudia Patricia Gallego A., Bacterióloga, M.Sc.
Luz Fanny Echeverri G., Química Industrial
Claudia Rocío Gómez P., Tecnóloga Química
Paola Andrea Calderón T., Tecnóloga en Producción
Agropecuaria Ecológica
Wilson Vargas L.
Víctor Manuel Castañeda G.
María Lucila Cardona G., Pasante

Economía

Hugo Mauricio Salazar E., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Juan Carlos Gómez S., Contador, Ing. Agrónomo, M. Sc
Diego Fernando Arango C., Agrónomo

Entomología

Pablo Benavides M., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Zulma Nancy Gil P., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Marisol Giraldo J., Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.
Luis Miguel Constantino C., Biólogo, M.Sc.
Aníbal Arcila M., Ing. Agrónomo
Claudia Patricia Martínez D., Bacterióloga
Luis Eduardo Escobar S., Agrónomo
Diana Soraya Rodríguez A., Técnico en Producción de Café
Carlos Sebastián Quimbayo D., Biólogo
Carlos Alberto Quintero A.

Claudia Bibiana Tabares B.
Fáber de Los Ríos P.
José Robín García C.
Gloria Patricia Naranjo E.
Ramón Antonio Montoya C.
Paula Andrea Figueroa V., Pasante
David Mauricio Guzmán J., Pasante
Sergio Rodríguez A, Pasante

Fisiología Vegetal

Tatiana María Saldaña V., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Aristóteles Ortiz, Químico., M.Sc.
Carlos Andrés Unigarro M., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Natalia Catalina Flechas B., Bióloga
Marta Bibiana Escobar P., Tecnóloga Química
Claudia Patricia Valencia V., Técnico en Producción de Café
Mario Franco A.

Fitopatología

Marco Aurelio Crisnacho A., Microbiología, Ph.D.
Rosa Lilia Ferrucho, Ing. Agrónoma, Ph.D.
Gustavo Adolfo Marín R., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Carlos Alberto Zuluaga E., Técnico en Mantenimiento de
Computadores y Redes de Datos
José Didier Bermúdez G., Tecnólogo en Producción
Agropecuaria
Sergio Alejandro Valencia A., Tecnólogo en Gestión de
Empresas Agropecuarias
Yoni Alejandro González A. Técnico Producción de Cafés
Especiales
José Gilmar Carmona V.
Jesús David Ortiz M., Pasante
Lians An Yibeth González G., Aprendiz

Fitotecnia

José Raúl Rendón S., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Santiago Jaramillo C., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Andrés Felipe León B., Ing. Agrónomo
Alexander Jaramillo J.
Valentina Cruz O., Pasante

Mejoramiento Genético

Claudia Patricia Flórez R., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Diana María Molina V., Bacterióloga, Ph.D.
Carmenza E. Góngora B., Microbióloga, Ph.D.
Juan Carlos Arias S., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Julio Quiroga C., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Luisa Fernanda López M., Ing. Agrónomo
Carlos Augusto Ramírez C., Administrador de Empresas
Agropecuarias
Carlos Augusto Vera A., Administrador Financiero
Jairo Jaramillo O., Ing. Mecatrónica
Gilbert Rodríguez Q., Técnico Profesional en Desarrollo de
Producción Pecuaria
Jhon Esteban Quintero A., Técnico en Producción de Café

Juan Pablo Montoya T., Tecnólogo en Gestión de Empresas Agropecuarias
Steven Giraldo R., Tecnólogo en Gestión Administrativa
Sandra Patricia Velarde M., Tecnóloga en Procesamiento de Alimentos
Omar Villarreal
Diana Marcela Giraldo V.
Nicolás Duque S., Pasante

Poscosecha

Juan Rodrigo Sanz U., Ing. Mecánico, M.Sc., Ph.D.
Nelson Rodríguez V., Ing. Químico, Ph.D.
Aída Esther Peñuela M., Ing. Alimentos, M.Sc., Ph.D.
Álvaro Guerrero A., Ing. Electrónico/Electricista, M.Sc.
Eduardo Duque D., Ing. Mecánico, Ph.D. en Tecnologías Sostenibles
Laura Vanessa Quintero Y., Ing. Química, M.Sc.
Juan Carlos Vargas R., Arquitecto
Carol Vanessa Osorio V., Ing. de Alimentos*
Willy Fernando Rojas B. Ing. Agroindustrial*
Cristian Camilo Arboleda O., Biólogo
José Miguel Ospina T., Tecnólogo en Producción Agropecuaria Ecológica
Ricardo José Grisales M., Tecnólogo en Electrónica
Jorge Alexander Londoño C., Técnico en Soldadura
Juan Carlos Ortiz F.
Samuel Osbaldo López G.
Cristian David Rendón L.
Samuel Castañeda
Jaylith Melissa Valencia Q., Aprendiz
Camila Buitrago Z. Pasante
María Camila Quiroz S. Pasante
Ricardo López B., Pasante

Suelos

Siavosh Sadeghian K., Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.
Hernán González O., Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.
Luis Fernando Salazar G., Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.
Luz Adriana Lince S., Ing. Agrónomo, Geóloga, M.Sc.
Vanessa Catalina Díaz P., Química, M.Sc.
Diana Lisseth Manrique L., Química
Karen Daniela Murillo S., Técnico en Producción de Cafés Especiales
Eliana Gómez A., Tecnóloga Química
Juan Manuel Rendón R., Tecnólogo Químico
Jaroliver Cardona G.
Ange Camila Rodríguez R., Pasante
Jhon Alexis Henao C., Pasante

EXPERIMENTACIÓN

Carlos Gonzalo Mejía M., Administrador de Empresas Agropecuarias, M.Sc.
José Farid López D., Tecnólogo en Administración Agropecuaria
Alejandra Marcela Garcés G., Tecnóloga en Administración Agropecuaria
Luisa Fernanda García C., Tecnóloga en Gestión Administrativa

Estación Experimental Naranjal

Jhon Félix Trejos P., Ing. Agrónomo, M.Sc. en Sistemas de Producción Agropecuaria
Melsar Danilo Santamaría B., Ing. de Alimentos
Tito Alberto Ramírez S.
José Gerónimo Londoño L., Aprendiz

Estación Experimental El Rosario

León Darío Caicedo R., Agrónomo, Esp.

Estación Experimental El Tambo

Hernán Darío Menza F., Ing. Agrónomo, M.Sc.

Estación Experimental La Catalina

Héctor Flabio Álvarez A., Ing. Agrónomo

Estación Experimental La Trinidad

Myriam Cañón H., Ing. Agrónomo, M.Sc.

Estación Experimental Paraguaito

Daniel Antonio Franco C., Agrónomo

Estación Experimental Pueblo Bello

José Enrique Baute B., Ing. Agrónomo

Estación Experimental San Antonio

Carlos Roberto Ariza O., Ing. Agrónomo, Esp.

Divulgación y Transferencia

Sandra Milena Marín L., Ing. Agrónoma, Esp., M.Sc.
Carmenza Bacca R., Diseñador Visual
Óscar Jaime Loaiza E., Diseñador Visual
Luz Adriana Álvarez M., Diseñador Visual
Paula Andrea Salgado V., Administrador Financiero
Jair Montoya T., Administrador de Empresas, M.Sc.

Tecnología de la Información y Comunicaciones

Luis Ignacio Estrada H., Ing. Químico
Carlos Hernán Gallego Z., Ing. de Sistemas, Esp.
Juan Camilo Espinosa O., Ing. Topográfico, M.Sc.
Miguel Alfonso Castiblanco C., Bibliotecólogo/Ing. de Sistemas, Esp., M.Sc.
Elkin Marcelo Valencia L., Ing. de Sistemas, Esp.
Leonardo Adolfo Velásquez N., Ing. de Sistemas y Telecomunicaciones, Esp.
Kevin Adolfo Hincapié V., Ing. de Sistemas y Telecomunicaciones, Esp.
Andrés Felipe Ramírez M., Ing. de Sistemas y Telecomunicaciones, Esp.
Miguel Ángel Salamanca Q., Ingeniero de sistemas
Paula Andrea García M., Ingeniera Ambiental, Esp.
Jennifer Largacha M., Aprendiz

UNIDAD ADMINISTRATIVA Y FINANCIERA

Luz Miryam Corredor R., Administradora de Empresas, Contador Público, Esp.
Luz Adriana Jiménez Q., Técnico profesional en Contabilidad y Finanzas
Kelly Johanna Agudelo G., Administradora de Empresas
Ana María Giraldo B., Abogada
Nancy Elena Pérez M., Contador

Gestión Contable

Jorge Eduardo Dávila M., Contador Público, Esp.
Jesús Danilo González O., Contador, Esp.
Daniela López O., Contadora, Esp.

Gestión de Bienes y Servicios - Compras y Contratación

Ángela Jaramillo G., Prof. en Comercio Internacional, Esp.
Mauricio Loaiza M., Ing. Industrial
Lina María Giraldo, Administrador Financiero

Lina María Buitrago A., Administrador de Empresas
Santiago Benjumea V. Ing. Industrial
Camiló Ramírez M., Administración de Empresas
Luz Stella Duque C., Tecnóloga en Administración de Negocios
Jesús Alberto Vergara T., Técnico en Sistemas
Brahian Steven Narváez G., Tecnólogo en Contabilidad y Finanzas
Angie Paola Zapata C., Aprendiz

Gestión de Bienes y Servicios - Mantenimiento

Paulo Alejandro Arias C., Ing. Electricista, Esp.
María Alejandra López R., Ing. Mecatrónica, Esp.
Jonatan Gómez S., Ing. Electrónico
José Gildardo Aguirre O., Ing. Industrial
Robinson Guzmán G., Técnico Electricista
Jorge Hernán Marulanda E., Tecnólogo en Electrónica
Gabriel Hernando Ortiz C., Tecnólogo en Gestión Bancaria y Financiera
Oscar Alejandro Buitrago C., Tecnólogo en Electricidad Industrial
Jorge Antonio Arias A., Técnico en Producción de Café
Albert Johane Agudelo L., Tecnólogo en Electrónica– Técnico en Instalaciones de Redes Internas
Luis Fernando Pérez L., Técnico en Plantas Industriales
José Alexander Marín A., Técnico en Administración de la Producción de Café

Steven Saldarriaga V. Técnico en Informática
Freddy Alexander Sánchez O.
Uriel López P.
Fredy Hernán Osorio C.
Jhon Fredy Rojo G.
Ferney Cifuentes R.
Amy Buitrago S., Aprendiz
Eduardo Alfonso Ramírez G., Pasante

Gestión del Talento Humano

Érica Mayerly Galvis R., Trabajadora Social, Esp., M.Sc.
Elsa Natalia Quintero C., Profesional en Salud Ocupacional, M.Sc.
Germán Uriel Granada, Administrador de Empresas, Esp.
Luz Yaneth Guarín C., Tecnóloga en Administración de Negocios
Luisa Fernanda Murcia P., Pasante

Planeación Financiera y Presupuesto

Jesús Alberto Cardona L., Ing. Industrial, M.Sc., PMP®
Valentina Sepúlveda C., Ingeniera Industrial, Esp., PMP®
Lina Marcela Patiño G., Administradora de Empresas, Esp.
Leydi Tatiana Rincón R., Administración de Empresas, Esp.
Carolina Herrera A., Administración de Empresas, Esp.*

* Personal adscrito a la nómina variable del Comité de Huila, quienes desarrollan actividades de investigación y apoyo en los Proyectos de Regalías bajo el direccionamiento de Cenicafé.

Instructivo para la elaboración de los artículos de la Revista Cenicafé

TEXTOS

- Digite los textos, no los diagrame.
- Cuando cite la palabra Cenicafé, escriba la primera letra en mayúscula y las siguientes en minúsculas.
- Los nombres científicos se escriben en letra itálica o cursiva; la primera letra debe ir en mayúscula, ejemplo: *Beauveria bassiana*.
- Las palabras *et al.*, *in vitro* y cualquier otra locución latina se escriben en letra itálica o cursiva.
- El estilo de escritura debe ser absolutamente impersonal, en tiempo gramatical pasado, evitando la conjugación de verbos en primera o tercera persona del singular o el plural.
- Las ecuaciones deben nombrarse y enumerarse mediante el siguiente modelo matemático <>: A = R x K x S x L x C x P <1>.
- Si se emplean siglas y abreviaturas poco conocidas, se indicará su significado la primera vez que se mencionen en el texto y en las demás menciones bastará con la sigla o abreviatura.
- Evite al máximo el uso de nuevas siglas poco conocidas.

TABLAS Y FIGURAS

- Elabore las tablas en el formato de tabla de Word o de Excel.
- No las incluya en el documento como fotos o imágenes.
- Las cifras decimales sepárelas con una coma, no con punto.
- Las tablas deben titularse en la parte superior y al enunciarla en el texto, la palabra se debe escribir con la primera letra en mayúscula, ejemplo: Tabla 10.
- Las tablas deben crearse en blanco y negro.
- Como norma general, las figuras deben titularse en la parte inferior, y cuando enuncie la figura en el texto, la palabra se debe escribir con la primera letra en mayúscula, ejemplo: Figura 10.
- Las fotografías se deben tomar con el mayor tamaño (número de píxeles) y la mejor calidad (Fine) posibles, ya que esto asegura mejores impresiones de informes, pósteres o publicaciones.
- Las fotografías deben nombrarse con el autor y su descripción.
- Las tablas y figuras deben presentarse en archivos independientes y con numeración consecutiva (Tabla 1... Tabla n, Figura 1... Figura n, etc.).
- Los textos y tablas deben presentarse en el procesador de palabra Word.
- Las tablas y los diagramas de frecuencia (barras y torta) originales deben suministrarse en el archivo del manuscrito y también en su original de Excel.
- Otras figuras, como fotografías sobre papel y dibujos, se pueden enviar en originales o escanearlas y remitirlas en el formato digital de compresión JPG, preferiblemente con una resolución de 600 x 600 dpi (mínimo 300 dpi).

ECUACIONES

- Use una sola letra para denotar una variable y emplee subíndices para particularizar.
- Para las variables utilice letra itálica.
- El producto no se denota con *. Use solamente espacios.
- Las matrices y vectores se denotan con letra en negrilla e itálica.

SISTEMA DE UNIDADES

- En los productos de investigación a divulgar se utiliza exclusivamente el Sistema Métrico Decimal (SI), además de las unidades específicas de mayor uso por parte de la comunidad científica.

- Los puntos de multiplicación y los números superíndice negativos pueden ser usados solamente con unidades del SI (por ejemplo, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ y no m^3s^{-1} , que podría indicar milisegundos).
- No se debe interrumpir la notación de unidades del SI con símbolos que no corresponden a unidades del sistema internacional ni con palabras diferentes, porque las unidades son expresiones matemáticas. Reordene la frase apropiadamente, por ejemplo así:
 - El rendimiento en peso seco fue de $5\text{ g}\cdot\text{día}^{-1}$, y no $5\text{ g de peso seco}\cdot\text{día}^{-1}$
 - Se aplicaron $25\text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ del ingrediente activo, y no $25\text{ g i.a.}/\text{ha}$
 - Cada planta recibió $20\text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ de agua, y no $20\text{ g H}_2\text{O}/\text{ha}$ por planta
- Use la línea oblicua o *slash* (/) para conectar unidades del SI con unidades que no son del SI (por ejemplo: $10\text{ °C}/\text{h}$ ó $10\text{ L}/\text{materia}$).
- Nunca use el punto elevado (.) y el *slash* en la misma expresión. Si se hallan mezcladas unidades del SI con unidades que no son del SI, use primero el slash y luego la palabra 'por' en segundo término.
- Nunca utilice dos o más líneas oblicuas o *slashes* (/) o la palabra 'por' más que una vez en la misma frase, pues estos dos términos son equivalentes; por ejemplo en cepilladas/día por planta, redacte la frase así: cada planta fue cepillada dos veces al día. Para unidades totalmente verbales, use un slash, como en 3 flores/planta ó 10 frutos/rama.
- Use la misma abreviatura o símbolo para las formas en singular o plural de una unidad determinada (por ejemplo, 1 kg y 25 kg). Deje un espacio entre el valor numérico y el símbolo (por ejemplo, 35 g y no 35g). En una serie de medidas ponga la unidad al final (excepto para el signo de porcentaje) así: entre $14\text{ y }20\text{ °C}$ o hileras a 3, 6 y 9 m, pero 14%, 16% y 18%.
- En las publicaciones se emplea la coma (,) para separar decimales y el punto (.), para separar miles y millones.

BIBLIOGRAFÍA

Antes de enviar las propuestas de publicaciones tenga en cuenta que las citas deben estar ajustadas a las normas APA.

ESTRUCTURA DEL ARTÍCULO CIENTÍFICO

El artículo postulado para su publicación debe ser original o inédito, y de igual manera no puede estar postulado para su publicación en otras revistas.

Título - Máximo 16 palabras

- Que sea breve y preciso.
- Que identifique el aporte del estudio, es decir, hágalo interesante pero preciso.
- Si se incluye el nombre común o el binomial (científico) de una especie en el título, utilice uno de los dos pero nunca ambos.
- No prometa más de lo que va a entregar.
- Evite el uso de subtítulos.
- Evite abreviaturas, paréntesis, fórmulas, caracteres desconocidos.
- Nombre del (los) autor (es).
- Se debe incluir la profesión y demás títulos obtenidos.
- Si el autor o alguno de los autores ya no se encuentra trabajando en Cenicafé, se debe incluir la fecha de retiro (mes y año).
- Proveer una versión del título en inglés.

Resumen - Máximo 250 palabras

- El resumen debe señalar de manera concisa los objetivos, resultados y conclusiones del estudio.
- No debe contener referencias bibliográficas.
- Su contenido se debe entender sin tener que recurrir al texto, tablas y figuras.

- Al final del resumen deben incluirse de 3 a 6 palabras claves que describan los tópicos más importantes del trabajo, con el fin de facilitar la inclusión en los índices internacionales; las palabras claves no deben estar incluidas en el título.

Abstract - Máximo 250 palabras

Es la versión del resumen traducida al inglés. Debe ser preparado por el autor y debe incluirse.

Introducción - Máximo 1.000 palabras

Debe incluir:

- La naturaleza del problema, de manera concisa.
- El estado del problema (revisión de literatura).
- Solo deben citarse las referencias estrictamente pertinentes.
- No debe incluir datos, ni conclusiones del trabajo.
- El propósito de la investigación.

Materiales y métodos - Máximo 1.100 palabras

Debe escribirse de tal manera que un investigador con conocimiento del tema pueda repetirlo, que informe al lector cómo fue realizado el estudio y proporcione suficiente información para interpretarlo y evaluarlo. Esté seguro de no omitir información que pueda afectar la interpretación de los resultados, es decir:

- Describa las condiciones experimentales, precisa y concisamente.
- Los detalles del medio ambiente, especímenes, técnicas, materiales y equipos deben considerarse en esta sección del artículo.
- Haga énfasis en hechos que sean nuevos.
- No entre en detalle cuando se trate de métodos estandarizados de investigación.
- Use citas de literatura si son pertinentes.
- Si un método estándar ya publicado ha sido modificado, describa la naturaleza de los cambios.
- Describa los métodos en la secuencia que va a describir los resultados.
- La primera vez que mencione un nombre científico utilice el binomial con el clasificador, ejemplo: *Coffea arabica* L.; de allí en adelante sólo use el género abreviado y escriba la especie, ejemplo: *C. arabica*.
- Siempre use el tiempo pasado.
- Defina técnicamente las variables y cómo se obtienen.
- Describa el diseño experimental o soporte estadístico, de acuerdo con el tipo de investigación.
- Describa el análisis de la información.
- Describa los criterios de decisión.

Resultados y discusión – Máximo 2.500 palabras

En este capítulo se presentan los análisis y la interpretación de los datos obtenidos en la investigación, discutidos según los resultados anteriores. Como guías deben tenerse en cuenta las siguientes:

- Presente los datos en la secuencia abordada en la metodología.
- Use tablas o figuras (ilustraciones y gráficas).
- No repita los datos en distintas formas. O están en figuras o en las tablas o en el texto.
- Si el contenido total de la tabla puede ser descrito con claridad en el texto, no la presente. La tabla debe contener, al menos una medida de tendencia central, una medida de dispersión o intervalo de confianza, si requiere la prueba de comparación estadística. Al pie de la tabla indicar la prueba de comparación, con su nivel de significación y la descripción de las abreviaturas utilizadas en ella.
- Utilice la figura para ilustrar en forma rápida un resultado complejo.
- En el caso de ilustrar promedios, utilice los intervalos de confianza. No incluya en las figuras los datos de promedios ni las letras asociadas a la prueba de comparación.

- En una misma figura no incluya dos variables dependientes diferentes. Utilice correctamente el plano cartesiano.
- Las descripciones de figuras y tablas deben contener la información suficiente para entender los resultados descritos en ellas, sin tener que acudir al texto.
- El mensaje central debe ser suficientemente claro.
- Indique la aplicación de los resultados.
- Interprete los resultados.
- Discuta hechos controversiales con objetividad.
- Permítale al lector seguir su línea de pensamiento.
- Identifique resultados que abran nuevas posibilidades de estudio.
- No se sienta obligado a escribir una explicación positiva para cada faceta del estudio.
- Nunca utilice “se necesita hacer más trabajo...”
- No haga discusión trivial.

Agradecimientos - Máximo 70 palabras

Con esta sección se pretende abrir un espacio lo suficientemente notable para que se tengan en cuenta las personas que con sus aportes colaboraron a guiar o desarrollar las investigaciones o a redactar y revisar el manuscrito que se somete a consideración, y que de no existir una sección como ésta, el autor en ocasiones se ve forzado a considerarlas como coautoras del artículo. Además, debe incluir la fuente de financiación de la investigación que originó el artículo, como el código de la misma.

Literatura citada

- Se deben colocar en esta Sección sólo las referencias citadas. No más de 50 citas bibliográficas.
- La literatura se debe organizar en estricto orden alfabético.
- Las referencias deben citarse en el texto utilizando las normas APA.

PRODUCCIÓN EDITORIAL

Secretaría Técnica Comité Editorial,
revisión de textos y corrección de estilo: Sandra Milena Marín López, Ing. Agrónomo, Esp., M.Sc.

Diseño y diagramación: Luz Adriana Álvarez Monsalve, Diseñadora Visual

Fotografías: Archivo Cenicafé

Para canjes con esta publicación dirigirse a:
Centro de Documentación
Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé
Manizales - Caldas - Colombia
Biblioteca.Cenicafe@cafedecolombia.com



Cenicafé

Al servicio de los caficultores colombianos, desde 1938

www.cenicafe.org

La Revista Cenicafé se encuentra indizada y referenciada
en Google Académico.