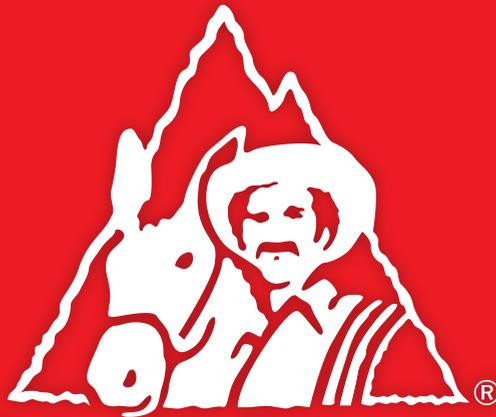


ISSN-0120-0275
ISSN-2711-3477 (En línea)
DOI-10.38141/10778

Cenicafé

Revista del
Centro Nacional de Investigaciones de Café



**Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia**

Volumen 76 Número 1

Enero - Junio 2025



**Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia**

COMITÉ NACIONAL

Ministro de Hacienda y Crédito Público
Germán Ávila Plazas

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Martha Viviana Carvajalino Villegas

Ministro de Comercio, Industria y Turismo (designada)
Diana Marcela Morales Rojas

Director del Departamento Nacional de Planeación
Natalia Irene Molina Posso

Asesor del Gobierno en Asuntos Cafeteros
Rogelio Andrés Rodríguez Castillo

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.cenicafe76-1>

Editada en junio de 2025

Tel: 606 + 8500707

E-mail: cenicafe@cafedecolombia.com

www.cenicafe.org

Cenicafé

Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café

Manizales - Caldas - Colombia

VOL. 76

ENERO - JUNIO 2025

No. 1

CONTENIDO

ANÁLISIS ECONÓMICO DE MÉTODOS DE RENOVACIÓN EN EL CULTIVO DE CAFÉ (ESTUDIO DE CASO). Hugo Mauricio Salazar Echeverry; José Raúl Rendón Saénz; Diego Fernando Arango Cardona 7

ECONOMIC ANALYSIS OF RENEWAL METHODS IN COFFEE GROWING (CASE STUDY) ... 7

CARACTERIZACIÓN DEL TIEMPO DE CONSERVACIÓN DE CAFÉ EXCELSO EMPACADO AL VACÍO EN DIFERENTES CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO. Valentina Osorio Pérez; Jenny Paola Pabón Usaquén; Claudia Patricia Gallego; Claudia Rocío Gómez Parra; Beatriz Eugenia Mira Rada 20

CHARACTERIZATION OF THE SHELF LIFE OF VACUUM-PACKED EXCELSO COFFEE UNDER DIFFERENT STORAGE CONDITIONS 20

DESCRIPCIÓN DE FACTORES PRODUCTIVOS Y DE PROCESAMIENTO EN FINCAS CON CALIDAD SOBRESALIENTE EN LA ZONA CENTRAL DE COLOMBIA. Jenny Paola Pabón Usaquén; Valentina Osorio Pérez; Claudia Patricia Gallego Agudelo 46

CHARACTERIZATION OF PRODUCTION AND PROCESSING FACTORS IN OUTSTANDING-QUALITY COFFEE FARMS IN CENTRAL COLOMBIA 46

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ASPERSIÓN Y EL CONTROL DE *Hypothenemus hampei* UTILIZANDO DRONES. Aníbal Arcila Moreno; Luis Carlos Imbachí Quinchua; Pablo Benavides Machado 71

EVALUATION OF SPRAY QUALITY AND CONTROL OF *Hypothenemus hampei* USING DRONES 71

EVALUACIÓN DEL GERMOPLASMA ETÍOPE COMO RECURSO PARA EL MEJORAMIENTO GENÉTICO DE *Coffea arabica* L. Juan Carlos Arias Suárez; Rubén Darío Medina Rivera 91

EVALUATION OF ETHIOPIAN GERMOPLASM AS A RESOURCE FOR THE GENETIC IMPROVEMENT OF *Coffea arabica* L. 91

PRODUCCIÓN Y CALIDAD FÍSICA DEL CAFÉ EN RESPUESTA AL SUMINISTRO DE FERTILIZANTES DE SÍNTESIS DE DIFERENTE TECNOLOGÍA. Hernán González Osorio; Siavosh Sadeghian Khalajabadi; Guido Hernán Franco; Víctor Hugo Ramirez B. 119

COFFEE YIELD AND QUALITY RESPONSE TO SYNTHETIC FERTILIZERS FROM DIFFERENT TECHNOLOGY 119

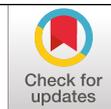
COMITÉ EDITORIAL

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

ANÁLISIS ECONÓMICO DE MÉTODOS DE RENOVACIÓN EN EL CULTIVO DE CAFÉ (ESTUDIO DE CASO)

Hugo Mauricio Salazar Echeverry *, José Raúl Rendón Saénz **, Diego Fernando Arango Cardona 

Salazar, H. M., Rendón, J. R., & Arango-Cardona, D. F. (2024). Análisis económico de métodos de renovación en el cultivo de café (estudio de caso). *Revista Cenicafé*, 76(1), e76101. <https://doi.org/10.38141/10778/76101>



El uso recurrente de podas pulmón y calavera ha despertado interés en caficultores que pretenden alcanzar mayores niveles de producción en un menor número de cosechas, situación que ha propiciado la alteración de los ciclos de renovación en las fincas, afectando la estabilidad de la producción y, por consiguiente, los ingresos de los productores, al desconocer las implicaciones económicas que se derivan de esas prácticas en el mediano y largo plazo. A partir de un estudio de caso se realizó un análisis económico a cuatro métodos de renovación del cultivo del café, basados en diferentes tipos de podas y momentos de intervención. Las podas evaluadas fueron zoca común en un ciclo de producción de cinco cosechas, poda pulmón con dos ciclos de producción de dos cosechas, poda calavera (dos ciclos de producción de dos cosechas) y safra cero (calavera), tres ciclos de una cosecha. Las parcelas con manejo comercial fueron intervenidas en la misma fecha desde 2017 hasta 2022, el manejo agronómico se basó en las recomendaciones técnicas generadas por Cenicafé. Los resultados evidenciaron que, pese a los mayores costos registrados, los ingresos obtenidos en el sistema de zoca común fueron superiores, explicados por un mayor número de cosechas en el mismo lapso de tiempo frente a los otros tipos de podas que registraron más períodos improductivos por la dinámica de las renovaciones, así mismo la zoca común tuvo una menor proporción de sitios perdidos e improductivos.

Palabras clave: Análisis económico, *Coffea arabica*, podas, producción, Colombia, Cenicafé.

ECONOMIC ANALYSIS OF RENEWAL METHODS IN COFFEE GROWING (CASE STUDY)

The recurrent use of lung and skeleton pruning has sparked interest among coffee growers seeking higher production levels in fewer harvests. This situation has led to the alteration of renewal cycles on farms, affecting the stability of production and, consequently, the producers' income by not knowing the economic implications of these practices in the medium and long term. Based on a case study, an economic analysis was carried out on four methods of coffee crop renewal based on different types of pruning and intervention times. The pruning evaluated was renewal by stumping in a production cycle of five harvests, lung pruning with two production cycles of two harvests, skeleton pruning (two production cycles of two harvests), and zero safra (skull), three cycles of one harvest. The commercially managed plots were intervened on the same date from 2017 to 2022; the agronomic management was based on the technical recommendations generated by Cenicafé. The results showed that, despite the higher costs recorded, the income obtained in the renewal by the stumping system was higher, explained by a greater number of harvests in the same period than other types of pruning that recorded more unproductive periods due to the dynamics of the renewals. Likewise, the renewal by stumping had a lower proportion of lost and unproductive sites.

Keywords: *Coffea arabica*, economic analysis, production, pruning, Colombia, Cenicafé.

* Investigador Científico II y Asistente de Investigación. Disciplina de Economía, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0001-7812-7595>, <https://orcid.org/0000-0003-0594-728X>

** Investigador Científico I. Disciplina de Fitotecnia, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-5676-4670>



Prever y planear la duración de los ciclos de renovación, así como determinar la estructura de edades de las plantaciones, resulta fundamental para incrementar la productividad de las fincas cafeteras, favoreciendo la rentabilidad de la actividad (Duque-Orrago et al., 2021).

En sistemas de producción de café establecidos con variedades de porte alto o de porte bajo, indistintamente de la densidad de siembra, a libre exposición solar o en sistemas agroforestales, a libre crecimiento o con descope, y con diferente número de tallos por sitio, existe un número de cosechas con las cuales se consigue el máximo promedio de producción, aun considerando el período de crecimiento vegetativo, situación que determina el número óptimo de años de un ciclo (Arcila et al., 2007).

En sistemas de manejo, regularmente con ciclos de cuatro o cinco cosechas, el cultivo de café debe intervenir aplicando algún tipo de poda para mantener su potencial productivo estable a través del tiempo, procurando lotes de diferentes edades en proporciones similares, de tal manera que el área improductiva no supere el 20% (Araque y Duque, 2019; Mestre y Ospina, 1994).

Al aplicar el concepto de elasticidad de la producción para datos experimentales, se estimó la duración óptima del ciclo en función de la productividad y se encontró que a los cinco años se llegaba al máximo para una densidad de 10.000 árboles por hectárea, seis años para 5.000 árboles por hectárea y siete años para 2.500 árboles/ha. La densidad de siembra condiciona el momento específico en el que se alcanza el punto máximo de producción promedio del cultivo; a partir de ese momento, aumentar la edad de la plantación tendrá efectos negativos en la producción e incrementos en los costos (Duque-Orrago et al., 2021).

Los sistemas de renovación más utilizados en la poda sistemática por lotes, son descritos por Arcila et al., (2007): 1) Zoca común o convencional, consiste en eliminar la parte aérea de la planta mediante el corte del tallo a 30 cm del suelo; 2) Poda pulmón, se fundamenta en un corte del tallo que se realiza a 60 cm de altura y se conservan las ramas bajas completas o despuntadas; 3) Poda o zoca calavera, con esta intervención se eliminan total o parcialmente las ramas primarias del tallo principal, permitiendo la generación de brotes ortotrópicos.

Métodos de renovación basados en podas diferentes a la zoca convencional o común han permitido en diferentes localidades de Colombia obtener altas productividades, en ciclos de dos cosechas, y pueden constituir alternativas para organizar edades de las plantaciones y contribuir a estabilizar la producción, no obstante, debe restringirse su uso para establecer sistemas de renovación en el largo plazo (Rendón y Salazar, 2023). La zoca común permite mantener ciclos de renovación de cuatro y cinco cosechas, es decir, con un mayor número de años productivos sin realizar intervenciones en el cultivo (Rendón, 2016).

En Brasil ha sido adoptado como sistema de renovación la "safra zero" que consiste en realizar una poda de altura (descope) y una poda a las ramas laterales, con longitudes variables en el corte, desde 20 hasta 50 cm. La finalidad de esta práctica es mantener el porte de la labranza y reducir costos de recolección en años de baja producción como efecto de la bienalidad; para ello, el cultivo se renueva cada dos años, al cabo de la primera cosecha permitiendo crecimiento vegetativo en el primer año y fructificación en el año siguiente, cuando será nuevamente podado (García et al., 2012; Matiello et al., 2007).

Japiassú et al. (2010) estudiaron diferentes tipos de poda recomendados para safra cero en variedades de porte alto y porte bajo; así mismo evaluaron en safra cero intervenida cada dos años (una cosecha), tres dosis de fertilización nitrogenada después de la poda. Los resultados obtenidos no mostraron aumento en rendimiento de los diferentes tratamientos respecto al testigo sin poda.

En ese mismo sentido, García et al., (2012) al evaluar diferentes duraciones del ciclo de renovación utilizando el sistema safra cero en la variedad Mundo Novo (IAC 376/4), encontraron que el testigo sin poda obtuvo el mayor promedio de producción, seguido de la safra cero cada cuatro años (tres cosechas) y el menor promedio lo registró la safra cero realizada al cabo de dos años y una cosecha.

Alterar la duración del ciclo utilizando de manera recurrente las podas pulmón y calavera, sin considerar todos los elementos del sistema de producción puede llevar al caficultor a incurrir en ineficiencias en la asignación de recursos, comprometiendo la productividad y rentabilidad de su predio (Salazar et al., 2023). Es necesario entonces, conocer las implicaciones desde el punto de vista económico que tiene la implementación de ciclos de renovación con duraciones variables en el tiempo, basadas en podas pulmón y calavera.

Los presupuestos parciales constituyen una técnica útil para analizar una práctica de manejo o intervención como son las podas de cafetales; de tal manera que, en los presupuestos parciales, insumos, herramientas, mano de obra y sus costos, así como los ingresos por la producción lograda se asocian únicamente con las prácticas que se evalúan (Ávalos y Villalobos, 2018). Este método es sugerido y utilizado para medir los efectos positivos y negativos de un cambio técnico propuesto

en una práctica a nivel de finca (Bharati & Gupta, 2018).

El análisis marginal como técnica, es usado para comparar el costo de un insumo con el valor de un producto a precios del mercado, con el fin de determinar el adecuado nivel de insumo a utilizar (Berger, 2011). El análisis marginal es una herramienta conceptualmente simple y útil para tomar cualquier tipo de decisión que involucre costos e ingresos. Es el proceso de considerar pequeños cambios en una decisión para determinar si el cambio propuesto mejorará o no el ejercicio económico del sistema productivo.

El objetivo del estudio fue realizar un análisis económico a cuatro sistemas de renovación del cultivo de café, basados en diferentes tipos de podas y momentos de intervención.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación. El trabajo se llevó a cabo en la granja El Agrado, en Montenegro, Quindío (4° 31' N y 75° 48' W), con altitud de 1.275 m, precipitación histórica promedio de 2.110 mm año⁻¹, temperatura media de 21,75°C y suelos derivados de ceniza volcánica de la unidad cartográfica Montenegro. Para la evaluación se seleccionó un lote de *Coffea arabica* L. variedad Castillo® sembrado en el año 2006 con un arreglo espacial de 1,2 m x 2,0 m, densidad de 4.166 plantas/ha, y que después de cumplir su primer ciclo de cuatro cosechas, a partir de 2011, se intervino de manera recurrente con podas pulmón.

Estudio de caso. El lote se dividió en cuatro parcelas de tamaño semicomercial (3.000 m²), con 1.200 árboles cada una, a las que se asignó aleatoriamente un método de renovación diferente (Tabla 1): (I) zoca común con corte del tallo a 30 cm, para un

ciclo de cinco cosechas; (II) poda pulmón con corte del tallo a 60 cm y despunte de ramas a 40 cm, ciclo de dos cosechas; (III) poda calavera con descope a 180 cm y despunte de ramas entre 5 y 10 cm, ciclo de dos cosechas; y (IV) safra cero con descope a 180 cm y despunte de ramas entre 5 y 10 cm, ciclo de una cosecha.

Tabla 1. Sistemas de renovación evaluados.

Sistema	Descripción
1	Zoca común o convencional (30 cm)
2	Poda pulmón
3	Poda calavera
4	Safra cero (Poda calavera a una cosecha)

La renovación de las cuatro parcelas se realizó en la misma fecha (febrero de 2017), el estudio se proyectó para un ciclo de cultivo de cinco cosechas de la zoca común, previendo alcanzar dos ciclos de las podas pulmón y calavera en el mismo horizonte de tiempo. La duración fue de 69 meses, a partir de la renovación inicial en febrero de 2017, hasta diciembre de 2022 como fecha de finalización de la quinta cosecha de la zoca común, cuarta cosecha de las podas pulmón y calavera, y tercera cosecha de la safra cero.

El manejo agronómico se realizó de la misma manera para todas las parcelas, la diferencia radicó únicamente en el tipo de poda practicada a cada sistema de renovación descrito en la Tabla 1, las labores agronómicas se realizaron conforme a las recomendaciones técnicas generadas por Cenicafé (2021), en aspectos relacionados con prácticas de renovación, selección de brotes (chupones), resiembras, manejo integrado de arvenses, fertilización, manejo integrado de broca, entre otras.

Registro de información

Costos de producción

Mano de obra. Para cada método de renovación se registraron durante la realización de la evaluación los valores de mano de obra, es decir, los jornales (jornadas de trabajo empleadas en cada labor) y su costo, empleados en las diferentes labores del cultivo: resiembras, plateos, fertilizaciones, manejo de plagas y enfermedades, manejo integrado de arvenses, recolección y beneficio.

Insumos. Se registraron las cantidades de insumos y su costo, empleados en las diferentes etapas del cultivo, por ejemplo: fertilizantes, enmiendas, fungicidas, insecticidas, herbicidas.

Variables de ingreso

Producción de café. Se registró la producción acumulada en kilogramos de frutos de café que se obtuvo en 84 pases de recolección, expresada posteriormente en arrobas de café pergamino seco (@ de cps; una arroba = 12,5 kg), de acuerdo al factor de conversión para cada método de renovación. Así mismo, se registró el precio de venta del café como variable de ingreso, pesos por arroba de café pergamino seco (\$/@ cps).

Indicadores de productividad. Partiendo de las variables registradas en los costos y los ingresos, se definieron indicadores de productividad de la tierra (@ ha⁻¹ de cps), como factor de producción, igualmente para la productividad de la mano de obra en labores del cultivo, el costo de producción por hectárea en cada sistema y el costo por arroba de café pergamino seco (costo unitario de producción, \$/@cps), considerado indicador de productividad total.

Análisis económico

Viabilidad económica de los sistemas. Cada sistema al final del ciclo se evaluó utilizando el método de presupuestos parciales y el análisis marginal (Ávalos y Villalobos, 2018; Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, 1988), para ello se consideró la diferencia entre el flujo de ingresos y el flujo de costos variables, estableciendo el margen bruto y de esta manera comparar los diferentes métodos de renovación.

Para evaluar la eficiencia del uso de nutrientes (EUN) de los fertilizantes aplicados se estimó la productividad parcial de los factores (PPF) que se calcula como el rendimiento del cultivo (kg) por unidad de nutriente aplicado (kg), para cada método de renovación <Ecuación 1> (Rawal et al., 2022; Ray et al., 2018).

$$PPF (kg kg^{-1}) = \frac{\text{Productividad del cultivo (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Cantidad (kg ha}^{-1}\text{) de nutriente aplicado}} <1>$$

Los análisis económicos se realizaron a pesos constantes deflactando los precios con el índice base (2018) publicado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) a junio de 2024. El análisis abordó los costos variables en la producción

de café, no se consideraron costos fijos como impuestos, costos administrativos y financieros.

Finalmente, tanto los costos como los ingresos derivados del ejercicio se llevaron a hectárea para contribuir a una mejor comprensión de los resultados.

Para realizar los análisis económicos de los sistemas de renovación se partió de los datos básicos descritos en la Tabla 2.

Los datos básicos se construyeron con el registro de la información real de mano de obra empleada en las labores del cultivo, cantidades y precios de insumos, costo de recolección unitario y precio de venta del café.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Costo de las labores de renovación

Los costos asociados a la labor de renovación inicial de los lotes se presentan en la Tabla 3, comprenden todas las actividades necesarias para intervenir los lotes y gestionar los residuos vegetales resultantes de las podas.

El sistema que presentó mayores costos fue el de zoca común, la zoca pulmón en segundo lugar con 31% menos costos, mientras

Tabla 2. Datos básicos para el análisis económico de los sistemas de renovación.

Variable	Unidad	Valor	Observación
Mano de obra	Jornal	\$50.000	Zona central cafetera
Insumos agrícolas	Precio	\$/unidad	Precios insumos DANE, febrero 2017–noviembre 2022
Precio de venta	\$/@cps	\$140.256	Precio promedio enero 2018-diciembre 2022
Costo recolección	\$/kg/cc	\$822	Promedio enero 2018-diciembre 2022

que en las parcelas intervenidas con poda calavera y safra cero se reflejaron costos en la renovación inferiores en un 38% frente a los costos de la renovación por zoca común.

Tabla 3. Costos de las labores de renovación por hectárea.

Sistema	Costo \$
Zoca común o convencional (30 cm)	\$3.695.205
Poda pulmón	\$2.535.275
Poda calavera	\$2.286.719
Safra cero	\$2.286.719

Costo de la etapa de levante para cada sistema de renovación

Los costos de las diferentes labores agronómicas durante los primeros 12 a 18 meses de edad de la plantación se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Costos del levante para cada sistema de renovación evaluado.

Sistema	Costo \$/ha
Zoca común o convencional (30 cm)	\$14.276.264
Poda pulmón	\$10.961.923
Poda calavera	\$9.547.520
Safra cero	\$9.347.864

Las diferencias encontradas en los costos de levante (etapa improductiva del cultivo posterior a la renovación, en la que prima el crecimiento vegetativo de la planta) para los sistemas de renovación obedecen

principalmente a labores como manejo integrado de arvenses, control de plagas como broca (en la poda pulmón debido a los frutos presentes en las ramas del tercio inferior que se conservan después de la intervención de renovación), cochinillas y labores agronómicas como las deschuponadas (eliminación de brotes ortotrópicos o chupones). La principal diferencia en la estructura de costos se refleja en el manejo de arvenses que para el caso de la zoca común representa el 56% de los costos de la etapa de levante, mientras que para los otros sistemas de renovación este rubro representó entre el 45% y el 48% de los costos en los primeros 18 meses del cultivo.

En la parcela establecida con la zoca convencional, fue necesario el control de arvenses con mayor frecuencia que en los demás tipos de podas que rápidamente cerraron las calles y redujeron la interferencia generada por las arvenses.

Durante la duración del estudio (febrero 2017 – diciembre 2022), el sistema de safra cero registró tres cosechas y tres periodos improductivos; las podas pulmón y calavera tuvieron cuatro cosechas y dos periodos improductivos, mientras la zoca convencional presentó cinco cosechas y un período improductivo (Figura 1). En ese sentido, es importante resaltar que los costos de renovación y levante señalados en las Tablas 3 y 4 se registraron en cada método de renovación con la misma frecuencia de los periodos improductivos.

En la Figura 1 puede apreciarse que la producción acumulada fue superior para el sistema de zoca común al registrar cinco cosechas en el período evaluado, no obstante, la densidad de siembra inferior a 5.000 árboles por hectárea (4.166 árboles/hectárea), condicionó el rendimiento; a mayor

población de árboles de café por hectárea se alcanzan productividades mayores (Araque y Duque, 2019). Unigarro et al., (2021) plantean que, al incrementar la densidad de siembra en rangos adecuados se optimiza la captura de luz, dado el incremento del índice de área foliar (IAF) y, por lo tanto, se incrementa la capacidad fotosintética del cultivo de café.

El sistema de poda calavera presentó 23% menos de producción con el acumulado de las cuatro cosechas de los dos ciclos; la poda pulmón con dinámica similar a la poda calavera, tuvo una producción acumulada 37% inferior al sistema de zoca; el denominado sistema de safra cero con dos cosechas, reportó una producción acumulada inferior en 58% respecto al referente de zoca convencional. La renovación por zoca tiene ventajas de

carácter económico, registra menos costos que la renovación por siembra y en el tiempo, confiere menos años improductivos y menor agotamiento de la planta que sistemas de podas como la calavera o pulmón (Duque-Orrego et al., 2021; Rendón, 2016).

Las podas pulmón y calavera recurrentes propiciaron un mayor porcentaje de sitios faltantes (Figura 2) comprometiendo el potencial productivo del cultivo; adicionalmente, las podas por su rápido crecimiento vegetativo no permiten recuperar los árboles perdidos por medio de resiembras, labor que garantiza mantener la densidad de siembra del cultivo, recupera los sitios que perdieron árboles, mitiga las pérdidas en productividad y retribuye la inversión (Rendón y Salazar 2023; Rendón y Duque, 2018; Unigarro et al., 2021).

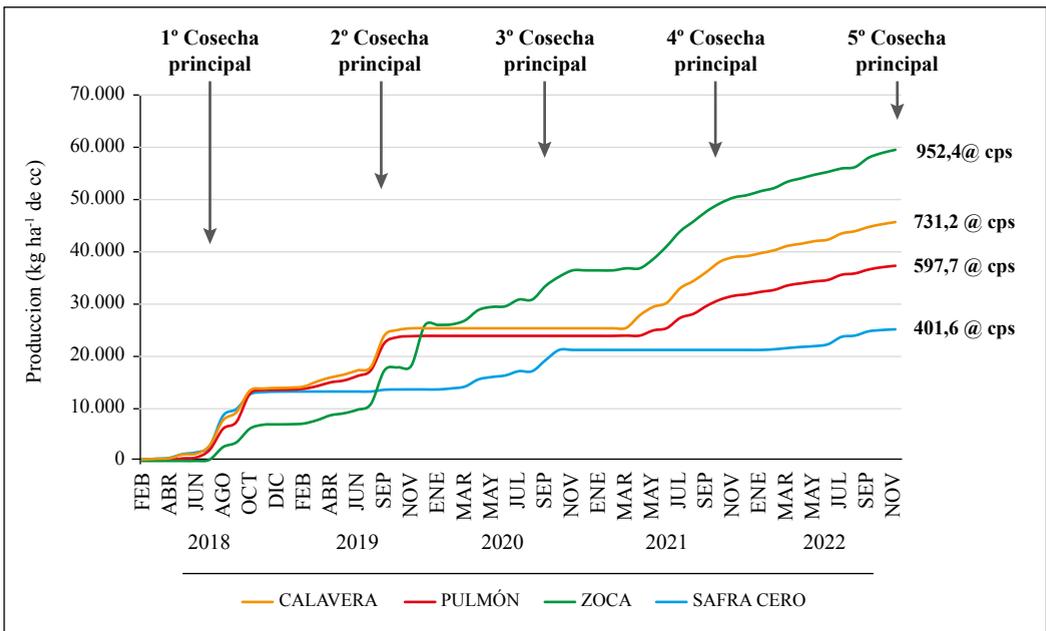


Figura 1. Registro de la producción acumulada de frutos de café cereza (cc) en los sistemas de renovación, hasta el mes 69.

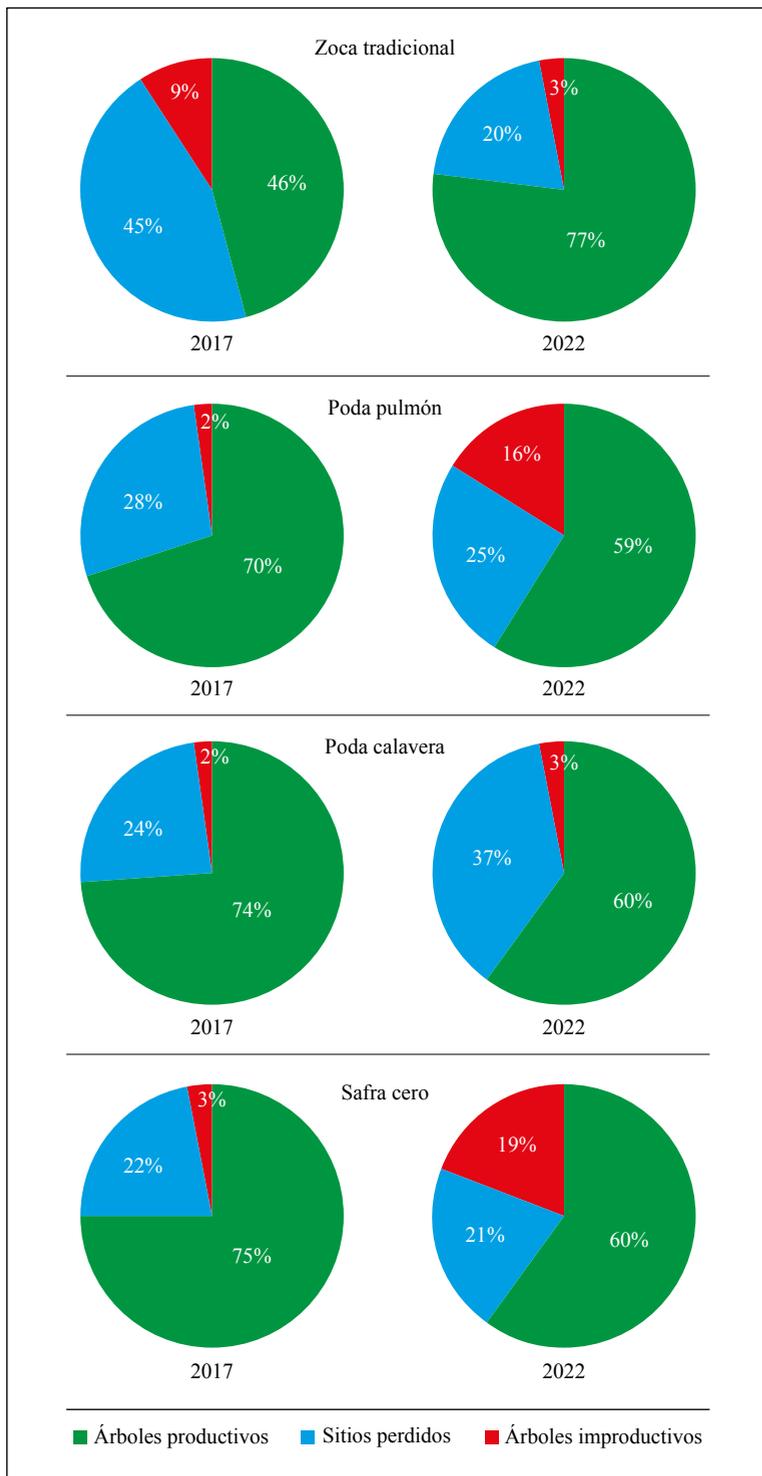


Figura 2. Evolución de sitios perdidos para los diferentes sistemas de renovación durante el ciclo de producción analizado.

Costos variables de los sistemas de renovación

A través del método de presupuestos parciales (Ávalos y Villalobos, 2018; Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, 1988) se calcularon los costos variables y los beneficios netos obtenidos al final del ciclo de producción en los lotes intervenidos con los diferentes tipos de renovación, la Tabla 5 presenta el resultado de ese ejercicio. La comparación entre los costos acumulados incurridos en cada sistema de renovación mostró que, la zoca común tuvo costos mayores, seguida por la poda calavera y la poda pulmón, con costos inferiores en 14% y 21%, respectivamente; las diferencias en costos se debieron además de las labores de renovación y agronómicas de la etapa improductiva, a las actividades de recolección y poscosecha de una mayor cantidad acumulada de café cereza producido.

Los ingresos registrados por la venta de café en el sistema de zoca a 30 cm fueron superiores en 23% sobre el sistema de poda calavera, 37% comparado con la poda pulmón y 58% frente a safra cero; las diferencias pueden ser explicadas por el mayor número de años productivos que presentó en el ciclo el sistema de zoca y, por consiguiente, mayor producción acumulada, frente a los otros métodos de renovación que registraron menos años productivos en el mismo período de tiempo, coincidiendo con el comportamiento descrito por Rendón (2016), quien además advirtió que por el mayor desarrollo de los árboles manejados con las podas pulmón y calavera, el agotamiento de las plantas se presenta de manera anticipada al cabo de dos cosechas, obligando a una nueva intervención para renovar el lote.

Tabla 5. Presupuesto parcial, costos variables entre los sistemas de renovación.

Concepto	Tipo de poda			
	Safra cero	Calavera	Pulmón	Zoca
Rendimiento acumulado arrobas/cps/ha	401,6	731,2	597,7	952,4
Ingresos brutos (\$/ha)	\$ 56.321.124	\$ 102.556.494	\$ 83.832.125	\$ 133.580.571
Costo insumos (\$/ha)	\$ 14.345.351	\$ 18.394.688	\$ 15.476.659	\$ 16.931.599
Costo mano de obra labores agronómicas (\$/ha)	\$ 33.660.750	\$ 36.317.880	\$ 38.341.825	\$ 40.973.682
Costo recolección (\$/ha)	\$ 20.630.174	\$ 37.565.981	\$ 30.707.329	\$ 48.929.960
Costo poscosecha (\$/ha)	\$ 2.128.271	\$ 3.875.420	\$ 3.167.861	\$ 5.047.762
Total costos (\$/ha)	\$ 70.764.546	\$ 96.153.969	\$ 87.693.673	\$ 111.883.003
Ingresos netos (\$/ha)	-\$ 14.443.422	\$ 6.402.525	-\$ 3.861.549	\$ 21.697.568
Margen bruto (\$/@cps)	-\$ 35.968	\$ 8.756	-\$ 6.461	\$ 22.782

Las labores de renovación y labores agronómicas representaron el 68% y el 61% de los costos para los sistemas establecidos con las podas safra cero y pulmón, respectivamente; al tiempo que la asignación de recursos en labores de recolección y poscosecha fue superior para los lotes intervenidos con zoca (48%) y poda calavera (43%), explicada por la mayor productividad registrada en estos dos sistemas que a su vez obtuvieron mayores ingresos por la venta de café pergamino seco. Salazar et al., (2023) reportaron que caficultores eficientes en la asignación de recursos lograban eficiencias económicas y mayores productividades.

El análisis de los costos variables acumulados por hectárea mostró que los dos lotes intervenidos con safra cero y poda pulmón resultaron dominados, en términos de beneficios económicos, por la poda calavera y el lote con zoca común, pues un incremento

en los costos variables cuando se emplearon los primeros no condujo a un incremento en el margen bruto y por el contrario este fue negativo al final del ciclo evaluado (Figura 3).

Los tipos de intervención que presentaron márgenes brutos positivos fueron la zoca común y la poda calavera; al considerarlos de menor a mayor, de acuerdo con los costos variables, se obtuvieron los incrementos en costos y beneficios de realizar la zoca convencional en lugar de la poda calavera, la razón entre estos incrementos dio como resultado la tasa de retorno marginal (0,97) que indica el porcentaje de retorno en términos de utilidad que puede obtenerse por cada peso (COP) en que se incrementan los costos por decidir el cambio de poda calavera a zoca 30; por cada peso invertido en realizar la zoca 30 en lugar de la poda calavera, se recupera el peso invertido y obtienen \$0,97 adicionales.

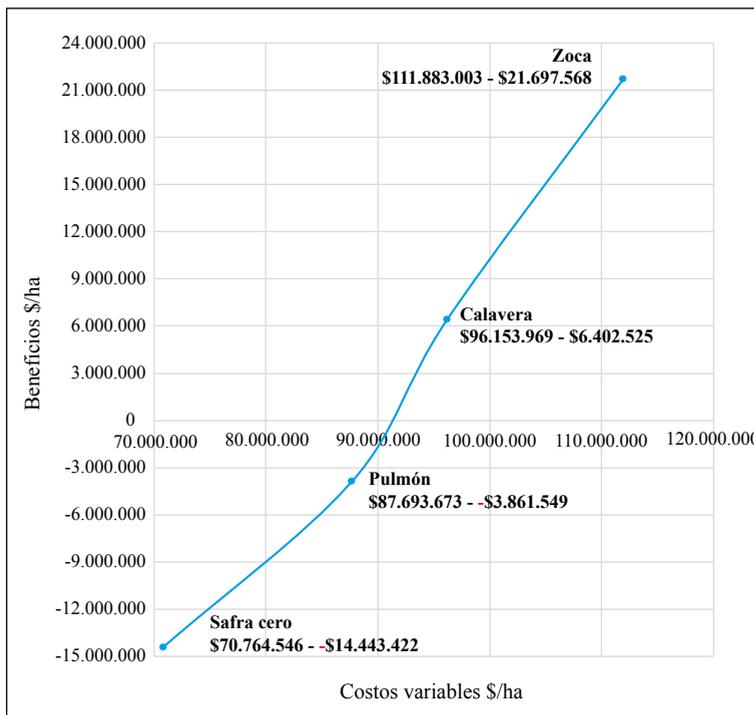


Figura 3. Curva de beneficios netos para los sistemas de producción intervenidos con podas.

Productividad parcial de los factores

La productividad parcial de los factores (PPF), que se expresa como el rendimiento del cultivo por unidad de nutriente proporcionado, es una técnica que compara las ventajas económicas de la fertilización (Belete et al., 2018; Fixen et al., 2015). Las diferencias en la PPF promedio entre los tipos de renovación estudiados se basaron en el potencial productivo, que en este caso fue consecuencia del número de años improductivos (períodos de levante), el número de árboles perdidos y el número de árboles sin registro de producción (Rendón et al., 2023).

La PPF en los cuatro tipos de renovación estuvo en el rango de 15,7-31,5 kg kg⁻¹ de N; 98,0-196,9 kg kg⁻¹ de P y 16,3-32,8 kg kg⁻¹ de K; tomando como referente la zoca convencional, la PPF de la safra cero fue del 50%, la poda pulmón alcanzó una PPF de 69% y la poda calavera 71%, es decir, registraron ineficiencias técnicas en el uso del fertilizante de 50%, 31% y 29%, respectivamente, frente a la zoca.

Una comparación de los valores de PPF_N, PPF_P y PPF_K (31,5; 202 y 61 kg de frutos de café por kilogramo de nutriente suministrado, respectivamente) registrados por el programa de semilla de variedades mejoradas de Cenicafé en las Estaciones Experimentales durante 2023, con los valores de zoca obtenidos en el estudio, mostró que PPF_N fue igual (31,5), PPF_P con 196,9 fue apenas 2,6% inferior, no obstante, el valor de PPF_K (32,8) representó el 54% del valor obtenido en los campos de semilla.

En términos generales, la PPF presentó una ineficiencia del 14% explicada principalmente por la densidad de siembra de 4.166 árboles/ha; el aumento de las tasas de fertilizante reduce la eficiencia del uso de nutrientes porque el rendimiento aumenta más lentamente que

la cantidad de nutriente (K) aplicado en el suelo. Sadeghian y Duque (2018) recomiendan ajustar la dosis de fertilizante en función de la densidad de siembra con el fin de optimizar el uso del fertilizante, que es determinante en la productividad de la cafcultura.

Puede concluirse que:

- El método de renovación por zoca común registró mayores costos acumulados, igualmente ingresos superiores a los obtenidos en los otros tipos de podas, debido a que presentó un único período improductivo y un mayor número de cosechas en el mismo lapso de tiempo, así mismo tuvo una menor proporción de sitios perdidos e improductivos.
- El menor costo en las labores de renovación y de levante lo presentó la poda calavera, seguida por la safra cero y la poda pulmón, no obstante, al registrar mayor número de años improductivos los costos acumulados superaron los registrados por la zoca común.
- Los sitios perdidos y los árboles improductivos en los sistemas de podas pulmón y calavera representaron en promedio el 39% debido a podas recurrentes que aceleraron el agotamiento de los árboles y limitaron la posibilidad de realizar resiembras.
- Los tipos de intervención que presentaron márgenes brutos positivos fueron la zoca común y la poda calavera; los costos variables fueron superiores en la zoca debido a mayores costos de recolección que a su vez explican mayores ingresos para este método de renovación.
- El análisis marginal mostró que los menores ingresos (beneficios) se registraron en la safra cero y la poda pulmón con márgenes

brutos negativos, por lo tanto, fueron alternativas que resultaron dominadas por la poda calavera y la zoca convencional.

- La tasa de retorno marginal (0,97) al comparar los resultados económicos de la poda calavera y la zoca, indica el porcentaje de retorno en términos de utilidad que puede obtenerse por cada peso (COP) en que se incrementan los costos por decidir el cambio de poda calavera a zoca común; por cada peso invertido en la zoca común en lugar de la poda calavera, se recupera el peso invertido y obtienen \$0,97 adicionales.
- La productividad parcial de los factores (PPF), expresada en el rendimiento del cultivo por unidad de nutriente proporcionado en la fertilización, evidenció ineficiencias técnicas entre el 29% y el 50% de los tres tipos de poda en el uso del fertilizante frente a la zoca.
- La densidad de siembra (4.166 árboles/ha) con la que se estableció originalmente el sistema de producción comprometió la expresión en productividad de los tipos de renovación evaluados, confirmando la necesidad de establecer densidades de

siembra superiores a 5.000 árboles/ha que permitan el desempeño de la empresa cafetera con eficiencia económica.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero John Jairo Giraldo P. Coordinador de Programa de Investigación Participativa del Comité de Cafeteros del Quindío por el acompañamiento y compromiso en el proyecto y al Comité de Cafeteros del Quindío por facilitar las instalaciones de la Granja El Agrado y los recursos para el manejo agronómico del cultivo. Esta investigación fue financiada con recursos del Comité de Cafeteros del Quindío y el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), proyecto ECO102004.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, Metodología: **HMSE**. Análisis formal: **HMSE, JRRS, DFAC**. Curación de datos: **HMSE, DFAC**. Investigación: **HMSE, JRRS, DFAC**. Redacción–borrador original: **HMSE**. Redacción–revisión y edición: **HMSE, JRRS, DFAC**. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

LITERATURA CITADA

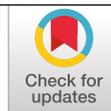
- Araque Salazar, H., & Duque, H. (2019). Variables agronómicas determinantes de la productividad del cultivo de café en fincas del departamento de Caldas. *Revista Cenicafé*, 70(1), 81–92. <https://doi.org/10.38141/10778/70106>
- Arcila, J., Farfán, F.F., Moreno, A. M., Salazar, L.F., & Hincapié, E. (Eds.), *Sistemas de producción de café en Colombia*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/720>
- Ávalos-Cerdas, J. M., & Villalobos-Monge, A. (2018). Análisis económico: Un estudio de caso en *Jatropha curcas* L. mediante la metodología de presupuestos parciales. *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), 95. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.27901>
- Bharati, T., & Gupta, K. (2018). Job Stress and Productivity: A Conceptual Framework. *International Journal of Emerging Research in Management and Technology*, 6(8), 393–399.
- Belete, F., Dechassa, N., Molla, A., & Tana, T. (2018). Effect of split application of different N rates on productivity and nitrogen use efficiency of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agriculture & Food Security*, 7(1), 92. <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0242-9>
- Berger, A. (2011, November 29- December 1). Calculating Unit Costs of Production and Using the Information for Enterprise Analysis and Decision Making on the Ranch. *Proceedings of Range Beef Cow Symposium*

- XXII. Mitchell, Nebraska. <https://digitalcommons.unl.edu/rangebeefcowsymp/282/>
- 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 Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (1988). *La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos*. CIMMYT.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (s/f). *IPC actualización metodológica 2019*. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc/ipc-actualizacion-metodologica-2019>
- 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>
- Fixen, P., Brentru, F., Bruulsema, T., Garcia, F., Norton, R., & Zingore, S. (2015). Nutrient/fertilizer use efficiency: Measurement, current situation and trends. In P. Drechsel, P. Heffer, H. Magen, R. Mikkelsen, & D. Wichelns (Eds.), *Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification* (pp. 8–38). International Fertilizer Industry Association (IFA), International Water Management Institute (IWMI), International Plant Nutrition Institute (IPNI), and International Potash Institute (IPI). https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2015_ifa_iwmi_ipni_ipi_water_fertilizer.pdf
- Garcia, L. A., Garcia, W., Lacerda, G. R., & Padilha, L. (2011, November 01-04). Sistema safra zero: ciclos de poda em cafeeiros de porte alto e baixo. *Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras*. Poços de Caldas, Brasília. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/909949>
- Japiassú, L. B., Garcia, A. L. A., Guimaraes, R. J., Padilha, L., & Carvalho, C. H. S. (2010). Pruning cycles and nitrogen fertilization of coffee fields conducted in the “safra zero” system. *Coffee Science*, 5(1), 28–37. <https://coffeescience.ufra.br/index.php/Coffeescience/article/view/269>
- Matiello, J.B., Garcia, W. R., Almeida, S. R. (2007). Recomendando a poda em cafezais. *Revista brasileira de tecnologia cafeeira coffea, Fundação procafé*, 4(11), 1–40.
- Mestre, A., & Ospina, H. F. (1994). Estabilización de la producción en las fincas cafeteras. *Avances Técnicos Cenicafé*, 200, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0200>
- Rawal, N., Pande, K. R., Shrestha, R., & Vista, S. P. (2022). Nutrient use efficiency (NUE) of wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by NPK fertilization. *PLOS ONE*, 17(1), e0262771. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262771>
- Ray, K., Banerjee, H., Bhattacharyya, K., Dutta, S., Phonglosa, A., Pari, A., & Sarker, S. (2018). Site-Specific Nutrient Management for Maize Hybrids in an *Inceptisol* of West Bengal, India. *Experimental Agriculture*, 54(6), 874–887. <https://doi.org/10.1017/S001447971700045X>
- Rendón, J. R. (2016). Sistemas de renovación de cafetales para recuperar y estabilizar la producción. *Avances Técnicos Cenicafé*, 463, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0463>
- Rendón, J. R., & Duque, H. (2017). Determine la densidad de tallos en las zocas de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 484, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0484>
- Rendón, J. R., & Salazar, H. M. (2023). Recuperación de sitios faltantes en la renovación del cultivo de café, una estrategia rentable. *Avances Técnicos Cenicafé*, 555, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0555>
- Rendón, J. R., Grajales, A. M., & Salazar, H. M. (2023). Efecto de la renovación por zoca y podas en la biomasa de raíces de café. *Revista Cenicafé*, 74(1), e74105. <https://doi.org/10.38141/10778/74105>
- Salazar Echeverry, H. M., Duque Orrego, H., & Granobles-Torres, J. C. (2023). The Economic Efficiency of Coffee Growers in the Department of Caldas, Colombia. *Economies*, 11(10), 255. <https://doi.org/10.3390/economies11100255>
- Sadeghian, S., & Duque Orrego, H. (2017). Formulaciones generales de fertilizantes: alternativas para una nutrición balanceada de los cafetales en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, 483, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0483>
- Unigarro, C. A., Rendón, J. R., & Acuña-Zornosa, J. R. (2021). Densidad de siembra y fotosíntesis, el motor de la productividad en nuestros cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé*, 525, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0525>

CARACTERIZACIÓN DEL TIEMPO DE CONSERVACIÓN DE CAFÉ EXCELSO EMPACADO AL VACÍO EN DIFERENTES CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO

Valentina Osorio Pérez *, Jenny Paola Pabón Usaqué **, Claudia Patricia Gallego Agudelo **,
Claudia Rocío Gómez Parra **, Beatriz Eugenia Mira Rada ***

Osorio, V., Pabón, J., Gallego, C.P., Gómez, C. R., & Mira-Rada, B.E. (2025). Caracterización del tiempo de conservación de café excelso empacado al vacío en diferentes condiciones de almacenamiento. *Revista Cenicafé*, 76(1), e76102. <https://doi.org/10.38141/10778/76102>



El almacenamiento del café es una etapa clave en la conservación de las características físicas del grano y sensoriales de la bebida, consolidadas en las etapas de cultivo y procesamiento. La vida útil se refiere al tiempo transcurrido entre la producción del alimento hasta su consumo estimado. Esta investigación evaluó el efecto del empaque al vacío en la vida útil del café verde almacenado durante 365 días, en cuatro condiciones contrastantes de almacenamiento. Adicionalmente, se definió su vida útil secundaria durante los 90 días posteriores a la pérdida de vacío, una vez abierto el empaque. En el almacenamiento primario del café excelso empacado al vacío hubo un incremento del contenido de humedad desde el 11,90% hasta 12,50% y de actividad de agua de 0,6146 hasta 0,6709 para el sitio con mayor temperatura (T) y humedad relativa (HR). En el sitio de almacenamiento primario con menor T y menor HR se conservó la calidad sensorial hasta los 365 días. Con respecto al almacenamiento secundario, las variaciones en la aparición de defectos dependieron de los cambios sufridos por el grano en las condiciones iniciales de almacenamiento primario. El café almacenado a mayor temperatura, a partir de los 120 días, presentó incremento del 66,66% de las muestras con defectos sensoriales, y a partir de los 240 días el 100%. Por medio del análisis de riesgos de Weibull se estimó una SL, para el café empacado al vacío y almacenado en condiciones de T=20°C y HR=80%, de 248 días.

Palabras clave: Actividad de agua, calidad, empaque, humedad relativa, vacío, vida útil.

CHARACTERIZATION OF THE SHELF LIFE OF VACUUM-PACKED EXCELSCO COFFEE UNDER DIFFERENT STORAGE CONDITIONS

The storage of coffee is a critical stage for preserving the physical and sensory characteristics of the beverage, which are established during the cultivation and processing stages. Shelf life (SL) refers to the time elapsed between the production of a food product and its consumption, during which its physical, chemical, or microbiological properties remain unaltered under specified conditions. This study focused on characterizing and describing the period during which vacuum-packed green coffee retains its quality properties under four contrasting storage conditions over 365 days. Additionally, the secondary shelf life (SSL) was determined after vacuum loss, simulating a storage period of 90 days. During vacuum-packaged primary storage, an increase in moisture content from 11.90% to 12.50% and in water activity from 0.6146 to 0.6709 was observed at the site with the highest storage temperature (T) and relative humidity (RH). Conversely, in the storage site with lower T and RH, sensory quality was preserved for up to 365 days. In secondary storage, the appearance of defects depended on the changes in the beans caused by the initial primary storage conditions. Coffee stored at higher temperatures showed a progressive increase in sensory defects, with 66.66% of the samples exhibiting defects after 120 days and 100% after 240 days. Using Weibull risk analysis, the SL of vacuum-packed coffee stored at T=20 °C and RH=80% was estimated to be 248 days.

Keywords: water activity, quality, packaging, humidity, vacuum, shelf life.

* Investigador Científico II. Disciplina de Calidad, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-1166-0165>

** Asistente de Investigación. Disciplina de Calidad, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-1576-2297>, <https://orcid.org/0000-0002-1532-8055> y <https://orcid.org/0000-0002-0685-8337>

*** Asistente de Investigación. Disciplina de Biometría, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0001-5683-7190>



El almacenamiento del café es una etapa clave en la conservación de las características físicas del grano y sensoriales de la bebida, consolidadas en las etapas de cultivo y procesamiento del fruto. Los granos de café, aún después del proceso de secado, continúan con actividades metabólicas como la respiración, donde consumen oxígeno, carbohidratos, grasas y proteínas, lo que origina la producción de dióxido de carbono y calor (Borém et al., 2021). Las condiciones óptimas del entorno de almacenamiento, es decir, el empaque, la temperatura y la humedad relativa del ambiente pueden reducir el riesgo de pérdida de calidad y evitar el incremento de la actividad microbiana que afecta la vida útil del café (Demianová et al., 2023); esta última, está íntimamente relacionada con la respiración del grano. La pérdida de vida útil, entendida como el envejecimiento del grano y pérdida de la calidad de la bebida, se da en ambientes de alta temperatura y alta humedad relativa, que sumadas al uso de empaques permeables, favorece el incremento de la respiración (Borém et al., 2021). Aunque hasta el momento no se cuenta con un método específico que preserve a largo plazo la calidad sensorial inicial del café, es necesario el desarrollo de alternativas que minimicen los cambios tanto físicos como químicos antes que afecten la calidad sensorial (Aung Moon et al., 2022).

La vida útil de los alimentos (SL por sus siglas en inglés Shelf Life), se define como el tiempo transcurrido entre la producción y el empaque hasta su consumo. Bajo ciertas condiciones específicas de almacenamiento, las características físicas, químicas y microbiológicas del alimento no se ven afectadas, manteniendo su vida útil. Por su parte, la vida útil secundaria (SSL por sus siglas en inglés Secondary Shelf Life), representa el tiempo transcurrido desde la apertura del empaque hasta el consumo total, período durante el cual el alimento no experimenta

pérdidas significativas de calidad (Orfanou et al., 2019).

En el almacenamiento de los granos de café verde se producen cambios en los compuestos químicos que afectan la calidad sensorial del producto. El deterioro del grano es el resultado de procesos oxidativos de carbohidratos, lípidos y proteínas (Borém et al., 2021). Durante el almacenamiento, el café pergamino presenta una menor afectación por las condiciones del entorno en comparación con el café trillado; este último, a su vez, presenta una mejor preservación de sus características iniciales cuando está en temperaturas de refrigeración (Abreu et al., 2023). Por su parte, la vida útil del café verde para tueste (SL) y el café tostado para preparación de la bebida (SSL), se ve afectada por diversas reacciones de pérdida de calidad, que se producen con mayor rapidez debido a la interacción del grano con el oxígeno, la humedad y la temperatura (Orfanou et al., 2019).

La velocidad de los cambios químicos en los granos de café verde durante el almacenamiento, están influenciados por la calidad inicial y el método de procesamiento del fruto (vía seca o vía húmeda), la temperatura ambiental, la humedad relativa y la permeabilidad del empaque (Borém et al., 2021). Condiciones de temperatura del ambiente y de humedad relativa sin control reducen la calidad del café natural desde el primer día y en el café lavado a partir de los tres meses. Así también, un ambiente refrigerado conserva la calidad hasta los 12 meses (Abreu et al., 2023). La refrigeración es un método eficaz para la preservación de las características iniciales de los alimentos puesto que desacelera la respiración, el proceso de senescencia y las alteraciones químicas y enzimáticas, controlando el avance del deterioro del grano (Borém et al., 2023). En el almacenamiento de granos de café verde un ambiente refrigerado proporciona

efectos favorables, como resultado de mayores concentraciones de enzimas catalasa, peroxidasa y alcohol deshidrogenasa (Abreu et al., 2017).

En la cadena de comercialización, el uso de bolsas herméticas ha presentado una tendencia creciente en los últimos años. Diversos autores reportan que su uso puede mantener la calidad del café verde en almacenamiento hasta por siete meses (Donovan et al., 2019). No hay diferencia estadística entre diversos tipos de bolsas (dos o tres capas) (Borém et al., 2021). Durante los tres primeros meses de almacenamiento, Borém et al. (2021), no observaron diferencias sensoriales entre muestras de café natural y honey empacadas en empaques permeables e impermeables. A partir del sexto mes se registraron diferencias y estuvieron asociadas al tipo de procesamiento, resultando más afectada la calidad del café natural que la del café honey. Los empaques de alta permeabilidad como el yute o el fique, permiten el contacto de los granos con el oxígeno, al tiempo que favorecen una mayor interacción con las condiciones del ambiente, lo que puede generar variación del contenido de humedad del café, aumento en la respiración y actividad metabólica, deteriorando el sabor y generando sabores a madera, cartón y yute (Borém et al., 2023).

Borém et al. (2021), reportaron que la humedad de granos de café empacados en bolsas de papel, aumenta durante el almacenamiento y permanece estable en los granos empacados en bolsas herméticas. Ambientes de almacenamiento con temperaturas entre 20°C y 35°C y humedad relativa entre 52% y 75% producen un aumento del 4% en el contenido de humedad del grano y su correspondiente pérdida de color (Palacios-Cabrera et al., 2007). En el grano, contenidos de humedad superiores al 11,5%, aumentan la tasa respiratoria, provocando cambios químicos a partir de la oxidación de carbohidratos,

lípidos y proteínas. Las condiciones que propician una mayor actividad metabólica y una mayor tasa de respiración, implican un uso de compuestos como los azúcares que son precursores del aroma y sabor de la bebida. Sin su presencia, dominan los carbohidratos de alto peso molecular como la hemicelulosa, la celulosa y la lignina, esta podría ser la razón por la que los descriptores sensoriales del café reposado se relacionan con el papel y la madera (Abreu et al., 2023). Para la calidad sensorial, independientemente del empaque utilizado, a partir de los seis meses aumenta la percepción a café reposado (sabor a madera) en los cafés almacenados en condiciones sin control de temperatura (Borém et al., 2023).

En esta investigación se evaluó el efecto del empaque al vacío en la vida útil del café verde (SL) almacenado durante 365 días en cuatro condiciones contrastantes de almacenamiento (temperaturas y humedades relativas) y se definió su vida útil secundaria (SSL) cuando el empaque era abierto. Después de perdido el vacío, las muestras de café se almacenaron y se evaluaron durante tres meses posteriores para identificar el tiempo en el cual se deteriora la calidad sensorial y se define la aparición del defecto reposo (SSL).

MATERIALES Y MÉTODOS

Café. Frutos de café de la especie *Coffea arabica* L., variedad Castillo®, provenientes de la Estación Experimental Naranjal (Chinchiná, Caldas), se recolectaron en la cosecha principal del año 2021, asegurando la máxima concentración de café maduro (1.500 kg). Se realizó un procesamiento estándar, con un porcentaje de frutos verdes inferior al 2,5%, en un tiempo inferior a seis horas después de la recolección, se eliminó el exocarpio por medio de una despulpadora 2.500 horizontal con zaranda circular (JM Estrada, Colombia). Posteriormente, se removió

el mucílago mediante fermentación espontánea, con estimación del tiempo de lavado asociado al uso del Fermaestro[®], finalizando con secado mecánico, con temperatura de 45°C hasta alcanzar un contenido de humedad entre el 10,0% y el 11,5%. Se realizó la trilla de café y selección de la almendra sana, eliminando los defectos físicos. El café utilizado para los tratamientos fue el retenido por encima de la malla número 14/64.

Almacenamiento primario. El efecto de la conservación de la calidad inicial del café (SL) en el empaque al vacío se evaluó en cuatro diferentes condiciones de almacenamiento, durante 365 días. El café excelso se distribuyó en 48 unidades experimentales, correspondientes a cuatro tiempos de muestreo (60, 120, 240 y 365 días), por cuatro sitios de muestreo y tres repeticiones (Figura 1). Adicionalmente se tomó una muestra en el tiempo cero para la caracterización inicial de la calidad del café que iba a ser sometido al almacenamiento. El material de empaque utilizado fue polietileno de baja densidad y poliamida (nylon). El oxígeno se redujo aplicando vacío parcial a través del equipo Minipack[®]-torre. Los sitios de almacenamiento inicial fueron Alto de Letras (Manizales) (LT), cuarto frío (Cenicafé) (CF), Chinchiná (NA) y Santa Marta (SM). Las condiciones promedio de temperatura y humedad relativa para los sitios fueron: 10,3°C, 11,3°C, 22,6°C y 28,0°C y 72%, 77%, 81% y 80% respectivamente. Las características de calidad del grano de café del tiempo final en el almacenamiento primario corresponden al tiempo inicial (tiempo cero) del almacenamiento secundario.

Almacenamiento secundario. Posterior a los cuatros tiempos de almacenamiento inicial (60, 120, 240 y 365 días) de las muestras empacadas al vacío, se abrió el empaque y se tomaron las muestras de café a las cuáles se les realizaron los respectivos análisis

de calidad. Estos resultados configuraron las características del tiempo cero del almacenamiento secundario (Figura 1). Posterior a esto, la unidad experimental se dividió en tres sub-muestras, que fueron almacenadas en empaque plástico hermético (doble barrera de polietileno de alta y baja densidad). Estas sub-muestras se analizaron a los 30, 60 y 90 días después de eliminado el vacío. Las condiciones generales de almacenamiento fueron temperatura ambiental de 18°C y humedad relativa de 60%. Lo anterior configuró el almacenamiento secundario del café y para estas muestras se estimó la vida útil secundaria (SSL).

Calidad física. De cada unidad experimental se tomó una muestra compuesta para la determinación del contenido de humedad, actividad de agua y colorimetría. El contenido de humedad se verificó por el método directo estándar, siguiendo los procedimientos de la norma ISO 6673 a 105°C (International Organization for Standardization, 2003). Para cada muestra se tomó el promedio de dos mediciones tanto de actividad de agua como para su respectivo contenido de humedad.

La actividad de agua se determinó con el equipo Lab Master Neo (Novasina, Alemania), con control de temperatura de medición (25°C). Los valores se determinaron mediante el método manual, donde el equilibrio del valor se determina teniendo como base la estabilidad de la lectura, lográndose cuando la variación no superaba $\pm 0,003$ durante dos minutos.

El color de los granos de café se obtuvo cuantitativamente con la escala CIEL*a*b* con el equipo Chroma Meter CR410 (Konica Minolta, Japón). El modelo de color define tres parámetros: el primero es la coordenada L* que representa la luminosidad del color, siendo 0 negro y 100 blanco; la segunda

coordinada es la a^* que indica la posición entre rojo y verde, valores negativos indican verde mientras que valores positivos rojo y por último la coordenada b^* que representa el cambio de azul (valores negativos) a amarillo (valores positivos).

Calidad sensorial. Para el análisis sensorial del café se utilizó el protocolo de la Specialty Coffee Association (2015), con cinco catadores certificados Q-Grader por el CQI (Coffee Quality Institute). La metodología incluye el protocolo de preparación de la muestra para el análisis: proporción de café/agua, tipo de molienda, temperatura y calidad del agua, además de temperaturas de análisis. Los catadores registraron diez atributos del sabor del café entre los que se encuentran: fragancia/aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance, uniformidad, taza limpia, dulzor, puntaje catador y defectos sensoriales. El puntaje total se configura por la sumatoria de los valores de los atributos positivos disminuyendo el valor del defecto sensorial. Los atributos son evaluados en una escala de diez puntos representando el nivel de calidad en una tabla entre seis y nueve puntos. Puntajes totales

superiores a 80 puntos clasifican el café como de especialidad por calidad sensorial.

Composición química. La determinación de la composición química se realizó mediante la técnica NIRS (espectroscopia de infrarrojo cercano), con el equipo NIRS XDS RCA (2012) de FOSS. Se pesaron 110 g de granos de café entero y se dispusieron en dos celdas rectangulares. Las muestras fueron leídas en un rango de longitud de onda de 400 nm – 2.490 nm. A través de modelos de calibración previamente desarrollados y con la información espectral de las muestras, se procedió a realizar la determinación (%) de los siguientes compuestos químicos: composición de ácidos grasos, cafeína, trigonelina, ácidos clorogénicos totales, lípidos totales y sacarosa presentes en el café almendra verde. El error relativo de predicción, que permite conocer la diferencia entre el valor real (obtenido por métodos analíticos de referencia) y el valor obtenido por la técnica NIRS, reportado para estos modelos son: cafeína 0,015%, trigonelina 0,027%, ácidos clorogénicos totales 0,007%, lípidos totales 0,003% y sacarosa 0,007% (Gómez et al., 2023).

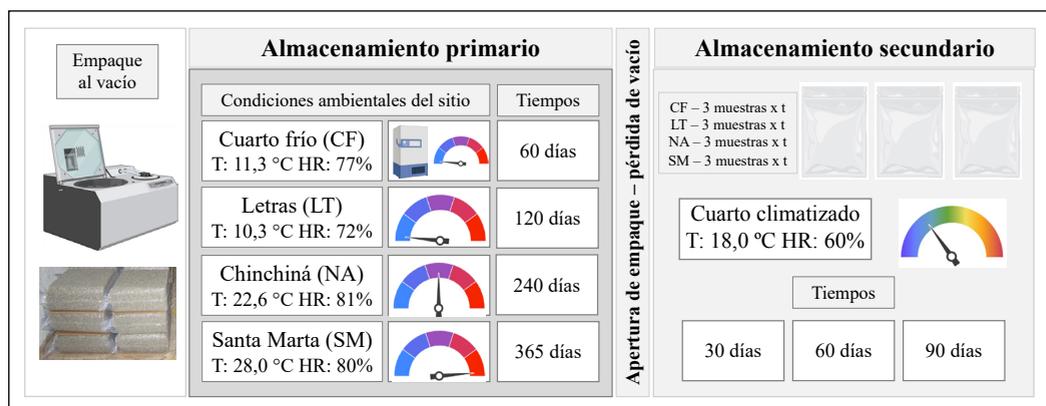


Figura 1. Metodología de los almacenamientos primario y secundario. T: temperatura, HR: humedad relativa, t: tiempo.

Estimación de la vida útil mediante el análisis de riesgos de Weibull. El análisis de riesgos de Weibull es un método gráfico utilizado para determinar la vida útil de los alimentos (Fu & Labuza, 1997). En este método, la función de riesgo acumulativo de la distribución de Weibull se utiliza de la siguiente manera (Ecuación <1>) (Orfanou et al., 2019).

$$H(t) = \int_0^t h(x) dx = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \quad <1>$$

Donde $H(t)$ es la función de riesgo acumulativa, $h(x)$ es la función de riesgo, t es el tiempo, α es el parámetro de escala y β es el parámetro de forma. Cuando el logaritmo del tiempo $\log t$ se representa gráficamente frente al logaritmo de los valores de riesgo acumulado $\log \Sigma H$, la ecuación resultante es lineal (Ecuación <2>) (Orfanou et al., 2019).

$$\log t = \left(\frac{1}{\beta}\right) \log \Sigma H + \log \alpha \quad <2>$$

La vida útil puede calcularse como el tiempo en el que el valor acumulativo de peligro es del 69,3%, lo que corresponde al 50% de probabilidad de disminución de un atributo de calidad específico (Fu & Labuza, 1997). La distribución de Weibull es asimétrica cuando $2 < \beta < 4$, lo que permite una mejor estimación de la vida útil (Cardelli & Labuza, 2001). Se utilizó el panel de catación para identificar la presencia del defecto sensorial reposo, pues este define la aceptabilidad del producto posterior al almacenamiento tanto primario (empacado al vacío hasta 365 días) como secundario (muestra proveniente de empaque al vacío en diferentes sitios y después abierto y monitoreado hasta 90 días). Con los resultados de los analistas sensoriales se clasificaron las muestras con y sin defectos

sensoriales (aceptables y no aceptables) por sitio y tiempo de muestreo.

Se creó una tabla de clasificación de peligrosidad junto con los valores H de peligrosidad y ΣH de peligrosidad acumulada. Los valores de peligro resultaron de dividir 100 por el rango dado a cada muestra no aceptable. El logaritmo del tiempo $\log t$ se representó gráficamente frente al logaritmo de los valores de peligro acumulados $\log \Sigma H$ y se calculó el tiempo de conservación para un valor de peligro acumulado del 69,3% (50% de probabilidad de que los analistas que califiquen las muestras como no aceptables) (Orfanou et al., 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Almacenamiento primario

Contenido de humedad y actividad de agua.

El contenido inicial promedio de humedad de los granos de café fue de 11,9%. El contenido mínimo se encontró en Santa Marta (SM) con 60 días de almacenamiento con un valor de 11,68%, por otro lado, el valor promedio máximo se encontró en los 240 días en los sitios de almacenamiento cuarto frío Cenicafé (CF) y Chinchiná (NA) con el mismo valor promedio de 12,50%. Para el sitio de almacenamiento Letras (LT) este contenido mostró valores promedio de 11,74%, 11,70%, 11,92% y 11,99% para los tiempos de almacenamiento primario de 60, 120, 240 y 365 días, respectivamente. Para estos mismos días el almacenamiento en el CF evidenció valores de 11,86%, 11,98%, 12,50% y 11,87%, el sitio NA 11,89%, 12,09%, 12,50% y 12,25% y el sitio SM 11,68%, 11,83%, 12,03% y 12,06%. Aunque se evidencia un incremento del porcentaje inicial hasta valores de 12,50% debido a la naturaleza higroscópica de los granos de café que favorece el intercambio del vapor de agua con el ambiente cuando la

bolsa es permeable, se observa el efecto del empaque en la conservación de la humedad, aun en condiciones de alta humedad relativa del ambiente como es Santa Marta (81%). Palacios-Cabrera et al. (2007) estudiaron el efecto de la temperatura y la humedad relativa (HR) durante el transporte del café verde en el contenido de humedad, y se comprobó que aumentos del 5% al 10% en la HR conducen a un aumento del 3% en el contenido de humedad de los granos.

El valor promedio de la actividad de agua correspondiente al contenido de humedad de 11,9% fue de 0,6146. Las variaciones del valor de la actividad de agua durante los cuatro tiempos de muestreo (60, 120, 240 y 365 días) para los sitios fue: LT: 0,6135, 0,5966, 0,6261 y 0,6210; CF: 0,6222, 0,5962, 0,6243 y 0,6027; NA: 0,6178, 0,6126, 0,6382 y 0,6271; y SM: 0,6280, 0,6324, 0,6566 y 0,6709. El valor mínimo de 0,5895 se reportó en Letras en el segundo tiempo de muestreo (120 días), correspondiente a una humedad de 11,66%. Por otro lado, el valor máximo se encontró en el sitio Santa Marta en el último muestreo (365 días) con 0,6819 correspondiente a un contenido de humedad del grano de 12,14%. Los contenidos de humedad superiores al 11,5% aumentan la tasa respiratoria de los granos generando cambios en la composición química (Ribeiro et al., 2011). Borém et al. (2021), contrastaron los contenidos de humedad de los granos empacados en bolsas de papel y en bolsas herméticas, evidenciando que las primeras aumentaron su contenido durante 18 meses de almacenamiento, mientras que en las segundas el contenido de humedad permaneció estable, lo que indicó la eficacia de las barreras de vapor de agua de estos empaques.

Colorimetría. La coordenada L^* es un valor que indica el cambio del negro al blanco, este cambio en el grano de café puede indicar el blanqueamiento. En la Figura 2 se presentan

los valores promedio de las coordenadas L^* , a^* y b^* , para cada sitio y por cada período. El valor máximo promedio de L^* fue de 83,93 y se encontró en Santa Marta a los 365 días de almacenamiento. La diferencia máxima entre el valor inicial y final de L^* se reporta en este mismo sitio con un aumento de 7,01. Los valores máximos y mínimos de la coordenada de color a^* se encontraron en el sitio de almacenamiento Santa Marta, con valores de -1,50 y -2,64, en los días 60 y 365 días, respectivamente. La coordenada b^* que indica el cambio hacia el color amarillo, presentó los valores máximos en el sitio Santa Marta, incrementado desde valores de 13,18, a los 60 días, a valores de 18,90 en el último muestreo, implicando un aumento del 43,39% en esta variable. Lo anterior podría indicar que, en el almacenamiento de granos, aún en empaque de alta barrera y vacío, las condiciones de alta humedad y alta temperatura favorecen el cambio del color del grano. Anokye-Bempah et al. (2023) reportan que el café verde empacado en envases herméticos presenta valores de L^* más bajos y con menor variabilidad en comparación con el café verde envasado en sacos de yute, indicando un blanqueamiento considerable del grano cuando es empacado en este último. Las menores variaciones en los valores de L^* observadas en el café empacado en envases herméticos indican que estos tratamientos mantuvieron el color del café verde durante todo el experimento.

Calidad sensorial. La calidad sensorial del café antes del almacenamiento primario, obtuvo un puntaje total SCA de 81,92. Durante los cuatro muestreos posteriores, el 64,58% de las muestras no presentaron defectos sensoriales con un promedio de puntaje total SCA de 80,89. Posterior al almacenamiento primario, el 4,16% de las muestras presentaron defecto terroso y el 22,91% reposo. Para el sitio de almacenamiento LT (Letras), durante los cuatro tiempos de muestreo en el almacenamiento

	<i>Tiempo (0)</i>			<i>60 días</i>			<i>120 días</i>			<i>240 días</i>			<i>365 días</i>		
<i>Letras (LT)</i>	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:
	74,49	-2,23	12,29	74,68	-2,44	12,07	74,66	-2,37	12,34	74,24	-2,54	12,71	73,24	-1,96	12,44
<i>Cuarto frío (CF)</i>	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:
	74,49	-2,23	12,29	73,34	-2,47	12,13	74,65	-2,48	12,45	67,39	-2,52	12,48	74,06	-2,44	12,70
<i>Chinchiná (NA)</i>	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:
	74,49	-2,23	12,29	75,25	-2,55	12,57	75,66	-2,38	12,96	76,83	-2,57	12,69	77,46	-2,33	14,05
<i>Santa Marta (SM)</i>	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:	L*:	a*:	b*:
	74,49	-2,23	12,29	76,91	-2,64	13,18	78,22	-2,45	14,36	81,76	-2,15	14,92	83,93	-1,50	18,90

Figura 2. Colorimetría del café durante el almacenamiento primario

primario, la calidad sensorial se conservó hasta el día 365 sin presentar defectos sensoriales. Para el CF en el muestreo correspondiente a 365 días de almacenamiento se presentó defecto terroso en el 66,66% de las muestras. Un comportamiento similar se presentó con las muestras de sitio NA; en este mismo tiempo de muestreo se presentó el defecto reposo en el 100% de las muestras. Por otro lado, en el sitio de almacenamiento SM a partir del muestreo de los 120 días, se observó un incremento del porcentaje de muestras con defectos sensoriales con 66,66% y en los dos siguientes (240 y 365 días) con el 100% de las muestras con defecto reposo. Las condiciones que propician una mayor tasa de respiración del grano y una mayor actividad metabólica, favorecen el consumo de diferentes compuestos orgánicos, entre ellos, los carbohidratos de bajo peso molecular, como los azúcares (glucosa, fructosa, sacarosa). Una disminución de estos compuestos precursores del aroma y sabor de la bebida, promueven los sabores provenientes de carbohidratos de alto peso molecular como la hemicelulosa, celulosa y lignina, relacionados con el papel y la madera característicos y discriminantes del café reposado (Abreu et al., 2023; Zarebska et al., 2022).

El mayor porcentaje de defectos en el sitio de almacenamiento SM puede estar relacionado con la mayor temperatura del ambiente de 28,0°C en comparación con la temperatura del sitio LT de 10,3°C donde la calidad se conservó durante los 365 días de almacenamiento primario. Aung Moon et al. (2022) reportan que mayores temperaturas de almacenamiento influyen significativamente en la disminución de la calidad del café verde; adicionalmente, reportan una mejor conservación de la calidad del café al ser empacado en bolsas Grainpro (GP) en comparación con el conservado en costales tejidos de polipropileno (estopa). Por su parte, Abreu et al. (2019) reportan que el café natural almacenado durante 18 meses en empaque de alta barrera y al vacío conservaban sus cualidades sensorial iniciales y sus puntuaciones eran superiores a 80 puntos después de transcurrido este tiempo.

Composición química. El ácido graso palmítico presentó un valor de 42,06% en el tiempo cero y la mayor disminución se observó en el sitio CF a los 240 días con un valor de 38,64%, mientras que la menor disminución se reportó para el sitio SM a los 365 días con un valor de 40,15%. El ácido linoleico

en el tiempo cero presentó un valor promedio de 35,05% y durante los diferentes tiempos de almacenamiento presentó disminuciones, siendo la mayor en el muestreo de 365 días, en el sitio SM con un valor de 31,60%. El ácido oleico (monoinsaturado) presentó un comportamiento diferente al linoleico, pues sus valores incrementaron y el valor máximo promedio se observó en el sitio LT en el día 120 con un valor de 11,09%. Los diversos cambios en los compuestos de la fracción lipídica del grano pueden indicar el deterioro del mismo. Durante el almacenamiento, la hidrólisis de la materia grasa comienza antes que la de los carbohidratos o las proteínas. La liberación de ácidos grasos, indica pérdida de la integridad de las paredes celulares y las cadenas de aquellos insaturados pueden ser fácilmente oxidadas a hidroperóxidos, que posteriormente se convierten en compuestos de bajo peso molecular que generan sabores desagradables (Borém et al., 2019; Coradi et al., 2007; Rendón et al., 2014; Toci et al., 2013).

El ácido esteárico presentó un valor promedio de 7,82% en el café antes del almacenamiento; este valor disminuyó en todos los sitios y en los diferentes tiempos de muestreo. La menor disminución se evidenció en el sitio SM en el día 365 con un valor de 7,23%. Por su parte, el ácido araquídico, que es el ácido graso con menor porcentaje en la composición total de los ácidos grasos libres, presentó un valor inicial de 3,26%. Al igual que el esteárico, el ácido araquídico disminuyó en los tratamientos evaluados, pero a diferencia de este, la mayor disminución se presentó en el sitio SM con 365 días. Los granos de café verde tienen un bajo contenido de humedad y un alto contenido de lípidos, compuestos por una alta proporción de ácidos grasos insaturados en comparación con los ácidos grasos saturados. Lo anterior favorece la oxidación lipídica que produce olores rancios

y repercute negativamente en la calidad (Aung Moon et al., 2022). Las temperaturas más altas y el mayor tiempo de almacenamiento provocan un mayor grado de oxidación de los lípidos y cambios en la calidad.

El contenido de sacarosa inicia con valores de 8,02% y disminuye a valores de 7,41% en los sitios CF y LT, de 7,49% en NA y de 7,44% en SM, en el día 365 de almacenamiento. La cafeína y la trigonelina presentaron ligeros incrementos durante el almacenamiento y para ambos el mayor valor se reportó en el sitio SM a los 365 días de muestreo con valores de 1,39% y 1,08%. Los ácidos clorogénicos totales, al igual que los alcaloides, presentaron incrementos en su valor para todos los tratamientos evaluados. El menor incremento se observó en el tiempo de 365 días en el sitio Naranjal (NA) con un valor de 6,04% y el mayor valor se obtuvo en el sitio Santa Marta (SM) con 6,31%. Para los lípidos se observa el mismo comportamiento que los ácidos clorogénicos totales, un incremento a medida que pasa el tiempo de almacenamiento. El valor inicial fue de 11,26% y este incrementó a valores de 11,55% (CF), 11,41% (LT), 12,19% (NA) y 14,15% (SM). Los mayores incrementos en los contenidos de lípidos totales se reportan en los sitios NA y SM, sitios cuyas condiciones ambientales son de mayor temperatura y humedad relativa. Las atmósferas con mayores concentraciones de dióxido de carbono retardan la disminución del contenido de ácidos de los granos, lo que sugiere que empaques de alta barrera favorecen una mayor preservación del café debido a la conservación de los ácidos orgánicos. Durante el almacenamiento los alcaloides como la cafeína presentan una mayor estabilidad en comparación con los ácidos clorogénicos. Su concentración no presenta cambios asociados al tipo de empaque o la temperatura de almacenamiento, pero su aumento a lo largo del almacenamiento puede deberse a la

pérdida de otros compuestos hidrosolubles. La combinación de bajas temperaturas y envases de alta barrera puede ser ideal para prevenir la oxidación de los ácidos clorogénicos (Borém et al., 2023; Król et al., 2020; Tripetch & Borompichaichartkul, 2019).

Estimación de la vida útil primaria

La vida útil restante de un producto tras la apertura del envase se define como la SSL del producto (Orfanou et al., 2019). La actividad del agua y la temperatura de almacenamiento podrían considerarse los principales factores que afectan a la calidad del café durante el almacenamiento secundario (SSL). El análisis de riesgo y la distribución de probabilidad de Weibull y la evaluación sensorial de las características sensoriales del café pueden utilizarse para evaluar la pérdida de calidad durante el almacenamiento y predecir la vida útil secundaria.

Para la estimación de la vida útil primaria, se construyó la Tabla 1 con el número de calificaciones no aceptables dadas por los analistas sensoriales, debido a la presencia de defectos. Se observa que para los sitios CF (cuarto frío) y NA (Naranjal) las calificaciones negativas aparecen solamente en el último tiempo de muestreo (365 días), mientras que

el sitio LT no presentó muestras con defectos en ninguno de los cuatro tiempos de muestreo. Lo anterior impide que pueda realizarse la estimación del tiempo de vida útil en estos sitios, pues los defectos aparecen en su totalidad en el tiempo final del almacenamiento. Por su lado el sitio SM (Santa Marta) presenta defectos desde el segundo tiempo de muestreo (120 días) hasta el final del almacenamiento primario (Tabla 1).

La Tabla 2 presenta los valores de riesgo acumulados para los días de almacenamiento evaluados. Posteriormente, se graficó el logaritmo del tiempo ($\log(t)$) vs el logaritmo de los valores de riesgo acumulado ($\log(\Sigma H)$) (Figura 3), obteniendo la Ecuación <3>. El factor de forma β , calculado como $1/\text{pendiente}$, tuvo un valor de 2,96, indicando que se encuentra dentro del intervalo no asimétrico necesario para la estimación de la vida útil. El valor crítico estimado para la vida útil primaria, descrito como el momento en que el 50% del panel de catación califican las muestras como no aceptables ($\Sigma H=69,3\%$), para el café empacado al vacío y almacenado en Santa Marta ($T=20^\circ\text{C}$ y $HR=80\%$) fue de 248 días.

$$\log(t) = 0,3374 \times \log(69,31) + 1,7743 \quad (R^2 = 0,8186) \quad <3>$$

Tabla 1. Frecuencia de calificaciones negativas en el almacenamiento primario.

Sitio	60 días	120 días	240 días	365 días
CF (Cuarto frío)	0	0	0	10
LT (Letras)	0	0	0	0
NA (Chinchiná)	0	0	0	15
SM (Santa Marta)	0	10	15	15

Tabla 2. Rangos de riesgo de Weibull para café empacado al vacío y almacenamiento primario en SM (Santa Marta).

Rango	Días	H	Sum H
40	120	2,50	2,50
39	120	2,56	5,06
38	120	2,63	7,69
37	120	2,70	10,39
36	120	2,77	13,17
35	120	2,85	16,03
34	120	2,94	18,97
33	120	3,03	22,00
32	120	3,12	25,13
31	120	3,22	28,35
30	240	3,33	31,68
29	240	3,44	35,13
28	240	3,57	38,70
27	240	3,70	42,41
26	240	3,84	46,25
25	240	4,00	50,25
24	240	4,16	54,42
23	240	4,34	58,77
22	240	4,54	63,31
21	240	4,76	68,08
20	240	5,00	73,08
19	240	5,26	78,34
18	240	5,55	83,89
17	240	5,88	89,78
16	240	6,25	96,03
15	365	6,66	102,69
14	365	7,14	109,84
13	365	7,69	117,53
12	365	8,33	125,86
11	365	9,09	134,95
10	365	10,00	144,95
9	365	11,11	156,06
8	365	12,50	168,56
7	365	14,28	182,85
6	365	16,66	199,52
5	365	20,00	219,52
4	365	25,00	244,52
3	365	33,33	277,85
2	365	50,00	327,85
1	365	100,00	427,85

H y ΣH representan los valores de peligro y peligro acumulativo H, respectivamente.

los 30, 60 y 90 días fue de 0,6207, 0,6256 y 0,6230, respectivamente. Para el sitio de almacenamiento Letras (LT) este contenido mostró valores promedio de 0,6114, 0,6142 y 0,6157; para el sitio CF (Cuarto frío) evidenció valores de 0,6085, 0,6178 y 0,6128; el sitio NA presentó valores de 0,6221, 0,6235 y 0,6204 y el sitio SM los valores medios más altos de 0,6410, 0,6469 y 0,6431. Aunque se observa un aumento en las muestras provenientes del sitio SM (Santa Marta) no se observan datos ($>0,7$) que sugieran condiciones que incrementarían la dinámica poblacional fúngica favoreciendo la producción de OTA en el grano de café. Elevadas temperaturas, humedad relativa y disminución de los azúcares reductores se relacionan con el desarrollo de las poblaciones fúngicas y durante este proceso la sacarosa presente en el grano puede hidrolizarse para producir azúcares reductores (Iamanaka et al., 2014; Maman et al., 2021; Palareti et al., 2016).

Colorimetría. El valor mínimo de la coordenada L^* fue 69,24 y se presentó en la muestra proveniente del sitio de

almacenamiento CF (cuarto frío) en el tercer mes de almacenamiento secundario, mientras que el máximo valor de esta misma coordenada se observó en la muestra proveniente del sitio SM (Santa Marta) en el tercer mes de almacenamiento secundario con un valor de 80,93. Los valores de la coordenada a^* mostraron su valor máximo de -1,90 en el segundo mes en la muestra proveniente de Santa Marta y el valor mínimo de -2,63 en el primer mes en NA (Chinchiná). Para la coordenada de color b^* el mayor valor se reportó en la muestra del sitio SM (Santa Marta) en el primer mes de almacenamiento secundario con 16,00 y el menor en CF en el mes inicial. Al igual que en el almacenamiento primario las condiciones ambientales de SM generaron mayores cambios en los valores de las coordenadas de color L^* y b^* , que pueden relacionarse con el blanqueamiento y amarilleamiento de los granos (Figura 4). Anokye-Bempah et al. (2023), reportan blanqueamiento en café empacado en sacos de yute aun con el uso de desecantes, con aumentos de los valores de L^* de 51 y 52, respectivamente, al final del experimento.

	<i>Tiempo (0)</i>			<i>30 días</i>			<i>60 días</i>			<i>90 días</i>		
<i>Letras (LT)</i>	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :
	73,84	-2,00	12,17	74,53	-2,58	12,56	72,62	-2,19	12,15	75,84	-2,54	12,69
<i>Cuarto frío (CF)</i>	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :
	72,90	-2,51	12,07	73,06	-2,51	12,36	74,25	-2,29	12,51	69,24	-2,60	12,81
<i>Chinchiná (NA)</i>	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :
	75,65	-2,46	12,91	76,82	-2,63	13,35	76,75	-2,27	13,43	75,98	-2,47	12,57
<i>Santa Marta (SM)</i>	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :	L^* :	a^* :	b^* :
	79,02	-2,22	15,26	80,70	-2,36	16,00	80,15	-1,90	15,69	80,93	-2,28	14,41

Figura 4. Colorimetría del café durante el almacenamiento secundario.

Calidad sensorial. Al finalizar el almacenamiento primario (tiempo cero del secundario) el 72,91% de las muestras no presentaron defecto sensorial, pero este porcentaje fue disminuyendo en los tres tiempos de muestreo posteriores (30, 60 y 90 días) a valores de 45,83%, 41,66% y 33,33% respectivamente. Los defectos sensoriales predominantes fueron el terroso y el reposo que iniciaron con porcentajes de 4,16% y 22,91% y finalizaron con valores de 25,00% y 41,67% en el almacenamiento secundario, respectivamente. Los cambios en las características sensoriales se deben generalmente a la pérdida de compuestos aromáticos clave y a la aparición de productos de oxidación derivados de la degradación de lípidos con formación de peróxidos que provocan sabores desagradables (Giulia et al., 2023).

Las muestras de café almacenadas en CF conservaron su calidad inicial de la siguiente manera: Café sin defecto sensorial durante 60 días de almacenamiento primario y hasta 60 días de almacenamiento secundario y almacenamiento primario de 120 días y 90 días de almacenamiento secundario.

En el almacenamiento primario de 240 días y posterior a los 60 días almacenamiento secundario el 100% de las muestras presentaron defectos sensoriales.

Las muestras almacenadas primariamente en LT (Letras) no presentaron defectos sensoriales hasta los 365 días de almacenamiento. En este mismo sitio el total de las muestras no presentaron defectos en el almacenamiento secundario (hasta 90 días) en las muestras provenientes de los tiempos 120 y 240 días de almacenamiento primario. Un

comportamiento diferente se presentó en las muestras provenientes de los cuatro tiempos de almacenamiento primario en SM, el café almacenado 60 días en Santa Marta y posterior apertura del empaque para el almacenamiento secundario, desde los 30 días se incrementan los defectos y se presentan 100% de defectos sensoriales en las muestras a partir de 60 días de almacenamiento inicial y 90 días de almacenamiento posterior. Este comportamiento es similar para las muestras con almacenamiento primario en NA, a partir del tiempo primario de almacenamiento 120 días y secundario de 90 días, el 100% de las muestras provenientes de este sitio NA (Chinchiná) presentaron defecto. La aparición de defectos sensoriales en los diferentes tiempos del almacenamiento secundario es variable pues depende de los cambios sufridos por el grano durante las condiciones iniciales de almacenamiento primario. La hidrólisis de los triacilglicérols durante el almacenamiento del café libera ácidos grasos (AG) que se oxidan en presencia de oxígeno, dando lugar a otros compuestos volátiles como los aldehídos, asociados a un sabor y aroma desagradables. Sin embargo, la liberación de AG no es uniforme y la degradación difiere entre los ácidos (Coradi et al., 2007).

En cuanto a las variables sensoriales, se tienen la fragancia y el sabor como las variables que tienen un grado más alto de relación con el puntaje total SCA (Tabla 4). De acuerdo con los resultados, a más fragancia y sabor, mayor será el puntaje otorgado a la muestra. La Tabla 5 presenta los estadísticos descriptivos de la fragancia y el sabor de las muestras en las dos localidades más contrastantes (Letras LT y Santa Marta SM), en cada uno de los tiempos de evaluación.

Tabla 3. Puntaje total SCA durante el almacenamiento de muestras de café empacadas al vacío. *Alto de Letras (Manizales) (LT), cuarto frío (Cenicafé) (CF), Chinchiná (NA) y Santa Marta (SM).*

Sitio	Tiempo de almacenamiento primario (Días)	Tiempo de almacenamiento secundario (Días)	Promedio puntaje total SCA	Muestras sin defecto (%)
CF	60	0	81,17	100
		30	81,25	100
		60	80,89	100
		90	80,72	67
	120	0	80,17	100
		30	80,27	100
		60	81,75	100
		90	80,17	100
	240	0	80,69	100
		30	80,50	33
	365	0	81,50	33
	LT	60	0	80,64
30			81,25	100
60			81,72	100
90			80,25	67
120		0	80,25	100
		30	79,86	100
		60	81,42	100
		90	80,73	100
240		0	80,44	100
		30	80,19	100
		60	80,23	100
		90	80,15	100
365	0	81,42	100	
NA	60	0	81,56	100
		30	81,11	100
		60	80,25	100

Continúa...

...continuación.

Sitio	Tiempo de almacenamiento primario (Días)	Tiempo de almacenamiento secundario (Días)	Promedio puntaje total SCA	Muestras sin defecto (%)
NA	60	90	81,21	100
		0	80,61	100
	120	30	80,06	33
		60	80,17	33
	240	0	81,50	100
SM	60	0	81,22	100
		30	80,75	67
	120	60	80,08	33
		0	80,83	33

Tabla 4. Correlación entre atributos sensoriales fragancia y sabor con puntaje total de la muestra.

Variable sensorial	Correlación con puntaje
Fragancia (FRA)	0,75
Sabor (SAB)	0,99

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de fragancia y sabor.

Sitio	Tiempo 1 (Días)	Tiempo 2 (Días)	Fragancia			Sabor		
			Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
LT	60	0	7,42	7,33	7,50	7,19	7,08	7,25
		30	7,42	7,33	7,50	7,28	7,25	7,33
		60	7,42	7,25	7,58	7,31	7,17	7,50
		90	7,29	7,25	7,38	6,73	6,00	7,19
	120	0	7,42	7,33	7,50	7,19	7,17	7,25
		30	7,28	7,00	7,50	7,13	7,06	7,17

Continúa...

...continuación.

Sitio	Tiempo 1 (Días)	Tiempo 2 (Días)	Fragancia			Sabor			
			Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	
LT	120	60	7,47	7,42	7,50	7,25	7,17	7,33	
		90	7,35	7,31	7,44	7,21	7,13	7,25	
	240	0	7,42	7,25	7,58	7,17	7,17	7,17	
		30	7,35	7,25	7,42	7,05	7,00	7,08	
		60	7,31	7,19	7,38	7,15	7,06	7,31	
		90	7,29	7,25	7,31	7,06	7,00	7,13	
	365	0	7,47	7,33	7,67	7,25	7,08	7,42	
		30	6,75	6,56	7,00	6,00	6,00	6,00	
		60	6,42	6,00	6,70	6,00	6,00	6,00	
		90	6,42	6,00	6,70	6,00	6,00	6,00	
	SM	60	0	7,47	7,42	7,50	7,22	7,17	7,33
			30	7,44	7,42	7,50	6,81	6,00	7,33
60			7,17	6,67	7,50	6,39	6,00	7,17	
90			6,65	6,25	7,13	6,00	6,00	6,00	
120		0	7,17	7,08	7,33	6,39	6,00	7,17	
		30	6,67	6,25	7,25	6,00	6,00	6,00	
		60	6,69	6,42	7,17	6,00	6,00	6,00	
		90	6,60	6,25	7,06	6,00	6,00	6,00	
240		0	6,94	6,67	7,33	6,00	6,00	6,00	
		30	6,27	6,00	6,56	6,00	6,00	6,00	
		60	6,56	6,25	6,88	6,00	6,00	6,00	
		90	6,50	6,25	6,75	6,00	6,00	6,00	
365	0	6,14	6,00	6,42	6,00	6,00	6,00		
	30	6,07	6,00	6,20	6,00	6,00	6,00		
	60	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00		
	90	6,33	6,00	7,00	6,00	6,00	6,00		

Composición química. Los contenidos de lípidos presentaron incrementos entre el tiempo inicial y los 90 días de almacenamiento secundario con valores de 11,22%, 11,17%, 11,70% y 12,25% en los sitios CF, LT, NA y SM, con valores finales de 11,54%, 11,37%, 11,69% y 12,64%, respectivamente. Los lípidos contribuyen a la calidad de la bebida al influir en la viscosidad, la sensación en boca (cremosidad), aspecto y sabor.

El ácido palmítico presentó un valor promedio inicial de 39,62% en CF, de 39,71% en LT, de 39,57% en NA y de 40,07% en SM, presentando ligeras disminuciones en el tiempo de 90 días en el almacenamiento secundario. El ácido graso linoleico presentó el mayor valor promedio en el tiempo cero (0) del sitio CF con un valor de 35,49%, mientras que el valor promedio mínimo se presentó en el tiempo de almacenamiento de 60 días en SM. El menor valor promedio de ácido oleico (9,97%), se observó en el sitio SM a los 90 días. El mayor valor promedio de ácido esteárico (7,11%), se observó en el sitio SM en el tiempo inicial (0). Los valores finales (90 días) del ácido araquídico fueron 2,51% (CF), 2,36% (LT), 2,39% (NA) y 2,34% (SM). Aung Moon et al. (2022), evidencian cambios en las propiedades químicas de la fracción lipídica del grano asociado al almacenamiento, oscilando entre el 8,42% y el 13,82% (b.s). Los ácidos grasos insaturados (AGI), entre los que se encuentran los ácidos linoleico y oleico, hacen parte de los más prevalentes en las muestras evaluadas, 34,31% y 10,68%, respectivamente, y juntos se encuentran en mayor proporción que el ácido graso saturado (AGS), el ácido palmítico (39,30%). Aung Moon et al. (2022), reportan disminuciones de los AG durante el almacenamiento y entre más prolongado dieron mayores reducciones de los ácidos grasos esteárico, oleico y

linoleico, con aumento de los ácidos palmítico y araquídico. Estos mayores contenidos de AGS proporcionaron una acidez, fragancia, cuerpo y sabor menos intensos.

La sacarosa presentó valores iniciales promedio de 7,65%, 7,50%, 7,51% y 7,63% en los sitios CF, LT, NA y SM, respectivamente. Las concentraciones de glucosa y fructosa están fuertemente influenciadas por el tipo de procesamiento poscosecha, pero durante el almacenamiento, contenidos relativamente altos de glucosa presentes en el café verde disminuyen notablemente (Selmar et al., 2008). El contenido de cafeína varió entre 1,15% y 1,37%, mientras que la trigonelina entre 0,83% y 0,98%. Por su parte, los ácidos clorogénicos totales (CQA) presentaron valores promedio iniciales de 5,66% en CF, 5,65% en LT, 5,59% en NA y 5,65% en SM. Giulia et al. (2023) evaluaron el almacenamiento prolongado bajo una humedad relativa del 75% en comparación con el 65% en envases ecológicos, los resultados mostraron una estabilidad relativa de las fracciones fenólicas y alcaloides, aunque los isómeros CQA se comportan de forma diferente y se observa una disminución de la cafeína y el ácido cafeico.

A partir del análisis de correlaciones entre las variables químicas y el puntaje total SCA de las muestras se determinaron los compuestos con mayor relación lineal estadística con respecto al puntaje del catador (Tabla 6). Dado que los compuestos más relacionados con el puntaje total del catador son el ácido graso linoleico, la trigonelina y los lípidos, se presentan los estadísticos descriptivos de estos compuestos para cada uno de tiempos de almacenamiento en las dos localidades Letras (LT) y Santa Marta (SM) por ser las más contrastantes en los resultados (Tabla 7).

Tabla 6. Correlación entre compuesto químico y puntaje total SCA de la muestra.

Compuesto	Correlación con puntaje
Ácido graso linoleico (LIN)	0,40
Trigonelina (TRG)	-0,51
Lípidos (LIP)	-0,53

Estimación de la vida útil secundaria

En las muestras provenientes del almacenamiento primario en CF (Cuarto frío) con tiempo inicial de 60 y 120 días de almacenamiento primario y en dos muestreos de almacenamiento secundario (30 y 60 días después de perdido el vacío), no se presentaron defectos sensoriales en la bebida. Un comportamiento contrario se observó en las muestras de 365 días de almacenamiento primario, donde en los tres muestreos secundarios, el 100% de las muestras presentaron defecto reposo. En el sitio LT (Letras), al evaluar las muestras provenientes de los diferentes tiempos de almacenamiento primario 60, 120 y 240 y con almacenamiento secundario a los 30, 60 y 90 días, no se evidenciaron defectos sensoriales. Esto es contrario a lo encontrado en las muestras provenientes del cuarto muestreo de almacenamiento primario (365 días), donde en el tiempo cero del almacenamiento secundario, el 100% de las muestras presentaban defecto sensorial. Borém et al. (2021), reportan estudios donde concluyen que las bolsas herméticas son capaces de conservar la calidad del café verde hasta siete meses de almacenamiento, pero sin diferencia estadística entre los tipos de bolsas (dos o tres capas).

Las muestras almacenadas inicialmente por 60 días en el sitio NA (Chinchiná), durante el almacenamiento secundario hasta los 90

días, no presentaron defectos sensoriales. Por otro lado, las provenientes de 240 y 365 días de almacenamiento inicial, desde el día cero de almacenamiento secundario, el 100% de las muestras tenían defecto sensorial. Por su lado, en el sitio SM (Santa Marta) las muestras provenientes de los tiempos iniciales de almacenamiento de 120, 240 y 365 días, en el tiempo cero, es decir, antes de iniciar el almacenamiento secundario, ya presentaban el defecto reposo. Se observa que el café proveniente de cuarto frío (CF) y Letras (LT) tendría una vida útil total superior en comparación con el proveniente de Santa Marta (SM), debido a las condiciones más favorables para la conservación de las características de calidad en estos dos sitios (Figura 5).

En la Tabla 8, descriptivamente se observa que de forma general el puntaje obtenido después del almacenamiento secundario tiende a ser menor a medida que el tiempo de almacenamiento es mayor. Este tipo de tendencia es más evidente en la localidad Santa Marta (SM) donde las muestras que estuvieron almacenadas inicialmente por 60 días fueron valoradas con 81,2 puntos en promedio y al pasar a un segundo período de almacenamiento el puntaje fue bajando hasta obtener 53,6 puntos en promedio, cuando el segundo tiempo de almacenamiento fue de 90 días.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos de compuestos químicos.

Sitio	Almacenamiento primario (Días)	Almacenamiento secundario (Días)	Ácido graso linoleico			Trigonelina			Lípidos		
			Prom. (%)	Mín. (%)	Máx. (%)	Prom. (%)	Mín. (%)	Máx. (%)	Prom. (%)	Mín. (%)	Máx. (%)
LT	60	0	35,19	35,71	34,26	0,78	0,74	0,83	11,19	10,93	11,51
		30	34,77	35,25	34,01	0,84	0,83	0,86	10,58	10,06	10,88
		60	35,08	35,79	34,24	0,88	0,83	0,93	11,41	11,07	11,85
		90	35,86	36,44	35,39	0,84	0,80	0,88	11,29	11,15	11,55
	120	0	34,63	34,92	34,12	0,87	0,83	0,90	11,34	11,04	11,64
		30	35,95	36,30	35,66	0,84	0,83	0,86	11,09	10,67	11,30
		60	36,65	37,86	35,74	0,84	0,80	0,87	11,06	10,65	11,52
		90	36,77	37,35	36,26	0,88	0,84	0,90	11,28	10,92	11,66
	240	0	37,49	37,95	37,23	0,81	0,78	0,85	11,00	10,57	11,42
		30	33,61	33,69	33,56	0,88	0,85	0,94	11,30	10,94	11,91
		60	33,19	33,86	32,75	0,85	0,82	0,88	11,37	11,26	11,56
		90	32,53	33,05	31,50	0,86	0,82	0,91	11,38	11,01	11,85
	365	0	34,37	34,57	34,05	0,85	0,83	0,89	11,17	11,13	11,25
		30	33,88	34,05	33,70	0,87	0,85	0,90	11,37	11,07	11,54
		60	33,40	34,05	32,83	0,88	0,86	0,91	11,57	11,02	11,86
		90	36,64	37,01	36,26	0,82	0,79	0,87	11,53	11,21	11,72

Continúa...

...continuación.

Sitio	Almacenamiento primario (Días)	Almacenamiento secundario (Días)	Ácido graso linoleico			Trigonelina			Lípidos		
			Prom. (%)	Mín. (%)	Máx. (%)	Prom. (%)	Mín. (%)	Máx. (%)	Prom. (%)	Mín. (%)	Máx. (%)
SM	60	0	36,16	37,58	34,98	0,80	0,78	0,83	11,12	10,82	11,26
		30	33,70	34,09	33,37	0,90	0,88	0,91	11,73	11,12	12,14
		60	33,97	34,95	32,51	0,91	0,88	0,94	11,63	11,58	11,73
		90	35,37	35,69	34,76	0,88	0,87	0,88	11,30	10,96	11,86
	120	0	34,49	34,95	33,69	0,95	0,94	0,96	11,51	10,99	11,78
		30	34,56	34,75	34,33	0,94	0,92	0,97	11,67	11,44	11,92
		60	35,15	35,55	34,39	0,96	0,94	0,99	11,92	11,49	12,40
		90	36,08	37,01	35,48	0,93	0,87	0,96	11,76	11,33	12,30
	240	0	35,62	36,99	34,59	0,99	0,91	1,03	12,53	12,20	13,14
		30	31,17	31,27	30,99	1,00	0,98	1,04	13,38	13,05	13,67
		60	29,96	30,54	28,95	1,03	1,00	1,06	13,45	12,82	13,86
		90	30,63	32,55	28,59	0,98	0,93	1,02	13,18	12,97	13,33
	365	0	31,22	31,89	30,26	1,05	1,04	1,07	13,83	13,35	14,07
		30	30,81	31,16	30,14	1,08	1,06	1,09	14,10	13,87	14,34
		60	30,39	30,72	30,02	1,10	1,08	1,12	14,37	14,10	14,61
		90	33,98	34,25	33,48	1,11	1,10	1,13	14,32	13,78	14,70

Tabla 8. Puntaje total SCA al final del almacenamiento secundario.

Almacenamiento primario (Días)	Almacenamiento secundario (Días)	Tiempo total de almacenamiento (Días)	Letras (LT)	Cuarto frío (CF)	Santa Marta (SM)
			Puntaje promedio	Puntaje promedio	Puntaje promedio
60	0	60	80,6	81,2	81,2
	30	90	81,3	81,3	72,0
	60	120	81,7	80,9	62,3
	90	150	71,6	71,6	53,6
120	0	120	80,3	80,2	62,8
	30	150	79,9	80,3	53,7
	60	180	81,4	81,8	53,7
	90	210	80,7	80,2	53,6
240	0	240	80,4	80,7	53,9
	30	270	80,2	62,8	53,3
	60	300	80,2	53,8	53,6
	90	330	80,1	53,6	53,5
365	0	365	81,4	63,5	53,1
	30	395	53,8	54,1	53,1
	60	425	53,5	53,4	53,0
	90	455	53,5	53,4	53,3

De forma general, se observó el comportamiento de la calidad de la muestra a través del tiempo, a partir del puntaje total SCA. El café que fue almacenado inicialmente por 60 días, puede permanecer hasta 60 días en almacenamiento secundario y alcanzar un puntaje SCA promedio mayor a 80 puntos, excepto en Santa Marta, donde se observa el deterioro inmediato de la calidad tras un mes de almacenamiento secundario (90 días totales), alcanzando un puntaje inferior a 75 puntos. En las localidades

Letras, cuarto frío y Naranjal se observa que todas las muestras almacenadas inicialmente hasta 240 días obtuvieron puntajes superiores a 80 puntos SCA, en promedio. En la Figura 5 se muestra que los puntajes SCA promedio por encima de 70 puntos en todas las localidades, excepto Santa Marta, pueden obtenerse en un tiempo total de almacenamiento máximo alrededor de 240 días. La localidad Santa Marta presenta resultados contrastantes con respecto a los demás sitios de almacenamiento.

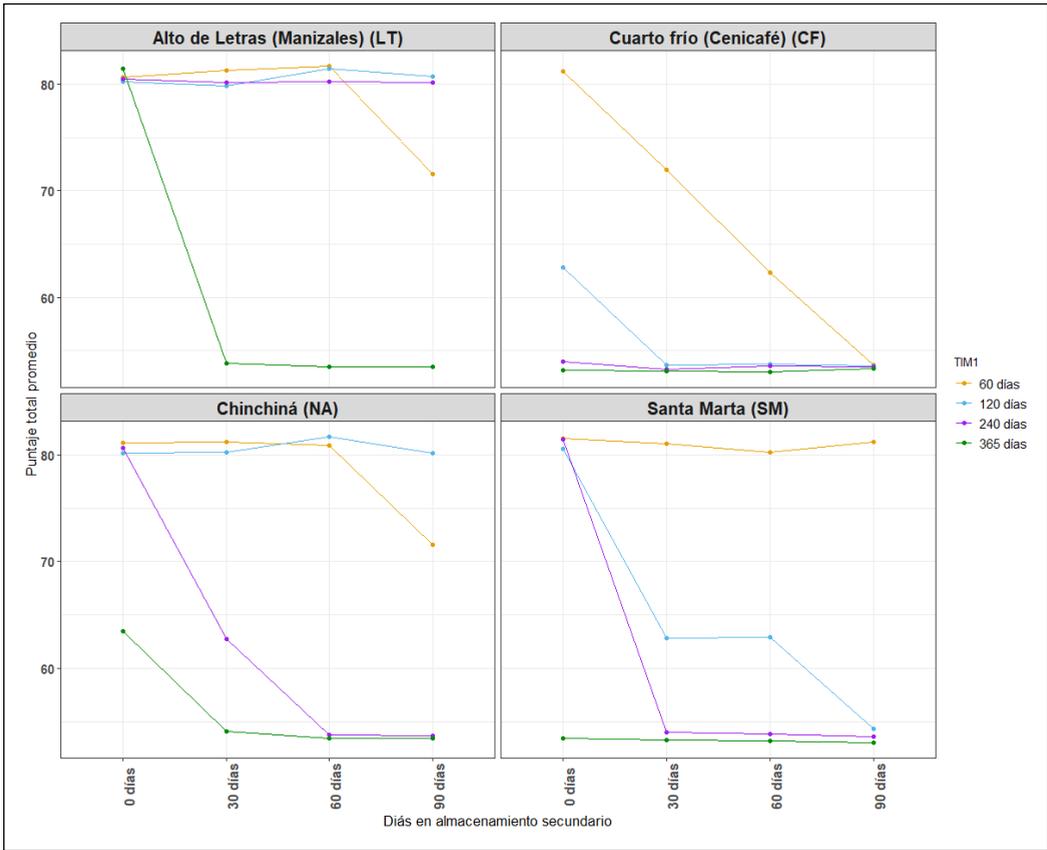


Figura 5. Puntaje total SCA promedio obtenido por las muestras en cada una de las localidades durante el almacenamiento secundario.

Puede concluirse que:

El empaque al vacío se configura como una opción de alta barrera para proteger el café verde de las variaciones de la humedad relativa, evitando incrementos en el contenido de humedad del grano, dada su naturaleza higroscópica, que favorece el intercambio de vapor de agua con el ambiente circundante. Aunque se observó un incremento del contenido de humedad desde el 11,90% hasta valores del 12,50% y de actividad de agua de 0,6146 hasta 0,6709 en los sitios de almacenamiento con mayores temperaturas (T) y humedad relativa

(HR), es evidente el efecto del empaque de alta barrera al vapor de agua desempeña un papel definitivo en la conservación de la humedad, aun en condiciones de alta humedad relativa del ambiente como es Santa Marta (81%).

Las condiciones de almacenamiento definen las respuestas físico-químicas del grano; es así como el almacenamiento primario, bajo condiciones ambientales de SM, generó mayores cambios en los valores de las coordenadas de color L^* y b^* , que pueden relacionarse con el blanqueamiento y amarilleamiento de los granos. El valor máximo promedio de L^*

fue de 83,93 y se encontró en Santa Marta a los 365 días de almacenamiento; mayores temperaturas de almacenamiento favorecen mayores diferencias entre los valores iniciales y finales de L^* (blanco). La alta temperatura también puede ser la respuesta a la aparición más temprana de defectos sensoriales como el reposo. El sitio SM tiene mayor temperatura promedio (28,0 °C) en comparación con la temperatura promedio del sitio LT (10,3 °C). En el sitio SM, a partir de los 120 días, se observó el incremento del porcentaje de muestras con defectos sensoriales con 66,66% y a partir de los 240 el 100%; caso contrario a lo encontrado para el sitio de almacenamiento LT (Letras), donde la calidad sensorial se conservó sin presentar defectos sensoriales, durante los 365 días de almacenamiento primario.

Las variaciones en la aparición de defectos sensoriales de las muestras de café verde en el almacenamiento secundario dependen de los cambios sufridos en el grano por las condiciones iniciales de almacenamiento primario, es decir, un café empacado al vacío no está aislado de las fluctuaciones de la temperatura, lo que indica que mayores temperaturas en el almacenamiento primario tendrán efecto en el inicio de las reacciones químicas que conllevan a la pérdida de compuestos precursores de aroma y sabor característicos del café y a la generación de aquellos relacionados con el deterioro del grano, como el sabor a madera y tierra; defectos desarrollados durante el almacenamiento. Al finalizar el almacenamiento primario (tiempo cero del secundario) el 72,91% de las muestras no presentaron defectos sensoriales, pero este porcentaje fue disminuyendo en los tres tiempos de muestreo posteriores (30, 60 y 90 días) a valores de 45,83%, 41,66%

y 33,33%, respectivamente. En el sitio SM la totalidad de las muestras presentaron defectos sensoriales desde los 60 días de almacenamiento primario, independientemente del tiempo de almacenamiento secundario.

Se utilizó el análisis de riesgo y la distribución de probabilidad de Weibull y la evaluación sensorial de las características sensoriales del café para evaluar la pérdida de calidad durante el almacenamiento y predecir la vida útil del café. Por medio de este análisis se estimó una SL, para para el café empacado al vacío y almacenado en condiciones de $T=20^{\circ}\text{C}$ y $\text{HR}=80\%$ (SM), de 248 días. Un mayor tiempo de SSL en los sitios LT y CF está asociado a condiciones más favorables para la conservación de las características de calidad en estos, por tener menores temperaturas de almacenamiento.

AGRADECIMIENTOS

A Fernando Osorio Rodríguez de Almacafé, Paola Calderón, Wilson Vargas y Víctor Castañeda de la Disciplina de Calidad y a Carlos Gonzalo Mejía, José Farid López y John Félix Trejos del equipo de la Disciplina de Experimentación. Esta investigación fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), código CAL103004.

Contribuciones de los Autores: Conceptualización, metodología, curación de datos, redacción-borrador original, análisis: V.O.P.; Análisis y metodología: C.P.G. y B.E.M.; Redacción- revisión y edición: V.O.P, J.P.U., C.P.G., B.E.M y C.R.G. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

LITERATURA CITADA

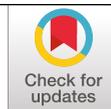
- Abreu, G., Rosa, S., Cirillo, M. A., Malta, M. R., Clemente, A., & Borém, F. M. (2017). Simultaneous optimization of coffee quality variables during storage. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(1), 56–60. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n1p56-60>
- Abreu, G. F., Borém, F. M., Oliveira, L. F. C., Almeida, M. R., & Alves, A. P. C. (2019). Raman spectroscopy: A new strategy for monitoring the quality of green coffee beans during storage. *Food Chemistry*, 287, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.019>
- Abreu, G. F., Rosa, S. D. V. F., Coelho, S. V. B., Pereira, C. C., Malta, M. R., Fantazzini, T. B., & Vilela, A. L. (2023). Influence Of Hulling And Storage Conditions On Maintaining Coffee Quality. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 95(4), e20190612. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202320190612>
- Anokye-Bempah, L., Han, J., Kornbluth, K., Ristenpart, W., & Donis-González, I. R. (2023). The use of desiccants for proper moisture preservation in green coffee during storage and transportation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100478. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100478>
- Aung Moon, S., Wongsakul, S., Kitazawa, H., & Saengrayap, R. (2022). Lipid Oxidation Changes of Arabica Green Coffee Beans during Accelerated Storage with Different Packaging Types. *Foods*, 11(19), 3040. <https://doi.org/10.3390/foods11193040>
- Borém, F. M., Abreu, G. F. D., Alves, A. P. D. C., Santos, C. M. D., & Teixeira, D. E. (2021). Volatile compounds indicating latent damage to sensory attributes in coffee stored in permeable and hermetic packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 29, 100705. <https://doi.org/10.1016/j.foodpack.2021.100705>
- Borém, F. M., Matias, G. C., Alves, A. P. C., Haeblerlin, L., Santos, C. M. D., & Rosa, S. D. V. F. D. (2023). Effect of storage conditions on the chemical and sensory quality of pulped natural coffee. *Journal of Stored Products Research*, 104, 102183. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102183>
- Borém, F. M., Ribeiro, F. C., Figueiredo, L. P., Giomo, G. S., Fortunato, V. A., & Isquierdo, E. P. (2013). Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic packaging. *Journal of Stored Products Research*, 52, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2012.08.004>
- Borém, F. M., Ribeiro, F. C., Figueiredo, L. P., Giomo, G. S., Siqueira, V. C., & Dias, C. A. (2019). Sensory analysis and fatty acid profile of specialty coffees stored in different packages. *Journal of Food Science and Technology*, 56(9), 4101–4109. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03879-3>
- Cardelli, C., & Labuza, T. P. (2001). Application of Weibull Hazard Analysis to the Determination of the Shelf Life of Roasted and Ground Coffee. *LWT—Food Science and Technology*, 34(5), 273–278. <https://doi.org/10.1006/fstl.2000.0732>
- Coradi, P. C., Borém, F. M., Saath, R., & Marques, E. R. (2007). Effect of Drying and Storage Conditions on the Quality of washed coffee. *Coffee Science*, 2(1), 38–47. <https://coffeescience.ufpa.br/index.php/Coffeescience/article/view/37>
- Demianova, A., Bobkova, A., Polakova, K., Jurcaga, L., Bobko, M., Lidikova, J., Mesarosova, A., Belej, E., & Bucko, O. (2023). Moisture content and its possible effect on textural properties and color of green coffee arabica. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 12(5), e9491. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.9491>
- Donovan, N. K., Foster, K. A., & Parra Salinas, C. A. (2019). Analysis of green coffee quality using hermetic bag storage. *Journal of Stored Products Research*, 80, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.11.003>
- Fu, B., & Labuza, T. P. (1997). Shelf-Life Testing: Procedures and Prediction Methods. En M. C. Erickson & Y.-C. Hung (Eds.), *Quality in Frozen Foods* (pp. 377–415). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5975-7_19
- Giulia, S., Eloisa, B., Giulia, R., Gloria, P., Carlo, B., & Erica, L. (2023). Evaluation of the behaviour of phenols and alkaloids in samples of roasted and ground coffee stored in different types of packaging: Implications for quality and shelf life. *Food Research International*, 174, 113548. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113548>
- 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>
- Iamanaka, B. T., Teixeira, A. A., Teixeira, A. R. R., Vicente, E., Frisvad, J. C., Taniwaki, M. H., & Bragagnolo, N. (2014). Potential of volatile compounds produced by

- fungi to influence sensory quality of coffee beverage. *Food Research International*, *64*, 166–170. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.06.017>
- International Organization for Standardization. (2003). ISO 6673:2003—*Green coffee—Determination of loss in mass at 105 degrees C*. <https://www.iso.org/standard/38375.html>
- Król, K., Gantner, M., Tatarak, A., & Hallmann, E. (2020). The content of polyphenols in coffee beans as roasting, origin and storage effect. *European Food Research and Technology*, *246*(1), 33–39. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03388-9>
- Maman, M., Sangchote, S., Piasai, O., Leesutthiphonchai, W., Sukorini, H., & Khewkhom, N. (2021). Storage fungi and ochratoxin A associated with arabica coffee bean in postharvest processes in Northern Thailand. *Food Control*, *130*, 108351. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108351>
- Orfanou, F., Dermesonlouoglou, E. K., & Taoukis, P. S. (2019). Greek Coffee Quality Loss During Home Storage: Modeling the Effect of Temperature and Water Activity. *Journal of Food Science*, *84*(10), 2983–2994. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14756>
- Palacios-Cabrera, H. A., Menezes, H. C., Iamanaka, B. T., Canepa, F., Teixeira, A. A., Carvalhaes, N., Santi, D., Leme, P. T. Z., Yotsuyanagi, K., & Taniwaki, M. H. (2007). Effect of Temperature and Relative Humidity during Transportation on Green Coffee Bean Moisture Content and Ochratoxin A Production. *Journal of Food Protection*, *70*(1), 164–171. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-70.1.164>
- Palareti, G., Legnani, C., Cosmi, B., Antonucci, E., Erba, N., Poli, D., Testa, S., & Tosetto, A. (2016). Impact of storage conditions on fungal community composition of green coffee beans *Coffea arabica* L. stored in jute sacks during one year. *International Journal of Laboratory Hematology*, *38*(1), 42–49. <https://doi.org/10.1111/ijlh.12426>
- Rendón, M. Y., De Jesus Garcia 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>
- Ribeiro, F. C., Borém, F. M., Giomo, G. S., De Lima, R. R., Malta, M. R., & Figueiredo, L. P. (2011). Storage of green coffee in hermetic packaging injected with CO₂. *Journal of Stored Products Research*, *47*(4), 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2011.05.007>
- Specialty Coffee Association. (2003). *Cupping Protocols. Protocols & Best Practices*. <https://sca.coffee/research/protocols-best-practices>
- Selmar, D., Bytof, G., & Knopp, S.-E. (2008). The Storage of Green Coffee (*Coffea arabica*): Decrease of Viability and Changes of Potential Aroma Precursors. *Annals of Botany*, *101*(1), 31–38. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm277>
- Toci, A. T., Neto, V. J. M. F., Torres, A. G., & Farah, A. (2013). Changes in triacylglycerols and free fatty acids composition during storage of roasted coffee. *LWT—Food Science and Technology*, *50*(2), 581–590. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.08.007>
- Tripetch, P., & Borompichaichartkul, C. (2019). Effect of packaging materials and storage time on changes of colour, phenolic content, chlorogenic acid and antioxidant activity in arabica green coffee beans (*Coffea arabica* L. cv. Catimor). *Journal of Stored Products Research*, *84*, 101510. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.101510>
- Zarebska, M., Stanek, N., Barabosz, K., Jaszkievicz, A., Kulesza, R., Matejuk, R., Andrzejewski, D., Bilos, L., & Porada, A. (2022). Comparison of chemical compounds and their influence on the taste of coffee depending on green beans storage conditions. *Scientific Reports*, *12*(1), 2674. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06676-9>

DESCRIPCIÓN DE FACTORES PRODUCTIVOS Y DE PROCESAMIENTO EN FINCAS CON CALIDAD SOBRESALIENTE EN LA ZONA CENTRAL DE COLOMBIA

Jenny Paola Pabón Usaquén *, Valentina Osorio Pérez **, Claudia Patricia Gallego Agudelo *

Pabón, J., Osorio, V., & Gallego, C. P. (2025). Descripción de factores productivos y de procesamiento en fincas con calidad sobresaliente en la zona central de Colombia. *Revista Cenicafé*, 76(1), e76104. <https://doi.org/10.38141/10778/76104>



Se realizó la caracterización de la calidad física, sensorial y química de muestras de café provenientes de 400 fincas ubicadas en 12 departamentos cafeteros de la zona central de Colombia durante los años 2021, 2022 y 2023. De estas, se seleccionaron las 50 mejores fincas. Los criterios de selección empleados fueron: que durante los tres muestreos no hubieran presentado defectos sensoriales y que en la calidad sensorial expresada como puntaje total SCA (Specialty Coffee Association) hubieran obtenido un mínimo de 84 puntos, que clasifica el café como muy bueno. A las fincas seleccionadas se les realizó una visita técnica con el fin de identificar la infraestructura y las condiciones de procesamiento particulares. El valor promedio de puntaje total SCA, en los tres años de muestreo, fue de 82,2 puntos con un máximo de 87,0. Las fincas obtuvieron valores mayores de 75% de almendra sana y menores de 3,0% para defectos físicos. El proceso de beneficio en todas las fincas se realiza por vía húmeda y el 92,5% remueven el mucilago empleando la fermentación espontánea. El 75% de los productores mezclan lotes de café despulpado hasta de tres días diferentes. El 98% tienen la capacidad y la tecnología óptima para realizar el secado y el 75% lo realiza con secado 100% solar. Se resalta en todos los productores el desarrollo de actividades de clasificación durante el proceso de despulpado, del lavado y del secado, lo que permite asegurar la calidad de su café.

Palabras clave: Fincas cafeteras, beneficio por vía húmeda, puntaje SCA, almendra sana.

CHARACTERIZATION OF PRODUCTION AND PROCESSING FACTORS IN OUTSTANDING-QUALITY COFFEE FARMS IN CENTRAL COLOMBIA

A quality characterization was carried out on coffee samples from 400 farms located in 12 coffee-growing departments in the central region of Colombia during the years 2021, 2022, and 2023. From these, the 50 best farms were selected. The selection criteria used for the characterization were: no sensory defects present during the three sampling periods, and a minimum sensory quality score of 84 points according to the SCA (Specialty Coffee Association) scale, which classifies coffee as “very good”. The selected farms were visited for a technical assessment to identify their infrastructure and specific processing conditions. The average SCA score across the three sampling years was 82.2 points, with a maximum of 87. The farms achieved more than 75% healthy beans and less than 3.0% physical defects. All farms used the wet processing, and 92.5% removed the mucilage through spontaneous fermentation. For 75% of the producers, batches of pulped coffee were mixed up to from three different days. 98% had the appropriate capacity and technology for drying, and 75% carried out drying using 100% solar methods. All producers stood out for implementing sorting activities during pulping, washing, and drying processes, ensuring their coffee's quality.

Keywords: Coffee farms, wet processing, SCA score, Bean quality.

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

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



La calidad del café se consolida como el resultado de la combinación de diferentes factores que generan en el grano la acumulación de los compuestos químicos, y que se expresan cuando es tostado (Osorio & Pabón, 2022). Los factores incluyen desde la selección de la especie, la variedad, las condiciones climáticas, el tipo de suelo, las prácticas agronómicas y las prácticas realizadas durante el proceso de beneficio (Osorio, 2021).

El procesamiento o beneficio de los frutos de café, es una etapa clave para obtener el café pergamino seco y poder comercializarlo. El beneficio puede clasificarse en tres vías: natural, semi-seco y lavado. Los naturales también conocidos como procesados por vía seca, incluyen la recolección y secado del fruto directamente, sin retirar las partes que constituyen al grano (Hameed et al., 2018; Osorio et al., 2022). En el beneficio semi-seco se obtienen los denominados *honeys* e implica el despulpado de los frutos y secado (Yulianti et al., 2024). En el procesamiento por vía húmeda o lavado, se obtiene el café pergamino seco y es el más reconocido y utilizado en Colombia; comprende las etapas de recolección, despulpado, remoción de mucílago, lavado y secado (Hameed et al., 2018).

En las etapas del procesamiento por vía húmeda es necesario aplicar prácticas para evitar la generación de defectos en el grano que afectan su calidad (Pabón & Osorio, 2019; Peñuela & Sanz, 2021; Puerta, 2015). Por ejemplo, se recomienda procesar únicamente frutos de café maduros, separando los inmaduros, pintones y secos, para garantizar la buena calidad de la bebida (Osorio et al., 2023; Puerta, 2000). En el proceso de remoción de mucílago, cuando se realiza fermentación espontánea, se recomienda el empleo del Fermaestro™ para estimar el tiempo adecuado de fermentación y garantizar la remoción de mucílago (Peñuela

et al., 2012). Adicionalmente, se recomienda no aplicar fermentaciones prolongadas con frutos de estado de madurez avanzada (Osorio et al., 2024). Además, cuando se emplean máquinas para remover el mucílago y lavar el café, es indispensable calibrar la capacidad de la despulpadora con el desmucilagador y garantizar el flujo de agua durante el lavado (Pabón et al., 2009). En el proceso de lavado, la recomendación es remover los flotes e iniciar el proceso de secado en cuanto sea posible (Pabón & Peñuela, 2016). El secado es una etapa física en la cual debe garantizarse que el grano de café alcance un contenido de humedad entre el 10% y el 12%, sin interrupciones durante el proceso, para evitar la generación de defectos sensoriales, como el grano terroso (Pabón & Osorio, 2022). Adicionalmente, ya sea en secado solar o mecánico, debe evitarse el empleo de altas temperaturas, superiores a 50°C (Cano et al., 2018; Oliveira et al., 2013; Taveira et al., 2015).

Avelino et al. (2005) evaluaron los efectos de la exposición solar y la altitud en la calidad sensorial de cafés procedentes de dos rangos altitudinales de dos zonas de Costa Rica: 1.020–1.250 m (Orosí) y 1.550–1.780 m (Santa María de Dota). En las dos regiones los frutos maduros se procesaron por vía húmeda, con 24 horas de fermentación espontánea, se lavaron y se secaron hasta un 12% de humedad. Los granos fueron clasificados por tamaño (retenidos por encima de la malla 16), antes de los análisis químicos y sensoriales. En cuanto a los resultados en calidad sensorial, determinaron una correlación positiva entre la altitud y la acidez de la bebida del café, en las muestras de café provenientes en la localidad de Orosí. Tieghi et al. (2024) evaluaron la influencia del origen geográfico y el procesamiento poscosecha en la composición química y la calidad sensorial del café *Coffea arabica* proveniente de tres

zonas de Minas Gerais: Cerrado, Matas de Minas y Sul de Minas, en Brasil, con dos tipos de procesamiento (por vía húmeda y por vía seca). El Análisis de Componentes Principales (PCA) indicó que las muestras de la región de Cerrado tendieron a diferenciarse químicamente, exhibiendo niveles más altos de trigonelina y en cuanto a calidad sensorial; las muestras despulpadas (por vía húmeda) obtuvieron una puntuación sensorial promedio significativamente superior en un 1,5% en comparación con los cafés naturales.

La calidad del café puede medirse en cuatro componentes: composición química del grano, calidad física, calidad sensorial y la inocuidad del grano (Osorio, 2021). Los compuestos químicos, como los azúcares (sacarosa, glucosa y fructosa), alcaloides (caféina, trigonelina, teobromina), lípidos, ácidos grasos, ácidos orgánicos, ácidos clorogénicos, entre muchos otros, son determinantes para obtener las particularidades que tiene la bebida del café (Cao et al., 2023).

La calidad física del grano se compone por la humedad en pergamino y en almendra, la cantidad de defectos físicos y la cantidad de almendra sana presente en una muestra. El tamaño del grano se determina por medio de un análisis de granulometría del café almendra. De esta forma se determinan la proporción de defectos físicos, el porcentaje de almendra sana, el factor de rendimiento y el tamaño del grano (Osorio, 2021).

La calidad sensorial del café se determina analizando la muestra y describiendo sus atributos, cualidades o defectos. La metodología más utilizada es la desarrollada por la Asociación de Cafés Especiales (SCA, por sus siglas en inglés). En esta se califican diez atributos: fragancia/aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance, dulzor, taza limpia, uniformidad y puntaje de catador. El

puntaje total es obtenido con la sumatoria de todos los atributos (SCA, Specialty Coffee Association, 2015). Si el puntaje total es mayor o igual a 79 puntos, significa que el café no presenta defecto sensorial y si está entre 80,00-84,99 se clasifica como muy bueno, así como excelente si está entre 85,00-89,99 y, excepcional, si el puntaje total es 90,00 a 100. Si la muestra presenta defecto sensorial, la calificación es menor de 70,00 puntos. Los defectos sensoriales que se presentan con mayor frecuencia pueden agruparse en cuatro grupos: inmaduros, sobrefermentados, terrosos y contaminados (Osorio, 2021).

De las caracterizaciones de la calidad del café realizadas en los departamentos de Caldas en 2015 y 2017 (Pabón et al., 2021; Puerta & Pabón, 2018), en Huila los años 2016 al 2018 (Osorio et al., 2021) y en Cesar durante los años 2021 y 2022 (Echeverri & Osorio, 2024), a muestras de caficultores seleccionados de forma aleatoria, se reportaron con defectos sensoriales el 24,84% para Caldas, 24,21% para Huila y 22,80% para Cesar. Los defectos sensoriales más recurrentes fueron: fermento (6,25%), inmaduro (5,39%), reposo (4,45%) y terroso (3,58%).

En la caracterización del café que se realizó en 400 fincas de los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Casanare, Chocó, Cundinamarca, Meta, Norte de Santander, Risaralda, Santander, Tolima y Valle del Cauca, se analizaron las cuatro dimensiones (física, sensorial, química e inocuidad), en 1.010 muestras de café pergamino seco, procesadas por los caficultores durante las cosechas de los años 2021, 2022 y 2023. Del total de las muestras recibidas, el 97,8% correspondieron a variedades resistentes como Castillo®, Colombia, Cenicafé 1 y Tabi. El 60% de las muestras no presentaron defectos sensoriales, mientras que los defectos que

se identificaron en mayor proporción fueron fermento (14%) y el terroso (13%), los cuales son indicadores de prácticas inadecuadas en el procesamiento. Los ecotopos 101A de Antioquia, 308A y 309A en Santander y 102A en Chocó se destacaron en calidad sensorial porque obtuvieron puntajes superiores a 85,00 puntos SCA, clasificando estos cafés como de excelente calidad. El análisis de clasificación reveló cuatro rangos altitudinales (menos de 1.000 m, 1.001-1.400 m, 1.401-1.800 m y más de 1.800 m), que permiten explicar las variables de calidad y composición química. Se observó que las muestras obtenidas a altitudes menores a 1.000 m presentaron mayores valores de almendra sana, mientras que las de altitudes superiores a 1.800 m tuvieron granos de mayor tamaño. No se observó un efecto significativo del rango altitudinal sobre el puntaje total SCA. Por otro lado, los contenidos de lípidos, cafeína, trigonelina y del ácido graso palmítico fueron más altos en las muestras provenientes de altitudes superiores a 1.400 m, mientras que los niveles de sacarosa y ácido graso linoleico aumentaron en altitudes superiores a 1.800 m (Pabón, 2024).

Con el objetivo de caracterizar las fincas que no presentaron defecto sensorial durante todos los muestreos, se analizó la información y se seleccionaron 50 fincas. Como criterios de selección se escogieron las fincas que durante tres muestreos no presentaron en su café defecto sensorial y que obtuvieron al menos una vez calificaciones mayores a 84,00 puntos en la escala SCA. A continuación, se presentan las características de producción y del sistema de beneficio de estas 50 fincas que en su café obtuvieron calificaciones sobresalientes en calidad sensorial. Con estos resultados se contribuye a identificar los factores clave involucrados en la buena calidad y las puntuaciones sensoriales superiores en el café.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de fincas. Se realizó de acuerdo con los resultados obtenidos de la caracterización del café, en 400 fincas seleccionadas de forma aleatoria durante los años 2021, 2022 y 2023 de los departamentos de Caldas, Antioquia, Casanare, Chocó, Cundinamarca, Boyacá, Santander, Norte de Santander, Risaralda, Meta, Tolima y Valle del Cauca. Estos departamentos están ubicados en el rango latitudinal de 3°N a 7°N, que coincide con la zona central cafetera del país.

Se seleccionaron 50 fincas con resultados de calidad sobresaliente. La caracterización se realizó durante los años 2021, 2022 y 2023, y se obtuvieron 1.010 muestras de café pergamino seco procesadas por los productores. De cada año de muestreo, se descartaron las muestras provenientes de las fincas en las que se hubiera presentado defecto sensorial, asegurando que las muestras sin defectos provenientes de las fincas fueran consistentes durante las tres cosechas. Posterior a esto y con las fincas que obtuvieron un puntaje total mayor a 80,00 puntos, se clasificaron y ordenaron por el mayor puntaje total SCA, seleccionando de esta manera las 50 fincas.

Las fincas están ubicadas en el rango latitudinal de 3°N a 7°N, distribuidas en 18 ecotopos cafeteros. Un ecotopo cafetero, es una zona con continuidad geográfica con condiciones predominantes de clima y suelo relativamente homogéneas (Gómez et al., 1991).

Sistema productivo fincas. Con la información del Sistema de Información Cafetera (SICA), que es una base de datos dinámica y georreferenciada con gran cobertura, gestionada por el Servicio de Extensión de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, fue posible identificar las variables asociadas al sistema productivo de la finca, como la variedad, altitud, área total y área del cultivo de café.

VARIABLES CLIMÁTICAS. En la Plataforma Agroclimática Cafetera (Sarmiento et al., 2022), gestionada y administrada por la disciplina de Agroclimatología de Cenicafé, se obtuvo la información histórica anual para cada finca, de las variables de precipitación (mm) y temperaturas media, máxima y mínima (°C).

Calidad sensorial. Los análisis sensoriales se llevaron a cabo siguiendo la metodología SCA. Las muestras de café almendra, libres de defectos físicos, fueron procesadas en una tostadora de muestras marca Probat, comenzando a una temperatura de 200°C ($\pm 10^\circ\text{C}$) durante un tiempo entre ocho y doce minutos, hasta alcanzar un punto de tueste medio y un color correspondiente a 55 en la escala Agtron/SCA. Las muestras fueron tostadas al menos ocho horas antes de realizar el proceso de catación. El panel de catadores estuvo compuesto por cinco profesionales certificados Q-Grader por el Coffee Quality Institute (CQI).

Calidad física. Los análisis de calidad física se realizaron en los laboratorios de Cenicafé teniendo como base las Normas Técnicas Colombianas – ICONTEC y los procedimientos estandarizados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Se determinó la humedad del grano (Norma de referencia ISO 6673/NTC 2325), utilizando el equipo Kett PM450. Se cuantificaron los porcentajes de almendra sana, que es la cantidad de granos sin defectos físicos, y se cuantificó el factor de rendimiento (Norma de referencia ICONTEC NTC 5938). Para caracterizar el tamaño del café almendra se realizó el análisis granulométrico, empleando las mallas desde la 17 hasta la 12. Cada malla tiene una medida específica que, según el tamaño del grano, permite que este sea retenido o no.

Procesamiento poscosecha. Para evaluar los procesos de poscosecha realizados por los productores, se diseñó una guía estructurada de verificación, basada en un marco de preguntas clave. La construcción de la guía tuvo las siguientes etapas:

1. Revisión de literatura y validación de criterios. Se identificaron estándares técnicos, normativos y estudios previos sobre buenas prácticas de poscosecha. Los criterios se seleccionaron en función de su relevancia para calidad, pérdidas, manejo y aprovechamiento de subproductos.
2. Formulación de preguntas. Las preguntas se organizaron por etapas del proceso. Cada ítem buscaba verificar el cumplimiento de prácticas mínimas.
3. Validación de expertos. La guía fue discutida y evaluada por los investigadores de la disciplina de Calidad para verificar claridad y pertinencia (validez de contenido).

La guía definitiva incluyó 46 preguntas agrupadas en diez categorías, con la cual se tomaron las observaciones en el campo. Dentro de las categorías se logró obtener información, sobre la recolección y las condiciones de la materia prima, equipos de despulpado y clasificación, proceso de remoción de mucilago, tiempos de proceso, lavado e infraestructura y tipos de secado.

Análisis de la información

Esta investigación fue de tipo descriptiva. Para todas las variables de interés, se realizó análisis descriptivo, estimando los valores promedio, máximo y mínimo, para describir los factores productivos y de procesamiento de las fincas seleccionadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fincas seleccionadas por calidad sensorial

En la Tabla 1 se presenta la cantidad de las fincas seleccionadas por municipio, departamento y ecotopo. Las fincas seleccionadas están ubicadas en diez de los 12 departamentos que participaron en el proyecto de caracterización de la calidad de café producido en la zona central del país, desarrollado durante los años 2021, 2022 y 2023. Las fincas ubicadas en los municipios de La Belleza (Santander),

Abriaquí y Tarso (Antioquia), y Marulanda (Caldas), que participaron en el proyecto de caracterización de calidad, también fueron seleccionadas para la caracterización del sistema de producción y procesamiento.

Características productivas de las fincas seleccionadas

De las muestras de las 50 fincas seleccionadas, el 93,90% provenían de variedades resistentes y el 6,12% de variedades susceptibles como Caturra (Figura 1).

Tabla 1. Departamentos, municipios y ecotopos de las fincas seleccionadas.

Departamento	Fincas	Municipios	Ecotopos
Antioquia	7	Abriaquí, Andes, Cañasgordas, Cocorná, Jardín, Tarso y Urrao.	101A, 105B y 205B
Caldas	13	Aguadas, Anserma, Chinchiná, Manizales, Marulanda, Pácora, Pensilvania, Riosucio y Villamaría.	106B, 107B, 204A, 205B, 206A, 206B y 207A.
Casanare	1	Támara	305B
Chocó	1	Carmen de Atrato	102A
Cundinamarca	1	San Cayetano	310A
Norte de Santander	3	Cáchira	302A
Risaralda	6	Apia, Mistrató, Pueblo Rico y Santa Rosa de Cabal.	102A, 107B y 207A
Santander	13	Curití, Florián, Guadalupe, Guavatá, La Belleza, Matanza, Puente Nacional, Suaita y Valle de San José.	302A, 305A, 307A, 308A y 309A.
Tolima	3	Casabianca, Falan y Fresno	206B
Valle del Cauca	2	El Águila	108B
Total	50	37	18

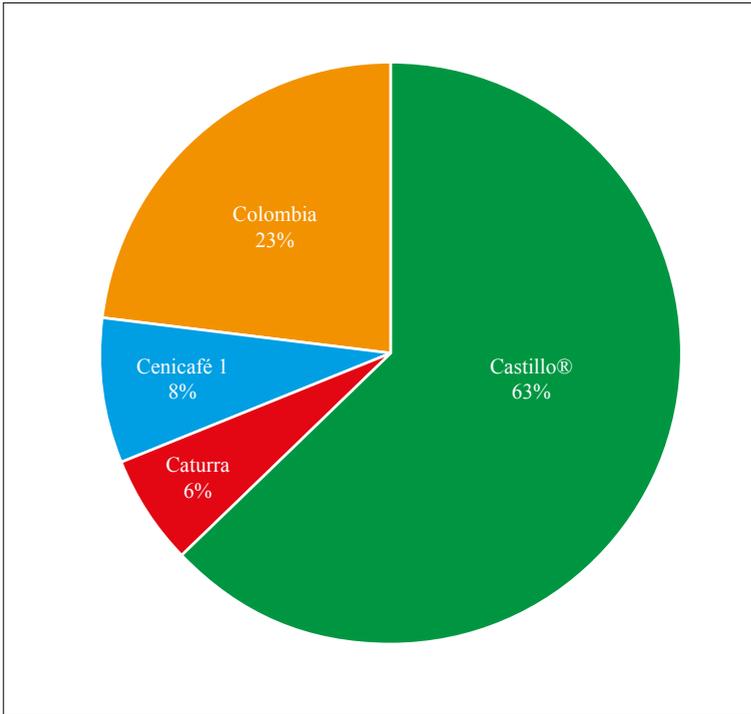


Figura 1. Porcentaje de variedades sembradas en las fincas seleccionadas por calidad sensorial.

En la Tabla 2 se presentan los promedios del tamaño y la edad del cultivo de café de las fincas que fueron seleccionadas. En general, el tamaño promedio de las fincas fue de 5,51 ha, con valores máximos de hasta 60 ha. En cuanto a la edad del cultivo, las fincas seleccionadas tuvieron en promedio 5,4 años, valores máximos de 13,7 y mínimo de 1,0 año. En el ecotopo 205B de los departamentos de Antioquia y Caldas, se encontraban las fincas con los cultivos con edades mayores a diez años.

En cuanto al área en café en las fincas, el 94,0% tenían menos de 5,0 ha de café, como se presenta en la Figura 2. Resaltan los ecotopos 101A y 206A, en los cuales había fincas de mayor tamaño, con 11,7 ha y 12,63 ha, respectivamente; excluyendo esos

dos ecotopos, los valores promedio del área de los predios fue de 1,36 ha.

El 87,5% de las fincas estaban ubicadas por encima de 1.400 metros de altitud (Tabla 3). En los ecotopos 101A, 105B, 204A, 305A y 308A, 100% de las fincas estaban ubicadas por encima de 1.600 m. En cuanto a la posición latitudinal, las fincas que participaron en el proyecto fueron seleccionadas de forma aleatoria en un rango latitudinal de 3° a 7°. El 59,18% de las fincas seleccionadas por calidad, están ubicadas en un rango latitudinal de 5° y 6°.

En la Figura 2, se presenta por rango altitudinal y por cada ecotopo, la ubicación de las 50 fincas seleccionadas.

Tabla 2. Valores promedio, máximo y mínimo de las áreas totales de las fincas y el área en café, por cada ecotopo.

Ecotopo	Área total (ha)			Edad del cultivo (años)		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
101A	16,85	60,00	2,00	4,4	5,7	2,8
102A	2,31	3,50	1,20	5,7	11,2	1,9
105B	3,75	5,50	2,00	4,1	4,2	4,0
106B	1,17	1,92	0,68	6,2	13,7	1,0
107B	1,55	2,42	0,64	4,9	5,7	4,2
108B	3,27	4,00	2,54	4,5	5,4	3,6
204A	5,95	10,89	1,00	7,2	9,5	4,9
205B	1,25	2,00	0,50	12,2	12,7	11,7
206A	15,43	27,92	2,93	2,6	2,8	2,5
206B	2,58	4,80	1,00	5,3	9,1	2,3
207A	7,81	24,93	1,55	3,7	4,7	2,2
302A	8,56	15,00	4,00	7,0	10,5	4,4
305A	3,73	4,00	3,20	5,1	6,0	4,1
305B	8,59	8,59	8,59	3,5	3,5	3,5
307A	0,73	1,00	0,45	7,5	10,4	4,7
308A	3,33	3,50	3,00	4,4	5,7	3,4
309A	3,67	5,00	3,00	4,5	5,5	3,5
310A	2,00	2,00	2,00	4,0	4,0	4,0
General	5,51	60,00	0,45	5,4	13,7	1,0

Tabla 3. Porcentaje de fincas según rango altitudinal (m).

Ecotopo	Departamento	Menor 1.000	1.001 – 1.200	1.201 – 1.400	1.401 – 1.600	1.601 – 1.800	Mayor 1.800
101A	Antioquia					75,0%	25,0%
102A	Chocó y Risaralda				66,7%	33,3%	
105B	Antioquia					50,0%	50,0%
106B	Caldas				33,3%	66,7%	
107B	Caldas y Risaralda			33,3%	33,3%		33,3%
108B	Valle del Cauca				50,0%		50,0%
204A	Caldas					50,0%	50,0%
205B	Antioquia y Caldas	25,0%		50,0%			
206A	Caldas				100,0%		
206B	Caldas y Tolima			25,0%	50,0%	25,0%	
207A	Caldas y Risaralda				50,0%	50,0%	
302A	Norte de Santander y Santander		20,0%	20,0%	40,0%	20,0%	
305A	Santander					66,7%	33,3%
305B	Casanare	25,0%					
307A	Santander		50,0%		50,0%		
308A	Santander					33,3%	66,7%
309A	Santander				66,7%	33,3%	
310A	Cundinamarca				100,0%		
General		4,1%	4,1%	8,2%	34,7%	32,7%	16,3%

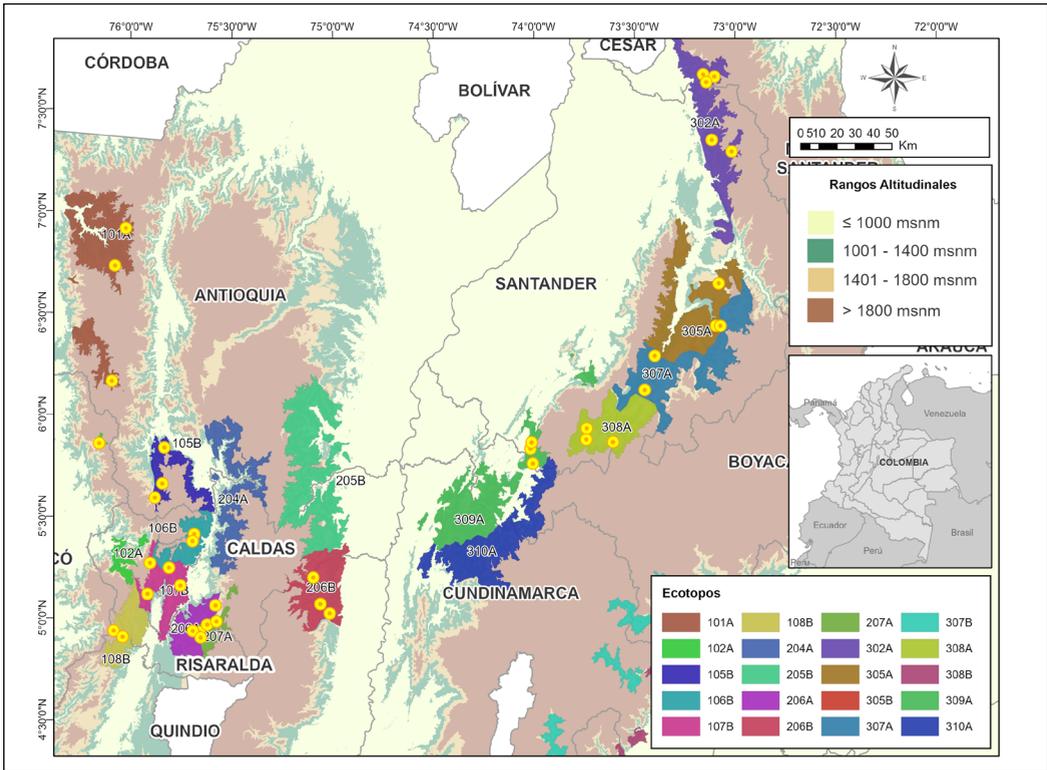


Figura 2. Ubicación de las fincas seleccionadas y los rangos altitudinales.

Condiciones climáticas de las fincas seleccionadas. Los muestreos se realizaron durante los años 2021, 2022 y 2023. En la Figura 3 se presentan los rangos de precipitación anual. Las fincas ubicadas en los departamentos de Antioquia y Caldas del ecotopo 205B, presentaron valores mayores a 4.330 mm. En general, en promedio la temperatura fue de 19,9°C con un mínimo de 15,7°C (Tabla 4).

En la Figura 4, se presenta la ubicación de las fincas y la temperatura media promedio de cada lugar y su ecotopo correspondiente.

Calidad sensorial. En la Tabla 5, se presentan los valores promedio del puntaje total SCA obtenido por las fincas por ecotopo, en los tres muestreos. En general, el promedio de

las muestras de café fue de 82,2 puntos, que según la escala SCA se clasifican como muy buenas. El máximo valor, 87 puntos SCA, se obtuvo en una finca del ecotopo 101A ubicada en el municipio de Urrao del departamento de Antioquia.

Con relación a los descriptores de los atributos de fragancia/aroma y sabor (Figura 5), se presentan los descriptores que las catadoras reportaron para las 1.110 muestras del proyecto (a) y los descriptores que se obtuvieron en las 50 fincas seleccionadas. Se evidencia que en los descriptores de las fincas seleccionadas por calidad sensorial (Figura 5b) se incrementa la frecuencia de los descriptores relacionados con frutales, frutos amarillos, frutos rojos y florales.

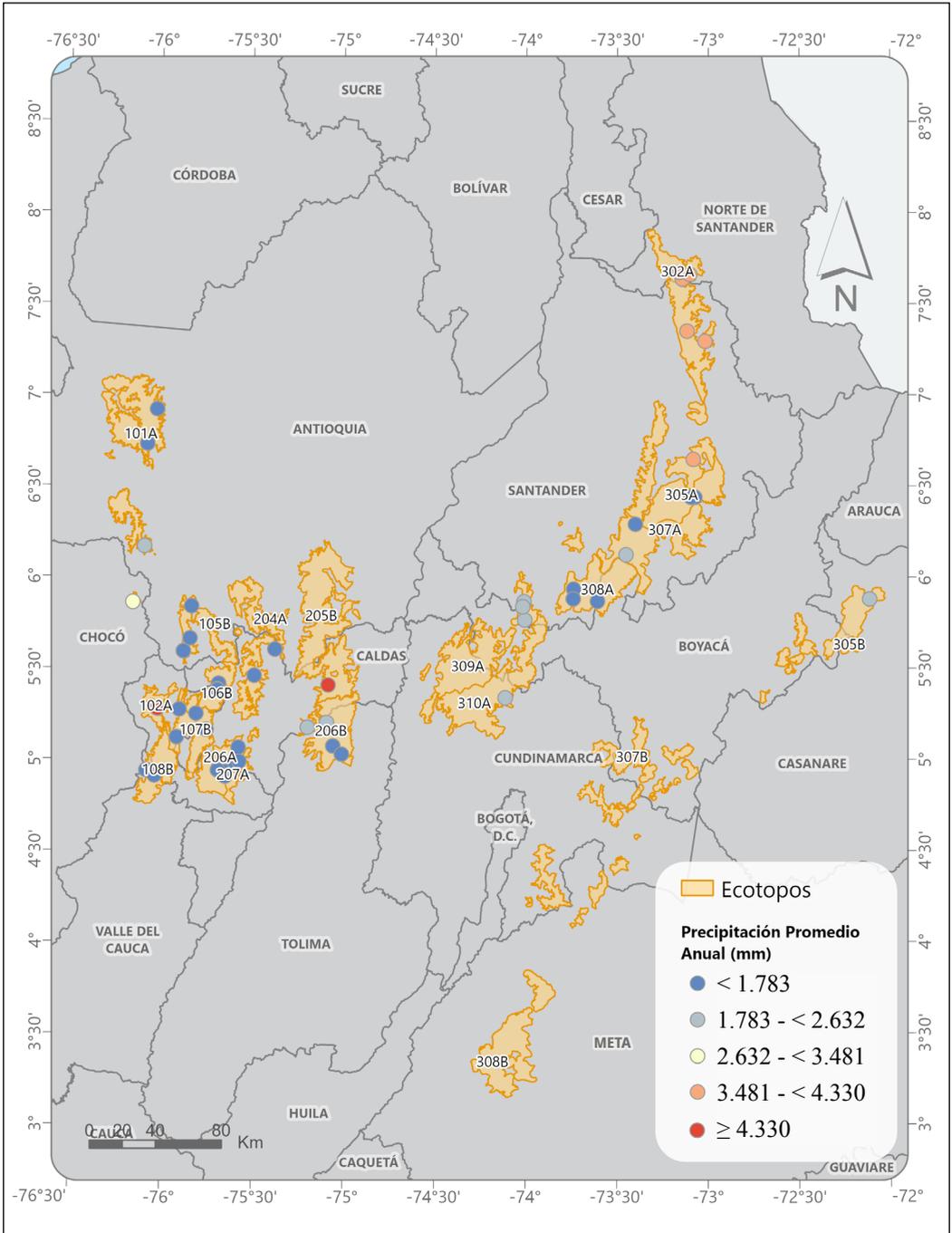


Figura 3. Rango de valores promedio anuales de la precipitación en las fincas seleccionadas.

Tabla 4. Valores promedio máximo y mínimo de las temperaturas anuales de las fincas seleccionadas.

Departamentos	Ecotopos	Temperatura (°C)		
		Promedio	Mínimo	Máximo
Antioquia	101A	19,4	14,5	24,2
Chocó y Risaralda	102A	19,6	15,5	24,0
Antioquia	105B	19,5	15,6	25,2
Caldas	106B	19,3	16,0	25,0
Caldas y Risaralda	107B	20,0	16,4	25,7
Valle del Cauca	108B	19,2	15,6	24,7
Caldas	204A	19,6	15,8	25,3
Antioquia y Caldas	205B	21,9	17,9	26,0
Caldas	206A	20,6	15,9	26,1
Caldas y Tolima	206B	20,1	16,3	24,8
Caldas y Risaralda	207A	19,7	15,8	25,3
Norte de Santander y Santander	302A	20,9	16,9	25,4
Santander	305A	18,9	14,0	25,3
Casanare	305B	22,8	18,8	27,9
Santander	307A	21,7	15,9	26,8
Santander	308A	17,6	12,9	23,8
Santander	309A	20,0	15,8	24,8
Cundinamarca	310A	20,5	16,3	25,6
	General	19,9	15,7	25,1

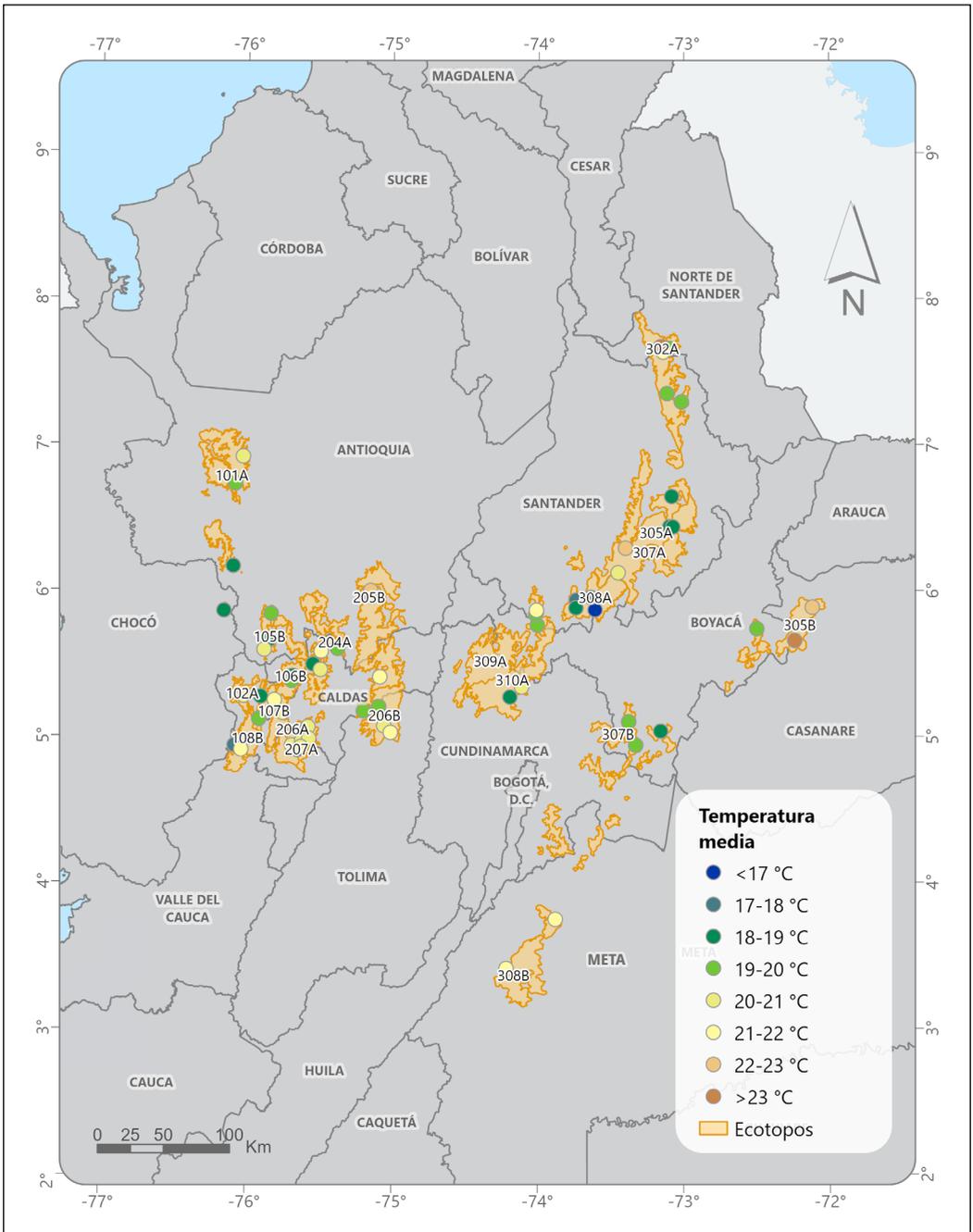


Figura 4. Valores de temperatura media de las fincas seleccionadas.

Tabla 5. Valores promedio, máximo y mínimo del puntaje total de las fincas seleccionadas.

Ecotopos	Departamentos	Promedio	Máximo	Mínimo
101A	Antioquia	82,66	87,00	80,50
102A	Chocó y Risaralda	81,93	86,05	80,33
105B	Antioquia	81,81	84,25	80,50
106B	Caldas	82,14	84,25	80,50
107B	Caldas y Risaralda	82,21	84,25	80,50
108B	Valle del Cauca	82,18	84,54	80,75
204A	Caldas	81,92	84,25	80,50
205B	Antioquia y Caldas	82,26	84,25	80,75
206A	Caldas	81,92	84,25	80,50
206B	Caldas y Tolima	82,31	85,00	80,25
207A	Caldas y Risaralda	83,00	84,30	80,50
302A	Norte de Santander y Santander	81,86	84,37	80,27
305A	Santander	81,94	84,75	80,50
305B	Casanare	82,06	85,00	80,25
307A	Santander	81,86	84,68	80,25
308A	Santander	82,12	85,25	80,27
309A	Santander	82,38	86,00	80,40
310A	Cundinamarca	82,74	85,05	80,44
General		82,20	87,00	80,25

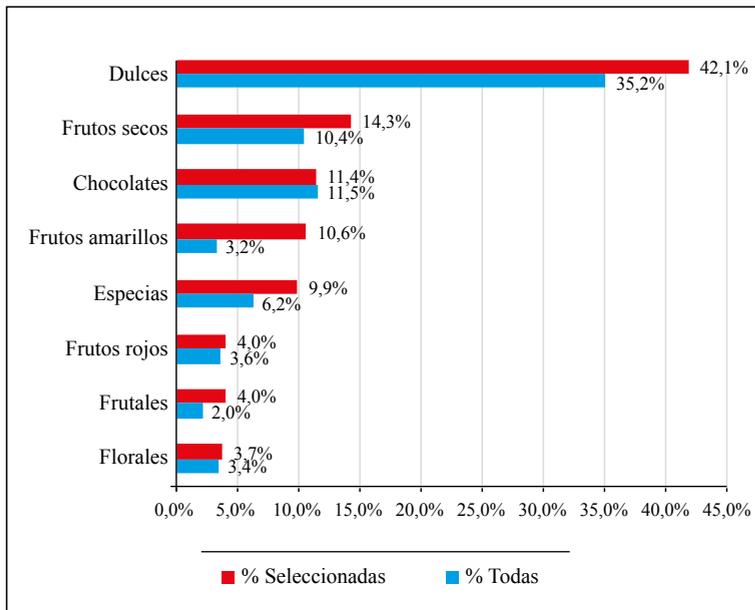


Figura 6. Porcentaje de frecuencia de los grupos de descriptores sensoriales para las muestras analizadas.

Calidad física. La humedad del café almendra de las muestras fue en promedio de 11,36% y todas estuvieron dentro del rango del 10% al 12%. Según el análisis de granulometría, las muestras provenientes de las fincas seleccionadas, el 87,3% se retuvo por encima de la malla 16. El grano supremo se identifica porque es retenido por encima de la malla 17. Se destacan las muestras de las fincas seleccionada ubicadas en los ecotopos: 105B, 106B, 207A, 302A y 307A, que obtuvieron muestras de café con más del 75% retenido por encima de la malla 17 (Tabla 6).

En la Tabla 7 se presentan los valores promedio de granos con defectos físicos que se denominan pasillas, así como la almendra sana. El promedio para las muestras seleccionadas de café fue de 77,29%; para clasificar el café como de buena calidad el valor mínimo de almendra sana debe ser de 75%. En promedio, todas las fincas seleccionadas obtuvieron valores mayores de

75% para esta variable, indicando además de buena calidad sensorial, la buena calidad física de las muestras seleccionadas. Las fincas ubicadas en el ecotopo 205B obtuvieron mayores valores de pasillas y de esta forma menores valores de almendra sana. Este ecotopo además presentó las fincas con cultivos de mayor edad (Tabla 2), en los cuales además de tener menores producciones (Rendón & Salazar, 2025), la calidad física es menor (Rendón, 2021).

Caracterización del procesamiento poscosecha. En todas las fincas seleccionadas se realiza el proceso de beneficio por vía húmeda. Sarmiento et al. (2025) reportaron que existe un impacto significativo del procesamiento poscosecha en la calidad del café, cuando identificaron que las muestras de café, despulpados o procesados por vía húmeda, obtuvieron puntuaciones superiores en calidad sensorial, en comparación con los procesados por vía seca.

Tabla 6. Valores promedio de los porcentajes de granos retenidos por cada malla y por cada ecotopo.

Ecotopos	Mayor a malla 17 (%)	Malla 16 (%)	Malla 15 (%)	Malla 14 (%)	Malla 13 (%)	Menor malla 12 (%)
101A	65,1%	18,6%	9,9%	4,6%	0,9%	0,9%
102A	65,6%	18,6%	10,1%	4,3%	0,7%	0,7%
105B	80,8%	11,7%	5,2%	1,5%	0,2%	0,4%
106B	75,7%	14,2%	6,4%	2,5%	0,4%	0,7%
107B	74,1%	14,4%	7,1%	2,7%	1,1%	0,6%
108B	73,3%	15,8%	7,1%	2,9%	0,3%	0,6%
204A	73,1%	16,4%	6,7%	2,8%	0,5%	0,6%
205B	67,0%	16,3%	10,4%	4,5%	0,6%	1,1%
206A	62,2%	20,0%	10,7%	5,2%	0,6%	1,2%
206B	66,5%	18,9%	9,4%	4,0%	0,6%	0,7%
207A	75,1%	15,6%	6,4%	2,3%	0,2%	0,4%
302A	77,4%	14,1%	6,1%	1,8%	0,3%	0,3%
305A	63,0%	22,2%	8,8%	4,3%	0,6%	1,0%
305B	61,5%	23,9%	11,0%	3,1%	0,2%	0,3%
307A	75,5%	15,7%	5,3%	2,7%	0,2%	0,6%
308A	61,9%	23,9%	9,3%	3,6%	0,3%	0,9%
309A	64,7%	18,7%	9,9%	5,0%	0,6%	1,0%
310A	72,1%	17,4%	7,2%	2,8%	0,3%	0,2%
General	13,8%	56,1%	17,4%	8,1%	3,4%	0,7%

Tabla 7. Valores promedio y desviación estándar de los granos pasilla, negros y vinagres, granos brocados y porcentaje de almendra sana, para las fincas seleccionadas por ecotopo.

Ecotopos	Pasilla (%)		Granos negros y vinagres (%)		Granos brocados (%)		Almendra sana (%)	
	Prom	Desvest	Prom	Desvest	Prom	Desvest	Prom	Desvest
101A	2,02	1,45	0,30	0,42	1,83	2,56	77,92	3,55
102A	3,12	1,91	0,35	0,53	2,96	2,77	76,21	3,23
105B	4,11	5,56	0,78	0,92	0,57	0,63	77,32	5,66
106B	2,84	1,74	0,66	0,55	3,16	2,80	77,24	3,42
107B	3,08	1,55	0,15	0,20	2,52	2,51	76,21	2,53
108B	2,27	1,60	0,29	0,46	1,67	1,17	78,11	1,54
204A	1,91	0,97	0,16	0,17	0,97	0,99	79,56	3,17
205B	3,46	2,14	1,29	1,46	1,53	1,56	75,41	4,79
206A	2,35	2,16	0,46	0,48	3,13	3,30	77,07	5,49
206B	2,59	1,98	1,00	1,87	1,25	1,09	74,90	5,81
207A	1,45	0,86	0,42	0,68	2,90	2,81	78,32	3,26
302A	1,88	2,64	0,77	1,39	0,82	0,83	79,86	3,13
305A	2,73	1,08	0,31	0,32	1,76	1,52	78,34	2,76
305B	2,08	0,96	0,73	1,09	1,81	1,62	81,34	1,00
307A	2,09	1,70	0,72	1,11	1,48	1,20	78,79	1,62
308A	3,32	2,31	0,59	0,76	2,29	4,20	75,99	4,21
309A	3,39	2,45	1,20	0,44	2,50	2,57	76,09	3,76
310A	1,41	0,13	0,33	0,31	1,54	0,13	78,76	0,92
General	2,56	2,12	0,59	0,91	1,96	2,29	77,51	3,83

En la visita técnica realizada en compañía del Servicio de Extensión de la FNC, se observó directamente el proceso y se aplicó la encuesta diseñada para tal fin. Con la consolidación de los datos de las 50 fincas pudo obtenerse la siguiente información, que se agrupó por etapa del beneficio.

Recolección. En las fincas con menos de 1,0 ha, que corresponden al 42,8%, los mismos propietarios con su grupo familiar se encargan de realizar el proceso de recolección, la cual realizan de forma manual y procurando recolectar únicamente frutos maduros. El 57,2% restante, contrata trabajadores en épocas de cosecha para realizar la recolección.

Clasificación de frutos. En cuanto a la clasificación de los frutos de café después de la recolección, el 68,4% de los productores realizan esta práctica. La mayoría lo hacen por medio de clasificación hidráulica, separando el material de menor densidad, como granos

brocados, granos vanos, hojas, entre otros. Solo dos productores realizan clasificación manual, separando los frutos por estado de madurez.

Despulpado. El 47,5% de los productores realizan el proceso de despulpado el mismo día de recolección, empleando máquinas despulpadoras que van desde 300 hasta 1.200 kg h⁻¹ de café cereza. Los productores que no hacen el despulpado el mismo día, realizan la práctica de reservar los frutos en la misma tolva de recibo o en estopas y los dejan hasta 24 horas antes de despulparlos.

Clasificación del café despulpado. En el 87,5% de las fincas realizan el proceso de clasificación por tamaño del café despulpado. De este grupo, el 62,86% poseen zaranda plana y el 37,14% tienen zaranda circular (Figura 7). Con estos sistemas se logra separar cáscara y frutos inmaduros y/o pintones que no se despulpan.



Figura 7. Sistemas de clasificación del café despulpado. a. Zaranda cilíndrica; b. Zaranda plana.

Remoción de mucílago. El 92,5% emplean la fermentación espontánea como método para remover el mucílago del café. Los que utilizan el desmucilaginado mecánico, corresponden también a las fincas de más de 10 ha de café. En la Figura 8 se presentan los desmucilaginosos más usados; algunos con el sistema tipo DESLIM (Figura 8b) con agitadores de sección cuadrada y desmucilaginosos con agitadores de varillas (Figura 8a). En una finca el proceso lo realizaban con un equipo de lavado mecánico (Figura 8c).

En las fincas que se practican el proceso de fermentación espontánea se utilizan tanques construidos en diferentes materiales, resaltan los tanques plásticos con el 26% (Figura 9). En cuanto al control de la duración del proceso de fermentación, dos productores empleaban el Fermaestro™. El 75,0%, aplican la práctica de mezclar lotes de café despulpado hasta tres días, antes de lavarlo. Los demás estiman el tiempo de fermentación, según la prueba del tacto,

en la cual se toma una muestra de la masa lavada y frotada, confirmando la ausencia de mucílago.

Lavado. El 92,5% hacen lavado de forma manual, agregando agua hasta que cubra la capa de café en punto de lavado y empleando paletas para agitarla, se descarta el agua y se repite de dos a tres veces este procedimiento hasta asegurar, tocando el café, que esté bien lavado. Todos emplean prácticas de clasificación: hidráulica, separando los granos vanos muy brocados que son de menor densidad, y por tamaño, empleando zarandas planas principalmente.

Secado. Los caficultores realizan el proceso de secado en sus fincas, empleando tecnologías para el secado solar y de secado mecánico. Las fincas cuentan con la infraestructura y equipos necesarios para desarrollar el proceso de secado y no presentan insuficiencias de tecnologías de secado, evitando demoras o interrupciones del proceso.



Figura 8. Desmucilaginosos mecánicos para remover el mucílago del café. a. Desmucilaginoso de varillas; b. Desmucilaginoso tipo DESLIM; c. Lavador mecánico de café con mucílago degradado.



Figura 9. Tipos de tanques empleados para realizar la fermentación espontánea en las fincas seleccionadas. a. Plásticos (26%); b. Recubiertos con mayólica (20%); c. Acero inoxidable (5%); d. Recubierto con cerámica (26%); e. Tanque sin recubrimiento (23%).

El 70% de los caficultores utiliza el secado solar como alternativa para obtener los granos de café pergamino seco, empleando marquesinas (52,5%), casa heldas (22,5%), secadores parabólicos (20,0%) y patios (5,0%). (Figura 10).

Los que emplean el secado mecánico, usan silos de capa estática de 7,0 @ de cps, hasta silos de gran formato como de 600 @ de cps (Figura 11). La mayoría tienen silos de baja capacidad y realizan la práctica de secado combinado, que consiste en iniciar con secado solar con el café lavado con alto contenido de humedad, y finalizar con el secado mecánico.

Almacenamiento. En cuanto al almacenamiento del café pergamino seco, el 88% de productores en sus fincas tienen un área destinada para almacenar el café pergamino seco y evitan la entrada a animales que podrían contaminar el producto. Además, el 92,5% destinan este espacio o bodega únicamente para almacenar el café y no guardan productos químicos, como abonos y/o combustibles (Figura 12). El 72,5% de los productores tiene estibas que garantizan que el café no esté directamente sobre el piso, separados de la pared y en sacos de fique limpios.

Finalmente, en este estudio donde se caracterizaron 50 fincas cafeteras de alta calidad en la zona central de Colombia, se identificaron los factores clave que contribuyen a sus puntuaciones sensoriales superiores (puntuaciones SCA por encima de 84). Estas fincas realizan el proceso de beneficio por vía húmeda y el 92,5% utilizan fermentación espontánea para la remoción del mucílago. Los caficultores también demostraron un fuerte compromiso con el control de calidad mediante una clasificación minuciosa en varias etapas (despulpado, lavado, secado). El 98% contaba con capacidad y tecnología de secado óptimo, y el 75% utilizaba solo secado solar.

Estos hallazgos sugieren que una combinación de técnicas de procesamiento cuidadosas y tecnología avanzada contribuye significativamente a lograr una calidad de

café excepcional. Además, las características propias de las fincas, la selección de variedad y el tamaño de la finca, también desempeñaron un papel en la calidad general. El 25% de los productores poseen marca propia del café (o están en el proceso de obtenerla). Adicionalmente, las 50 fincas se seleccionaron con base en la calidad sensorial del café evaluada durante un periodo de tres años. Se resalta que estas fincas representaron el 90% de los ecotopos cafeteros de la región central de Colombia, a partir de la base de datos inicial de 400 fincas ubicadas en 20 ecotopos cafeteros. Finalmente, una característica común de los productores, es el compromiso que tienen con la calidad del café, lo que se evidenció en las clasificaciones en todas las etapas de procesamiento, orden y aseo de todas las instalaciones.



Figura 10. Tipos de secado empleados por los productores de las fincas seleccionadas.



Figura 11. Silos de capa estática con capacidad de 7,0 @ de cps y 600 @ de cps.



Figura 12. Bodegas de almacenamiento del café pergamino seco que se observaron en las fincas.

AGRADECIMIENTOS

Al doctor Gerardo Montenegro, de la Gerencia Técnica de la Federación Nacional de Cafeteros. A los Líderes de Extensión y Extensionistas de los departamentos de Antioquia, Caldas, Chocó, Norte de Santander, Risaralda, Santander, Tolima y Valle del Cauca. En Cenicafé, al doctor Álvaro Gaitán y a los compañeros de Experimentación, Carlos

Gonzalo Mejía y Carlos Roberto Ariza; en la disciplina de Calidad: Claudia Gómez, Paola Calderón, Wilson Vargas y Víctor Castañeda. Especialmente a los caficultores que fueron seleccionados que permitieron la recolección de información y la visita a sus fincas. Esta Investigación fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé (Crossref Funder ID 100019597), proyecto CAL101005.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, Curación de datos, Redacción-borrador original: J.P.U.; Análisis formal, Metodología, Validación: J.P.U.;

V.O.P.; C.P.G. Redacción- revisión y edición: J.P.U.; V.O.P.; C.P.G. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

LITERATURA CITADA

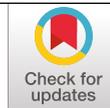
- Avelino, J., Barboza, B., Araya, J. C., Fonseca, C., Davrieux, F., Guyot, B., & Cilas, C. (2005). Effects of slope exposure, altitude and yield on coffee quality in two altitude terroirs of Costa Rica, Orosi and Santa María de Dota. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(11), 1869-1876. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2188>
- Cano, H. F., Ciro, H. J., & Arango, J. C. (2018). Efecto del secado y presecado mecánico previo al almacenamiento en la calidad del grano de café (*Coffea arabica* L.). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 439-448. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1068>
- Cao, X., Wu, H., Viejo, C. G., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2023). Effects of postharvest processing on aroma formation in roasted coffee – a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(3), 1007-1027. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16261>
- Echeverri, L. F., & Osorio, V. (2024). Compuestos del grano de café verde que determinan la acidez de la bebida. *Avances Técnicos Cenicafé*, 565, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0565>
- Gomez, L., Caballero, A., & Baldión, J. V. (1991). *Ecotopos cafeteros de Colombia*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/818>
- Hameed, A., Hussain, S. A., Ijaz, M. U., Ullah, S., Pasha, I., & Suleria, H. A. R. (2018). Farm to Consumer: Factors Affecting the Organoleptic Characteristics of Coffee. II: Postharvest Processing Factors. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(5), 1184-1237. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12365>
- Oliveira, P. D., Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Giomo, G. da S., Lima, R. R. de, & Cardoso, R. A. (2013). Aspectos fisiológicos de grãos de café, processados e secados de diferentes métodos, associados à qualidade sensorial. *Coffee Science*, 8(2), 211-220.
- 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
- Osorio, 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. (2022). Efecto de las temperaturas y tiempos de tueste en la calidad sensorial del café. *Revista Cenicafé*, 73(1), e73102. <https://doi.org/10.38141/10778/73102>
- Osorio, V., Pabón, J., Calderón, P. A., & Imbachi, L. C. (2021). Calidad física, sensorial y composición química del café cultivado en el departamento del Huila. *Revista Cenicafé*, 72(2), e72201. <https://doi.org/10.38141/10778/72201>
- Osorio, V., Pabón, J., & Echeverri, L. F. (2024). Fermentaciones prolongadas del mucilago y su relación con la calidad del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 563, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0563>
- 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. (2024). Aspectos fundamentales de la calidad del café cultivado en ecotopos cafeteros. *Memorias Seminario Científico Cenicafé*, 75(1), e750909. <https://doi.org/10.38141/10795/750909>
- Pabón, J., & Osorio, V. (2019). Factores e indicadores de la calidad física, sensorial y química del café. En *Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila* (Vol. 3, pp. 162-187). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0005_7
- Pabón, J., & Osorio, V. (2022). Efecto de la interrupción del secado mecánico en la calidad física y sensorial del café. *Revista Cenicafé*, 73(2), e73201. <https://doi.org/10.38141/10778/73201>

- Pabón, J., Osorio, V., & Imbachi, L. C. (2021). Calidad física, sensorial y composición química del café cultivado en el Oriente del departamento de Caldas. *Revista Cenicafé*, 72(2), e72202. <https://doi.org/10.38141/10778/72202>
- Pabón, J., & Peñuela, A. E. (2016). Efecto de la aplicación de agua ozonizada como técnica de conservación del café pergamino húmedo. *Revista Cenicafé*, 67(1), 63–72. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/679>
- Pabón, J. P., Sanz, J. R., & Oliveros, C. E. (2009). Manejo del café desmucilaginado mecánicamente. *Avances Técnicos Cenicafé*, 388, 1-8. <http://hdl.handle.net/10778/381>
- Peñuela, A., & Sanz, J. R. (2021). Obtenga café de calidad en el proceso de beneficio. En Centro Nacional de Investigaciones de Café, *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3.ª ed., pp. 189-218). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_11
- Peñuela, A. E., Sanz, J. R., & Pabón, J. P. (2012). Método para identificar el momento final de la fermentación de mucilago de café. *Revista Cenicafé*, 63(1), 120–131. <http://hdl.handle.net/10778/517>
- Puerta, G. I. (2000) Influencia de los granos de café cosechados verdes, en la calidad física y organoléptica de la bebida. *Revista Cenicafé*, 51(2), 136–150. <http://hdl.handle.net/10778/65>
- 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. <http://hdl.handle.net/10778/675>
- Puerta, G. I., & Pabón, J. (2018). Calidad física y sensorial del café cultivado en el paisaje cultural cafetero de Colombia en Caldas. *Revista Cenicafé*, 69(1), 16–31. <http://hdl.handle.net/10778/1089>
- Rendón, J. R. (2021). Densidades, edades y renovación. En Centro Nacional de Investigaciones de Café, *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3.ª ed., pp. 63-79). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_4
- Rendón, J. R., & Salazar, H. M. (2025). *Ciclos de renovación: Estrategia para la estabilización de la producción en la empresa cafetera*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0059>
- Sarmento, C. S. A. G., Lemos, O. L., Boffo, E. F., Matsumoto, S. N., Castro, I. T. P. D., & Alvarenga, Y. A. (2025). Relations between sensory quality and spectral indices in Brazilian arabica coffees. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 97(1), e20240921. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520240921>
- Sarmiento, N., Espinosa-Osorio, J. C., Quiroga-Mosquera, A., Ramírez-Carabali, C., & García-López, J. C. (2022). Atlas Climatológico Cafetero Interactivo. *Avances Técnicos Cenicafé*, 540, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0540>
- SCA, Specialty Coffee Association. (2015). *Cupping Protocols*. <https://sca.coffee/sca-member-brochure-spanish>. <https://sca.coffee/research/protocols-best-practices>
- Taveira, J. H. D. S., Bor&em, F. M., Rosa, S. D. V. F. D., Oliveira, P. D., Giomo, G. S., Isquierdo, E. P., & Fortunato, V. A. (2015). Post-harvest effects on beverage quality and physiological performance of coffee beans. *African Journal of Agricultural Research*, 10(12), 1457–1466. <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.9263>
- Tieghi, H., Pereira, L. de A., Viana, G. S., Katchborian-Neto, A., Santana, D. B., Mincato, R. L., Dias, D. F., Chagas-Paula, D. A., Soares, M. G., Araújo, W. G. de, & Bueno, P. C. P. (2024). Effects of geographical origin and post-harvesting processing on the bioactive compounds and sensory quality of Brazilian specialty coffee beans. *Food Research International*, 186, 114346. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114346>
- Yulianti, Y., Adawiyah, D. R., Herawati, D., Indrasti, D., & Andarwulan, N. (2024). Identification of antioxidant and flavour marker compounds in Kalosi-Enrekang Arabica brewed coffee processed using different postharvest treatment methods. *Journal of Food Science and Technology*, 61(6), 1165-1179. <https://doi.org/10.1007/s13197-024-05948-8>

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ASPERSIÓN Y EL CONTROL DE *Hypothenemus hampei* UTILIZANDO DRONES

Aníbal Arcila Moreno *, Luis Carlos Imbachí Quinchua **, Pablo Benavides Machado ***

Arcila-Moreno, A., Imbachí-Quinchua, L. C., & Benavides-Machado, P. (2025). Evaluación de la calidad de la aspersión y el control de *Hypothenemus hampei* utilizando drones. *Revista Cenicafé*, 76(1), e76105. <https://doi.org/10.38141/10778/76105>



La broca del café es la plaga más limitante de la caficultura colombiana. Los equipos de aspersión utilizados consumen altos volúmenes de mezcla por hectárea y son exigentes en calidad y cantidad de mano de obra. El objetivo de esta investigación fue evaluar la calidad de la aspersión y control de la broca utilizando drones. El estudio se desarrolló en dos etapas. Inicialmente, se evaluó la calidad física de la aspersión utilizando drones DJI Agras MG-1 y MG-1S, equipados con boquillas de abanico, antideriva de cono hueco, operando a velocidades entre 1 y 7 m s⁻¹. Se analizaron variables como cubrimiento, tamaño de gota y porcentaje de cobertura en cafetales de dos edades. Posteriormente, se evaluó la eficacia biológica de una mezcla comercial de tiametoxam+clorantraniliprol aplicada con el dron MG-1S, empleando las boquillas seleccionadas en la primera fase, tres volúmenes de mezcla y dosis de 350, 500 y 1.000 cm³ ha⁻¹. El testigo relativo fue un equipo de espalda. El uso de drones permitió una distribución adecuada de las gotas en el estrato productivo de cafetos en segunda y cuarta cosecha, especialmente con las boquillas TJ XR11001, TX4 y TX6 a una velocidad de 1 m s⁻¹. A partir de una dosis de 500 cm³ ha⁻¹, se alcanzaron niveles de protección de almendras similares al testigo, protegiendo en promedio el 70% de los frutos. Bajo las condiciones del presente estudio, los drones son una alternativa viable y eficiente para el control de la broca del café en Colombia.

Palabras clave: Control químico, tecnología de aplicación, broca del café, UAV.

EVALUATION OF SPRAY QUALITY AND CONTROL OF *Hypothenemus hampei* USING DRONES

The coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) is the most limiting pest in Colombian coffee production. Conventional spraying equipment requires high volumes of spray mixture per hectare and demands significant labor in both quantity and quality. In response to this issue, the objective of the present study was to evaluate spray quality and borer control using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The study was conducted in two stages. In the first stage, the physical quality of the spraying was assessed using DJI Agras MG-1 and MG-1S UAVs, equipped with flat-fan, drift-reducing, and hollow-cone nozzles, operating at speeds ranging from 1 to 7 m s⁻¹. Variables such as coverage, droplet size, and percentage of surface coverage were analyzed in coffee plantations of two age groups. In the second stage, the biological efficacy of a commercial mixture of thiamethoxam + chlorantraniliprole was evaluated when applied with the MG-1S UAV. The selected nozzles from the first stage were used, applying three spray volumes and doses of 350, 500, and 1000 cm³ ha⁻¹. A handheld backpack sprayer was used as a relative control. The results showed that drone applications provided adequate droplet distribution within the productive canopy strata of coffee trees in their second and fourth harvests, particularly with TJ XR11001, TX4, and TX6 nozzles at a flight speed of 1 m s⁻¹. From a dose of 500 cm³ ha⁻¹ onward, almond protection levels were comparable to those achieved with the control treatment, protecting approximately 70% of the fruits on average. It is concluded that, under the conditions of this study, the use of UAVs for spraying represents a viable and efficient alternative for controlling the coffee berry borer in Colombia.

Keywords: Chemical control, application technology, coffee berry borer, UAV.

* Asistente de Investigación. Disciplina de Entomología, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-4276-0521>

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

*** Investigador Científico III. Disciplina de Entomología, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-2227-4232>



La broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), al encontrarse diseminada en toda la zona cafetera de Colombia e incidir negativamente sobre la calidad y peso del grano, caída de frutos y costos de control, la convierte en la plaga más limitante de la caficultura colombiana (Benavides Machado et al., 2021). Para mantener la plaga por debajo de los umbrales de daño económico, es necesario recurrir a prácticas de control sanitario como el uso de insecticidas biológicos, botánicos o de síntesis química; para ello debe contarse con una tecnología que permita obtener una calidad óptima de la aplicación en el momento oportuno y así, minimizar los costos de la misma, el impacto ambiental y los efectos sobre la salud humana (Benavides Machado et al., 2013).

La calidad de las aspersiones para el control de plagas está determinada básicamente por el cubrimiento y el tamaño de gota, los cuales se evalúan principalmente, mediante dos estudios: biológicos y de calidad física. El primero es una medición indirecta pero fundamental, establece el grado de control de la plaga (insecto, hongo, arvense, entre otros) o el efecto sobre el desarrollo o producción del cultivo o cosecha (Villalba-Gault, 2008). El segundo, mide la distribución y calidad de las gotas en el árbol o en el blanco al cual va dirigida la aspersión (Ferguson, Chechetto, Hewitt, et al., 2016); para ello, los parámetros más usados son número de gotas/cm² que determina el cubrimiento o densidad de gotas y el diámetro volumétrico mediano (DVM) que mide el tamaño de gota (Syngenta, 2020; Teixeira, 2010); un parámetro de reciente uso es la cobertura, expresado como el porcentaje de la superficie de la tarjeta cubierta por los impactos (gotas) (Fox et al., 2003; Merani et al., 2021; Sesquile Peña, 2014; Souza et al., 2022). Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que la uniformidad de la distribución de las

gotas o cubrimiento en distintos sitios de la planta, blanco o cultivo, es medido por el coeficiente de variación (CV%); en aplicaciones de insecticidas y fungicidas se aceptan hasta el 50% para los productos de contacto y 70% con los sistémicos (Ferrazzini & Zamora, 2004).

En los años recientes se inició el estudio de aplicaciones para el control de plagas en distintos cultivos con drones de aspersión, conocidos internacionalmente como UAVs (unmanned aerial vehicle). En Brasil se han realizado evaluaciones en café utilizando diferentes parámetros de operación de los drones como altura, velocidad, tipo de boquillas y volúmenes de aspersión, entre otros; los resultados han mostrado, de manera variable, su efecto sobre la calidad física y biológica de las aspersiones. En general, comparado con la aplicación de pesticidas con equipos manuales terrestres, la aspersión con drones es más eficiente (Chen et al., 2020; Pan et al., 2017; G. Wang et al., 2019; K. Wang et al., 2020; Zhang et al., 2019).

En la actualidad, los equipos de aspersión más utilizados en la zona cafetera colombiana son aspersoras hidráulicas de espalda, accionadas por palanca, o batería eléctrica y equipos motorizados semiestacionarios (Benavides Machado et al., 2013). Estos equipos requieren para el control de la broca, volúmenes de aspersión mayores a 200 L ha⁻¹ (Montoya & Villalba, 2013; Tabares-Carrillo et al., 2008) y son exigentes en calidad y cantidad de mano de obra.

En Colombia, no se ha estudiado el uso de drones de aspersión para el control de plagas en el cultivo del café; por tal razón, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la calidad física y biológica de las aspersiones para el control de la broca del café con el uso de drones, bajo diferentes parámetros operativos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La presente investigación se realizó en Estaciones Experimentales de Cenicafé y en una finca demostrativa en el departamento de Quindío (Tabla 1), en dos etapas: 1) evaluación de la calidad física de las aspersiones con los drones, y 2) evaluación de la calidad biológica de una aspersión de insecticida con dron para el control de la broca.

Metodología

Etapas 1. Evaluación de la calidad física de las aspersiones

Durante el año 2016, se realizaron aspersiones con los drones Agras MG 1 y Agras MG 1S (DJI, China) (Figura 1), en lotes de café de la finca El Agrado y la Estación Experimental Paraguaicito (Tabla 1). El objetivo del estudio fue conocer la distribución de las gotas en el árbol de café. En cada lugar se seleccionaron diez árboles al azar y en cada uno de ellos se tomaron diferentes puntos de evaluación. En El Agrado la evaluación se realizó en tres alturas del tercio productivo del árbol: bajo, medio y alto, en estos sitios se tomó una rama, seleccionando dos sectores de la misma: parte interna y externa, y en cada sector, dos caras: superior (frutos orientados hacia arriba) e inferior (frutos orientados hacia abajo); así mismo, en una rama se midió el tercio vegetativo superior del árbol. El dron se operó con la boquilla de abanico plano TJ XR11001 (rango extendido) (Teejet, Glendale Heights, IL, EE. UU.), a una velocidad de vuelo $1,0 \text{ m s}^{-1}$. En la Estación Paraguaicito se eligieron dos ramas en cada árbol: una del tercio vegetativo superior y otra del tercio medio productivo, en cada rama se tomaron dos sectores: parte interna y externa de la misma, en ambos sectores se escogió la cara

superior de la rama; el dron fue operado con las boquillas TJ XR11001 y TJ 800050 (Teejet, Glendale Heights, IL, EE. UU.) a velocidades de $3,0$ y $5,0 \text{ m s}^{-1}$. En ambos lugares la altura de vuelo sobre el dosel del cultivo fue de $2,0 \text{ m}$ aproximadamente, determinada en el modo manual del equipo.

En el año 2017, en la Estación Experimental Paraguaicito, se evaluó la distribución de la aspersión en lotes de café (Tabla 1) operando el dron MG 1S a diferentes velocidades ($1, 3, 5$ y 7 m s^{-1}), con las boquillas de abanico plano TJ XR11001, TJ TT11001 (ángulo ancho), TJ AIXR110015 (rango extendido con inducción de aire) y las boquillas de cono hueco TX6 y TX4 (Teejet, Glendale Heights, IL, EE. UU.) (Figura 2). Los puntos de medición se realizaron en nueve árboles al azar, seleccionando la cara superior del sector medio de la rama en tres alturas del tercio productivo del árbol (alto, medio y bajo). Adicionalmente, en otros tres ensayos independientes se determinó la distribución de la aspersión evaluando diferentes boquillas y velocidades a dos alturas de vuelo sobre el dosel del cultivo ($1,5$ y $3,0 \text{ m}$), dos edades del cafetal (segunda y cuarta cosecha) y dos caras en la rama (superior e inferior).

Procedimiento. En los puntos indicados de evaluación, se colocó una tarjeta colectora de gotas (Villalba-Gault, 2008) (Figura 3). Como material colector se utilizaron tarjetas de papel fotográfico (Baio et al., 2014) tipo glossy de 200 g , con un tamaño de $6,0 \text{ cm} \times 3,0 \text{ cm}$, como colorante durante la aspersión se utilizó el producto alimenticio UVA C31 (Frutaroma, Colombia) al 1% (p/v) en mezcla con agua. Las tarjetas se fijaron a las hojas o frutos con “chinchas” o “push pins” de $9,0 \text{ mm}$ (Figura 4). Luego de la aplicación, las tarjetas se dejaron en el árbol por al menos cinco minutos con el fin de permitir la mayor deposición y

fijación de las gotas a la tarjeta colectora; posteriormente, las tarjetas fueron recogidas por un operario, usando guantes desechables. Las tarjetas se colocaron en bolsas plásticas

previamente marcadas con toda la información necesaria para identificar el tratamiento al cual correspondían y fueron llevadas al laboratorio para el respectivo análisis.

Tabla 1. Características de los lotes y condiciones agroclimáticas durante los vuelos de los drones.

Características	El Agrado ¹	Paraguaicito ¹	Paraguaicito ²	Naranjal ³
Municipio	Montenegro	Buenavista	Buenavista	Chinchiná
Departamento	Quindío	Quindío	Quindío	Caldas
Fecha	25/11/2016	16/12/2016	6/12/2017	28/10/2021
Coordenadas	Latitud 4° 31' N Longitud 75° 48' W	Latitud 4° 24' N Longitud 75° 48' W	Latitud 4° 24' N Longitud 75° 48' W	Latitud 4° 58' N Longitud 75° 39' W
Altitud (m)	1.275	1.203	1.203	1.381
Temperatura media (°C)	20,9	21,3	22,2	20,9
Humedad relativa media (%)	84,3	81,0	82,0	82,7
Brillo solar (h)	2,0	3,1	7,0	5,5
Sistema	Libre exposición	Libre exposición	Libre exposición	Libre exposición
Topografía lote	Plana	Plana	Plana	Plana
Variedad	Castillo	Castillo Paraguaicito	Castillo Paraguaicito	Cenicafé 1
Tipo de renovación	Zoca tradicional	Zoca tradicional	Zoca tradicional	Zoca tradicional
Distancia de siembra	Doble surco: (2,0 m + 1,5 m) x 1,0 m	1,0 m x 1,5 m	1,0 m x 1,5 m	1,0 m x 1,4 m
Edad Cosecha	Tercer año	Primer año	Segundo–Cuarto año	Primer año
Hora de vuelo	10:00–14:00	10:00–13:00	10:00–16:00	10:00–12:00
Velocidad del viento (m s ⁻¹)	1,5 aprox.	1,5 aprox.	< 3,0 ⁴	< 3,0 ⁴

¹ Fuente Coordenadas e información agroclimática: (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2017).

² Fuente Coordenadas e información agroclimática: (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2018).

³ Fuente Coordenadas e información agroclimática: (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2022).

⁴ De acuerdo con la observación visual, tomando como referencia la Escala de Beaufort (The Royal Meteorological Society, s.f.).



Figura 1. Drones de aspersión DJI Agras. a. MG -1; b. MG-1S.



Figura 2. Boquillas evaluadas. a. TJ XR11001; b. TJ TT110012; c. TJ AIX110015; d. TX6; e. TX4.

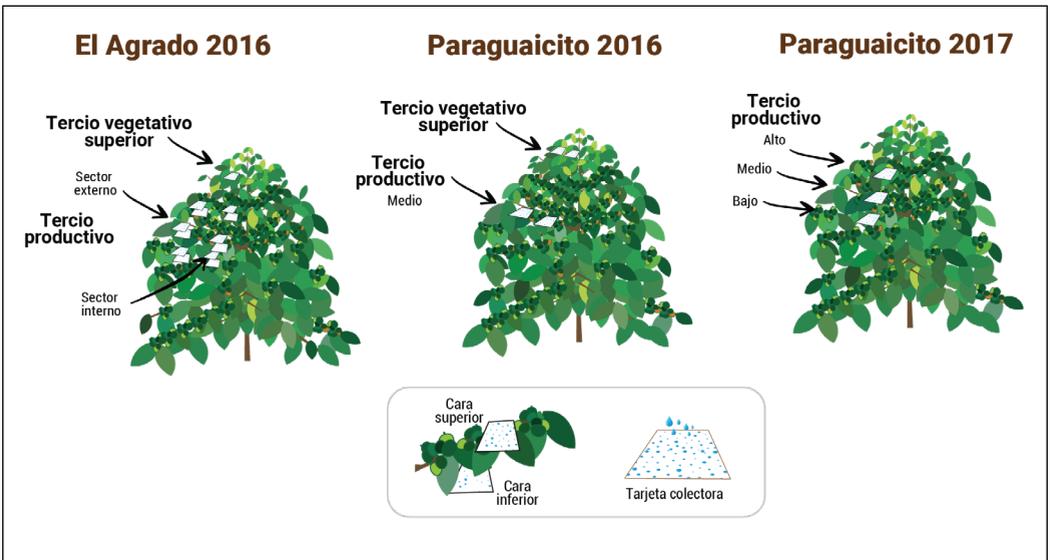


Figura 3. Ubicación de las tarjetas colectoras en cada punto de evaluación del árbol.



Figura 4. Tarjetas colectoras. a. Puesta de tarjetas en el árbol; b. Tarjeta después de la aspersión.

Tabla 2. Descripción de tratamientos para la aspersión del insecticida Voliam Flexi con el dron Agras MG -1S para el control de la broca del café. Naranjal, 2021.

TTO	Volumen mezcla (L ha ⁻¹)	Dosis P.C. (cm ³ ha ⁻¹)	Concentración insecticida (cm ³ L ⁻¹)	Boquilla	Pases del dron sobre la parcela
T1	100	1.000	10,0	TJ XR11001	Uno solo
T2	100	500	5,0	TJ XR11001	Uno solo
T3	50 + 50	250 + 250	5,0	TJ XR11001	Dos pases: cruzados
T4	40	500	12,5	TJ XR11001	Uno solo
T5	70	500	7,1	TJ XR11001	Uno solo
T6	100	350		TX6	Uno solo
T7	100	500	5,0	TX6	Uno solo
T8	100	350	3,5	TJ XR11001	Uno solo
T9 (TR)	260	364	1,4	TX3	
T10 (TA)	0	0	0		

Análisis de la información. Las tarjetas se digitalizaron en un escáner HP serie Scanjet 5590, a una resolución de 1.200 dpi. El análisis se realizó con la ayuda del programa de procesamiento de imágenes DepositScan

(USDA. Wooster, OH, EEUU) (Zhu et al., 2011), el cual calculó y entregó los siguientes parámetros de calidad física: cubrimiento o densidad de gotas (gotas/cm²); la cobertura de la tarjeta, expresado como cobertura (%), y el

tamaño de gota, medido por el indicador DVM (en μm); estos parámetros fueron considerados las variables de respuesta del estudio en la Etapa 1. El análisis de la evaluación de la distribución de la aspersión en cada punto del árbol de café se realizó por factor (velocidad, boquilla, tercio del árbol, sector, cara de las ramas, altura de vuelo y edad del cultivo); se realizó un análisis descriptivo calculando los valores máximos, mínimos, media y error estándar. A continuación, dada la dificultad para asumir la normalidad y homogeneidad en los datos, se implementó un análisis de varianza no paramétrico y las diferencias se evaluaron mediante la prueba de Kruskal-Wallis al 5% de significancia. Adicionalmente, con el coeficiente de variación (CV%) para la variable cubrimiento, se determinó la uniformidad de la distribución de la aspersión.

Etapa 2. Evaluación de la calidad biológica de una aspersión de insecticida con dron para el control de la broca

En la Estación Naranjal (Tabla 1) se evaluó la eficacia de una aspersión con el dron Agras 1S (DJI, China) para el control de la broca del café; se utilizó el insecticida Voliam Flexi, formulación mezcla de thiametoxam más clorantnilipol (Syngenta, Stein, Suiza). La descripción de los tratamientos: dosis aplicada de insecticida (producto comercial), volumen de mezcla, tipo de boquilla utilizada y pases del dron, se presenta en la Tabla 2. Se utilizó como testigo relativo (TR), una aspersión convencional con equipo eléctrico de espalda, boquilla TX3 y una presión de trabajo de 40 psi, aplicando una concentración del producto comercial de $1,4 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$. El testigo absoluto (TA) no tuvo aplicación de insecticida.

Procedimiento. Se aplicó el insecticida de acuerdo con cada tratamiento, en parcelas de 347 m^2 , con árboles que tuvieron frutos de más de 150 días de desarrollo. Después de seis

días de la aspersión, se realizó una primera infestación, con el método de las mangas entomológicas (Tabares-Carrillo et al., 2008). En este caso se tomó una rama por árbol, con 30 frutos sanos y se liberaron 70 brocas recién emergidas en la manga; después de ocho días se realizó una segunda liberación, para garantizar un porcentaje de infestación inicial superior al 70% en el TA. Se infestaron al azar 20 árboles por parcela (tratamiento). Las parcelas fueron asignadas a los tratamientos de manera aleatoria. Después de siete días de la segunda infestación, se cortaron los frutos y se llevaron al laboratorio para su evaluación, registrando el número total de frutos infestados y el número de frutos infestados en donde la broca no llegó a las almendras, es decir, frutos infestados con la almendra sana. Las condiciones operativas del dron fueron con las cuatro boquillas funcionando y un interlineado (desplazamiento lateral) ajustado a 3,0 m.

Análisis de la información. Como variable de interés se tomó el porcentaje de frutos con almendra sana (PFAS), tomado con el total de frutos infestados con almendra sana sobre el total de frutos infestados y multiplicado por 100. Para cada tratamiento con la variable PFAS se construyeron intervalos de confianza (t-Student) al 95% y sus diferencias respecto al TR, evaluadas bajo una prueba t al 5% de significancia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapa 1. Evaluación de la calidad física de aspersiones

En las mediciones de las tasas de descarga de las boquillas se encontró que ambos drones trabajan con presiones entre 29 y 58 psi aproximadamente; de acuerdo a la norma ASABE 572.2 (American Society of Agricultural & Biological Engineers) y catálogo de boquillas Tee®Jet 52-M, con las presiones

indicadas, el tamaño de gota, cualitativa y cuantitativamente (DVM), para las boquillas evaluadas son los siguientes: TJ 800050, gotas muy finas (60 a 105 μm); TJ XR11001, gotas muy finas a finas (60 a 235 μm); TJ TT11001 y TJ AIXR110015, gotas medianas a gruesas (236 a 403 μm) y las boquillas de cono hueco TX4 y TX6 gotas muy finas (60 a 105 μm) (Grisso, 2019; TeeJet® Technologies, 2023b). En cuanto a las evaluaciones preliminares de altura de vuelo, para las boquillas TX4 y TX6, por su ángulo de aspersión de 80° y no de 110° como en las otras boquillas, se demostró que vuelos a una altura de 1,5 m sobre el dosel del cultivo, dejan espacios sin asperjar en la mitad de la franja asperjada; a su vez, a 3,0 m de altura, el tamaño muy fino de las gotas disminuyó el cubrimiento, por tal razón, para estas boquillas fue seleccionada la altura de vuelo de 2,0 m sobre el dosel del cultivo.

Los resultados de las pruebas físicas muestran que las aspersiones, con ambos tipos de dron, permitieron una buena distribución de las gotas en casi todas las partes del árbol evaluadas (Tabla 3). Un buen cubrimiento es importante en insecticidas de contacto, especialmente cuando se trata de insectos que están inmóviles (Matthews, 2000); en términos generales, se considera que las aplicaciones contra insectos son eficaces a partir de un cubrimiento mínimo teórico (CMT) de 20 a 30 gotas/cm² para insecticidas sistémicos y 40 a 70 gotas/cm² con insecticidas de contacto (Syngenta, 2020; TeeJet® Technologies, 2023a; Teixeira, 2010). Respecto al tamaño de gota, no hay consenso sobre la medida requerida para obtener eficacia al aplicar los pesticidas; Matthews (2000) afirma que el tamaño óptimo es de 30 a 50 μm para el control de insectos que están en el follaje; Grisso (2019) presenta rangos de 236 a 340 μm y 341 a 403 μm para insecticidas de contacto y sistémicos, respectivamente.

Para la variable cubrimiento no se encontró efecto significativo de la altura o posición de la rama en el árbol (vegetativa superior o tercio productivo) y del sector en la rama (externo o interno); así mismo, la cantidad de gotas cumple con los requerimientos de CMT para obtener eficacia con insecticidas sistémicos y de contacto (Syngenta, 2020; TeeJet® Technologies, 2023a); sin embargo, en los frutos que están orientados hacia la cara inferior de la rama, independiente del tipo de dron, tipo de boquilla o lugar de la planta, el número de gotas que llegan al blanco no cumple con los requerimientos de CMT, con lo cual, no habría control sobre la broca que esté infestando estos frutos; este menor cubrimiento indicaría que la turbulencia y movimiento de ramas que generan los drones no es suficiente para voltear las ramas y permitir la llegada de las gotas a los frutos de debajo de la rama. Por otro lado, aun cuando existe efecto de la edad del cultivo sobre la distribución de las gotas en el árbol, el menor cubrimiento en los cafetales de dos años, dado su CMT, es suficiente para esperar control eficaz de la broca; las diferencias del cubrimiento podrían explicarse debido a que, en los cultivos de segunda cosecha, el tercio productivo está en una zona donde el follaje es más denso que los de cuarta cosecha.

En cuanto a la variable porcentaje de cobertura, los promedios encontrados en los diferentes sitios del árbol, fueron menores al 10%, lo cual indica que los valores del cubrimiento son confiables y permiten una buena interpretación de la información (Fox et al., 2003; Hołownicki et al., 2002; Zhu et al., 2011). Cabe resaltar que los valores de CMT obtenidos en el presente estudio, corresponden a coberturas entre 2% y 10%, lo cual podría relacionar estos porcentajes de cobertura con la eficacia de los insecticidas recomendados para el control de broca.

Tabla 3. Calidad física de una aspersión, en diferentes partes del árbol de café, obtenida con el Dron DJI Agras MG 1 y 1S.

Lugar	Factor	Nivel Factor	N	Cubrimiento (gotas/cm ²)				Cobertura (%)				DVM (µm)						
				Max.	Min.	Media	EE	Max.	Min.	Media	EE	Max.	Min.	Media	EE			
El Agrado 2016 ¹	Cara de la rama	Inferior	60	8,7	0,1	1,4	0,2	B	3,7	0,0	0,1	0,1	B	1.453,0	52,0	133,3	23,9	B
		Superior	70	186,5	1,0	43,4	5,9	A	11,7	0,0	2,8	0,3	A	1.697,0	95,0	294,1	27,9	A
	Sector de la rama	Externo	40	186,5	2,1	48,0	8,0	A	10,2	0,1	3,4	0,5	A	1.697,0	111,0	331,4	47,3	A
		Interno	30	183,8	1,0	37,2	8,6	A	11,7	0,0	2,2	0,5	A	428,0	95,0	244,3	12,7	B
Paraguaitico 2016 ²	Tercio del árbol	Veg. Superior	28	203,3	4,0	58,3	10,9	A	13,5	0,1	3,4	0,7	A	317,0	112,0	207,3	11,3	A
		Productivo	27	237,8	7,2	75,4	13,2	A	23,2	0,1	5,4	1,3	A	373,0	100,0	226,9	13,7	A
	Sector de la rama	Externo	28	203,1	4,0	66,9	11,0	A	19,5	0,7	4,3	0,9	A	355,0	133,0	218,4	11,4	A
		Interno	27	237,8	6,0	66,4	13,3	A	23,2	0,1	4,4	1,2	A	373,0	100,0	215,4	13,8	A
Paraguaitico 2017	Cara de la rama ³	Inferior	257	42,4	0,4	4,8	0,4	B	1,4	0,0	0,1	0,0	B	568,0	56,5	311,6	6,6	A
		Superior	250	300,4	4,4	72,4	4,5	A	43,9	0,1	6,7	0,6	A	982,0	166,0	306,3	8,7	A
	Tercio Productivo del árbol ⁴	Alto	171	263,6	0,8	55,3	5,0	A	49,5	0,1	6,5	0,8	A	4.109,0	121,0	453,3	35,3	A
		Medio	171	300,4	0,8	58,9	5,2	A	50,8	0,0	8,0	0,9	A	3.254,0	93,0	483,5	37,4	A
		Bajo	178	276,4	2,4	59,2	5,1	A	41,8	0,1	7,4	0,8	A	2.785,5	144,0	435,9	26,7	A
	Cosecha ⁵	Cuarta	103	304,4	8,4	100,0	7,6	A	39,8	0,3	7,8	0,9	A	719,5	136,0	256,3	10,3	B
Segunda		101	270,0	12,0	70,1	6,6	B	39,1	0,7	6,4	0,9	A	982,0	176,5	310,8	13,0	A	

Los promedios corresponden, salvo en el factor "Cara de la rama", a lecturas de las tarjetas de la cara superior de la rama.

Para cada lugar, factor y nivel, letras no comunes indican diferencias según prueba de Kruskal-Wallis al 5%.

¹ Promedio del tercio vegetativo superior y los tres tercios productivos (alto, medio y bajo), asperjando con boquilla TJ XR11001 y volando a 3 m s⁻¹.

² Promedio del tercio vegetativo superior y tercio medio productivos, con dos boquillas (TJ XR11001 y TJ 800050) y volando a 3 y 5 m s⁻¹.

³ Promedio de árboles de segunda cosecha, sector medio de la rama, tres tercios productivos (alto, medio y bajo), cuatro velocidades (1–3–5–7 m s⁻¹) y tres boquillas (TJ XR11001, TX4 y TX6).

⁴ Promedio de árboles de segunda cosecha, sector medio de la rama, cuatro velocidades (1–3–5–7 m s⁻¹) y cinco boquillas (TJ XR11001, TJ TT11001, TJ AIXR110015, TX4 y TX6)

⁵ Promedio del sector medio de la rama en tres tercios productivos (alto, medio y bajo), con cuatro velocidades (1–3–5–7 m s⁻¹) y la boquilla TX6.

La calidad de las aspersiones con drones en cultivos arbustivos como manzanos, almendros, duraznos o café, ha sido ampliamente estudiada y los resultados, aun cuando han sido variables, en su mayoría muestran distribución de las gotas en diferentes sectores o alturas del árbol. En café, J. P. A. R. da Cunha et al. (2024) no encontraron diferencias de cubrimiento entre el sector superior e inferior de la planta, mientras que Moraes (2022) halló diferencias entre sectores de la planta de café. En huertos de guayaba, el cubrimiento, cobertura y tamaño de gota fueron significativamente diferente en distintas partes del árbol (Verma et al., 2022). En general, los estudios concluyen que la calidad del cubrimiento, cobertura, tamaño de gota o uniformidad, dependen de los parámetros de vuelo del dron como altura de aspersión, velocidad, tipo de boquillas y volumen de aspersión, entre otros (Alvarenga et al., 2024; L. Li et al., 2022; X. Li et al., 2019; K. Wang et al., 2020).

En lo referente a los parámetros operativos de vuelo como altura, velocidad y tipo de boquilla, estos por sí solos mostraron efecto sobre la calidad de las aspersiones (Tabla 4). Adicionalmente, la Tabla 5 muestra en mayor detalle la relación entre la combinación de los parámetros operativos (tipo de boquilla y velocidad de vuelo) y la posición de la rama en el tercio productivo del árbol sobre las variables cubrimiento y cobertura; además, presenta la calidad de la uniformidad del cubrimiento, medida por el CV(%).

La altura de vuelo sobre el dosel del cultivo influye en la calidad de la aspersión dependiendo del tipo de boquilla usada; cuando se utilizan boquillas que producen gotas medianas o gruesas como las diseñadas para reducir deriva (TJ AIXR110015), el cubrimiento no se ve afectado al operar el

dron a una altura de 1,5 o 3,0 m, o mientras que con boquillas que generan gotas muy finas o finas (TJ XR11001), un aumento de 1,5 m en la altura de vuelo produce una diferencia significativa, posiblemente, debido a la pérdida por deriva; en las variables cobertura y tamaño de gota no se encontró efecto de la altura. El efecto de la altura de vuelo de los drones sobre la calidad de la aspersión se midió en *Coffea canephora* y en huertos de manzano, encontrando que el cubrimiento se mejora al disminuir la altura de aspersión (Crause et al., 2023; Shan et al., 2024); a su vez, Tang et al. (2018), en huertos de cítricos, descubrieron que la mejor calidad de la aspersión se obtiene a 1,2 m frente a 0,8 o 1,8 m. En el cultivo del café, J. P. A. R. da Cunha et al. (2024), registran una mayor deposición de producto a 1,5 m que a 3,0 m al asperjar con la boquilla TJ XR11001 o la de cono hueco COAP 9001 (KGF, Brasil), resultados similares al presente estudio; a su vez, Sousa et al. (2022), trabajando con boquillas TJ TT11002 hallaron que el efecto de la altura de vuelo no se aprecia en variables como cubrimiento y DVM pero sí en la cobertura, el presente trabajo difiere en estos resultados por cuanto la altura no afectó la cobertura.

El aumento de la velocidad de vuelo, además de afectar negativamente el cubrimiento (gotas/cm²) y la cobertura, también disminuyó la uniformidad de la aspersión, lo cual también fue registrado por L. Li et al (2022); velocidades de 5 m s⁻¹ y 7 m s⁻¹, podrían afectar la calidad biológica de las aspersiones, en especial, para aplicaciones con insecticidas de contacto, mientras que el tamaño de gota, a partir de 3 m s⁻¹ en adelante, no es afectado por la velocidad (Tablas 4 y 5). En cuanto a la relación entre velocidad y boquilla (Tabla 5), se observa como las boquillas de cono hueco que producen gotas

muy finas, como la TX4, producen el mayor cubrimiento y mejor uniformidad en todas las alturas del tercio productivo cuando se opera el dron a 1 m s^{-1} ; sin embargo, a partir de 3 m s^{-1} , la calidad de la aspersión desciende notoriamente, algo similar se presenta con la boquilla TX6; posiblemente, las gotas más pequeñas son transportadas a sitios diferentes al blanco o la velocidad disminuye el tamaño ocasionando una mayor volatilización; en este sentido, la boquilla TJ XR11001 que produce un rango de tamaño de gotas un poco más grande (muy finas a finas) que las de cono hueco evaluadas, es menos susceptible a la pérdida de gotas y produce, en consecuencia, mejor cubrimiento al aumentar la velocidad, inclusive hasta 5 m s^{-1} . Debe tenerse en cuenta que el coeficiente de variación para 3 y 5 m s^{-1} , estuvo alrededor del 60 a 70%, con lo cual, la uniformidad del cubrimiento se redujo; por lo tanto, la calidad del control podría no ser tan consistente para insectos como la broca que son susceptibles a insecticidas de contacto. Estos resultados coinciden con lo hallado por Meng et al. (2020) en huertos de durazno, el aumento de la velocidad de 2 a 5 m s^{-1} , redujo significativamente la calidad del cubrimiento; por el contrario, difieren con los de Quin et al. (2016), quienes hallaron en el cultivo de arroz un mejor cubrimiento en el sector inferior de la planta con el aumento de velocidad de 3 a 5 m s^{-1} ; por otro lado, K. Wang et al. (2020) hallaron, en huertos de cítricos, al controlar *Diaphorina citri*, que la mejor cobertura (19%) fue con una velocidad de $1,7 \text{ m s}^{-1}$.

En cuanto al tipo de boquilla, como se ha indicado, los mejores cubrimientos se obtuvieron con las boquillas TJ XR11001, TX6 y TX4, que producen gotas muy finas a finas, contrario a las boquillas TJ TT11001 y TJ AIXR110015, diseñadas para producir un mayor tamaño de gota a fin de reducir

el efecto de deriva (Tabla 4). Alvarenga et al. (2024), registran DVMS iguales entre las boquillas TJ XR11001 y TJ TT11001 y menor tamaño con respecto a la boquilla TJ AIXR110015; a su vez, encontraron una mayor cobertura con la boquilla TJ TT11001 frente a las boquillas TJ XR11001 y TJ AIXR110015, resultados contrarios a los del presente trabajo. Los resultados muestran, para las diferentes boquillas, DVMS proporcionales a los establecidos en la norma ASABE 572.2; sin embargo, los promedios fueron mayores a los indicados por los rangos de referencia; esta diferencia puede estar dada por el efecto del factor de expansión del colorante, material de la tarjeta colectora o el programa de análisis (Baio et al., 2014; Deveau, 2021a, 2021b, 2021c; He et al., 2024; Xu et al., 2019).

En referencia a la relación entre el cubrimiento y la cobertura (Tabla 5), con todas las boquillas, excepto la TJ AIXR110015, se observa que con $110,7$ gotas/cm² o más, la cobertura fue superior al 10%; para una densidad entre 47 y 73 gotas/cm², la cobertura estuvo entre 3% y 6%; L. Li et al (2022) registraron con coberturas similares en aspersiones con dron en huertos de durazno, un cubrimiento entre 15 y 45 gotas/cm². En las evaluaciones de calidad física de aspersiones en el cultivo de café, el establecimiento de una correlación entre el cubrimiento y la cobertura (%) podría permitir seleccionar a esta última como parámetro más práctico por cuanto esta variable es mejor procesada y medida por los programas de análisis de imagen y, por lo tanto, es más confiable que el cubrimiento o el tamaño de gota, especialmente cuando el número, tamaño o forma de las gotas, limita el desempeño de estos programas (M. Cunha et al., 2012; Deveau, 2021d; Ferguson, Chechetto, O'Donnell, et al., 2016).

Tabla 4. Calidad física de una aspersión en árboles de segunda cosecha, de acuerdo con diferentes tipos de boquilla y velocidad de vuelo con el dron DJI Agras MG-1S. Paraguaicito, 2017.

Factor	Nivel Factor	N	Cubrimiento (gotas/cm ²)				Cobertura (%)				DVM (μm)						
			Max.	Min.	Media	EE	Max.	Min.	Media	EE	Max.	Min.	Media	EE			
Altura vuelo ¹	1,5 m (TJ XR11001)	6	171,6	65,2	104,1	15,5	A	15,1	6,6	9,9	1,2	BC	787,0	583,0	687,3	27,4	B
	3,0 (TJ XR11001)	6	75,2	26,0	40,7	7,4	C	11,9	2,6	5,0	1,5	C	864,0	607,0	748,7	45,5	B
	1,5 m (TJ AIRX110015)	8	70,0	11,2	41,6	9,1	C	43,9	5,5	21,4	5,2	AB	4.430,0	1155,0	2.313,5	405,8	A
	3,0 m (TJ AIRX110015)	7	85,6	21,2	58,2	9,4	BC	32,5	8,8	20,6	3,3	A	3.107,0	1594,0	2.052,9	200,3	A
² Velocidad (m s ⁻¹)	1	126	300,4	5,2	141,1	7,2	A	50,8	0,1	22,3	1,1	A	4.109,0	121,0	796,8	66,6	A
	3	135	147,2	2,8	42,6	2,7	B	13,5	0,1	3,9	0,2	B	1.289,0	165,5	383,7	15,7	B
	5	130	161,2	0,8	27,0	2,7	C	15,9	0,0	2,0	0,2	C	818,0	93,0	355,5	13,2	B
	7	126	86,0	1,6	22,7	1,6	C	6,1	0,1	1,4	0,1	C	862,5	132,0	302,0	10,9	B
Boquilla ²	TJ XR11001	105	276,8	2,4	76,4	7,3	A	43,4	0,1	7,6	1,0	AB	984,0	121,0	333,2	14,7	C
	TJ TT11001	108	203,2	0,8	38,2	4,8	B	29,3	0,0	5,0	0,7	B	718,0	93,0	465,2	11,0	B
	TJ AIRX110015	108	91,2	2,0	28,5	2,3	B	50,8	0,2	9,4	1,3	A	4.109,0	132,0	832,1	77,7	A
	TX4	95	300,4	6,8	79,7	8,9	A	43,9	0,6	8,2	1,3	A	932,5	183,5	315,6	16,8	C
	TX6	101	270,0	12,0	70,1	6,6	A	39,1	0,7	6,4	0,9	AB	982,0	176,5	310,8	13,0	C

Los promedios corresponden a lecturas de las tarjetas de la cara superior de la rama.

Para cada factor y nivel, letras no comunes indican diferencias según prueba de Kruskal-Wallis al 5%.

¹ Promedio del tercio medio productivo, sector medio de la rama. Velocidad de vuelo de 1 m s⁻¹

² Promedio del sector medio la rama en tres tercios productivos (alto, medio y bajo). Altura de vuelo del dron sobre el dosel del cultivo según la boquilla: TJ XR11001 y TJ TT11001: 1,5 m; TJ AIRX110015: 3,0 m; TX4 y TX6: 2,0 m

Tabla 5. Cubrimiento en tres alturas del tercio productivo del árbol de café, utilizando el dron DJI Agras MG -1S con diferentes boquillas y velocidades de vuelo. Paraguaicito, 2017.

Boquilla	Velocidad (m s ⁻¹)	Tercio Productivo del árbol																							
		Alto								Medio								Bajo							
		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)	
		n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE	n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE	n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE
TJ XR11001	1	8	131,3	38,1	82,2	12,4	4,4	294,4	49,0	8	198,8	16,2	23,0	29,7	4,6	595,9	92,6	8	192,0	22,3	32,9	23,4	2,8	437,5	30,1
	3	9	72,1	13,7	56,8	5,3	1,2	300,4	11,3	9	61,3	12,3	60,2	4,3	0,8	291,4	13,1	9	72,8	14,4	59,4	6,3	1,2	299,7	22,3
	5	9	68,8	16,4	71,5	3,1	0,7	224,4	13,1	9	50,1	10,9	65,2	3,2	0,7	317,0	63,3	9	57,8	14,2	73,7	5,5	1,6	254,8	15,2
	7	9	16,9	6,7	118,3	0,7	0,3	271,7	15,6	9	16,8	4,3	77,4	0,9	0,2	300,5	20,2	9	11,0	2,6	70,0	0,5	0,1	446,7	60,1
TJ TT11001	1	9	84,2	18,5	66,0	10,6	2,1	511,8	18,8	9	110,7	19,8	53,7	16,2	3,2	546,6	26,5	9	116,7	14,9	38,2	16,7	2,2	515,7	27,9
	3	9	15,4	4,7	90,9	1,4	0,5	419,6	38,5	9	38,2	8,9	69,8	4,5	1,0	532,7	52,6	9	51,8	9,3	53,8	6,5	1,0	527,2	12,9
	5	9	1,6	0,3	47,8	0,3	0,1	436,8	31,3	9	4,4	0,7	50,8	0,4	0,2	371,9	57,6	9	4,8	0,5	31,6	0,5	0,1	490,8	18,0
	7	9	6,6	1,7	75,4	0,8	0,2	457,6	36,2	9	11,5	3,9	100,8	1,1	0,3	423,5	22,9	9	12,9	4,9	113,6	1,3	0,5	348,4	28,4

Continúa...

...continuación.

Boquilla	Velocidad (m s ⁻¹)	Tercio Productivo del árbol																							
		Alto								Medio								Bajo							
		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)	
		n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE	n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE	n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE
TJAIXR 110015	1	9	57,1	6,5	34,1	31,1	4,4	1984,3	354,8	9	62,0	5,0	24,0	34,0	3,7	2.187,1	318,2	9	53,0	5,7	32,4	26,4	3,8	1675,9	226,7
	3	9	21,0	3,8	54,2	4,7	0,9	716,6	79,4	9	24,6	4,5	55,3	4,7	0,8	622,8	48,4	9	24,8	2,4	29,1	4,5	0,5	547,4	29,9
	5	9	4,5	1,0	66,1	1,0	0,3	527,8	19,6	9	6,2	1,3	61,0	1,5	0,3	569,4	32,2	9	5,7	0,5	25,2	1,5	0,2	530,3	13,4
	7	9	21,0	6,1	87,1	0,8	0,2	242,6	15,8	9	35,6	10,2	86,4	1,5	0,5	180,8	12,2	9	27,2	6,7	74,5	1,4	0,5	200,1	16,2
TX4	1	6	220,5	15,8	17,5	24,6	3,5	458,7	61,8	8	220,7	21,7	27,8	28,4	4,6	527,5	94,4	9	230,4	9,6	12,5	29,6	3,0	516,5	50,7
	3	9	43,9	8,1	55,3	2,3	0,3	233,7	8,2	9	35,4	8,2	69,3	2,3	0,4	234,4	12,4	9	24,3	5,2	64,1	1,5	0,3	232,0	10,8
	5	8	40,9	6,0	41,8	2,3	0,6	214,1	8,0	7	33,8	4,0	30,9	1,8	0,4	225,6	11,1	8	32,4	7,8	68,5	2,3	1,0	276,5	42,6
	7	8	30,2	7,5	69,8	1,3	0,3	362,3	74,6	7	22,4	3,0	35,7	1,3	0,2	266,1	22,5	7	36,5	4,3	30,9	2,4	0,2	256,9	21,3
TX6	1	8	186,7	24,9	37,7	23,4	4,6	553,1	65,2	8	169,2	25,9	43,3	19,0	4,3	498,5	74,3	9	137,2	19,9	43,6	10,6	1,7	328,4	16,1
	3	9	68,8	14,6	63,9	4,5	1,0	290,0	8,3	9	47,5	6,9	43,9	3,1	0,4	256,2	8,0	9	37,3	3,8	30,5	2,7	0,4	251,9	12,9
	5	9	47,2	8,9	56,7	3,0	0,7	241,8	18,4	9	26,6	3,8	43,1	2,2	0,6	314,4	34,6	8	23,4	1,9	22,7	1,8	0,3	274,1	9,4
	7	7	37,8	3,7	26,2	3,3	0,8	235,6	12,0	7	27,7	4,5	42,8	2,3	0,7	273,6	13,3	9	34,5	5,6	48,3	2,3	0,5	231,3	9,5

Finalmente, al analizar la uniformidad del cubrimiento según la posición de la rama en el tercio productivo, los coeficientes de variación indican que existe una influencia por el tipo de boquilla y velocidad de vuelo, en la medida que las ramas productivas están más bajas, la uniformidad aumenta o disminuye según la altura de vuelo, velocidad o tipo de boquilla, lo cual indica la necesidad de tener identificados los efectos de estos parámetros operativos sobre la calidad de la aspersión y calibrarlos de acuerdo a la ubicación del blanco donde debe llegar la aspersión.

Las evaluaciones de calidad física de las aspersiones realizadas entre 2016 y 2017, condujeron a la selección de las boquillas TJ XR11001 y TX6 para operar el dron a una velocidad de 1 m s⁻¹ en el ensayo de calidad biológica.

Etapas 2. Evaluación de la calidad biológica de una aspersión de insecticida con dron para el control de la broca

En cuanto a la eficacia de la aspersión con el dron, la Figura 5 muestra la protección de las almendras que ofreció cada tratamiento, los resultados obtenidos concuerdan con trabajos realizados en cultivos de algodón y árboles de castaño, en donde se lograron eficacias por encima del 60% en plagas del orden coleóptera, hemiptera y lepidóptera (Arakawa & Kamio, 2023; Lou et al., 2018). Cenicafé, al evaluar la calidad biológica y física de las aspersiones para el control de la broca del café en distintos sistemas cafeteros, con equipos de aplicación terrestre que utilizan volúmenes iguales a superiores a 250 L ha⁻¹, encontró una eficacia superior al 75% (Arcila-Moreno et al., 2013, 2015; Tabares-Carrillo et al., 2008), cubrimientos entre 328 y 1320 gotas/cm² y DVMs entre 98 a 310 µm (Montoya & Villalba, 2013).

Este estudio demostró que volúmenes entre 40 y 100 L ha⁻¹ asperjados con dron, producen una eficacia similar al aplicar 260 L ha⁻¹ con un equipo terrestre. En cuanto a la dosis eficaz se encontró que estuvo entre 500 y 1.000 cm³ ha⁻¹, superior a la indicada en la etiqueta del producto comercial (350 cm³ ha⁻¹), correspondiendo a concentraciones entre 5,0 y 12,5 cm³ L⁻¹ del insecticida, es decir, entre 3,6 y 8,9 veces la concentración recomendada por Cenicafé (1,4 cm³ L⁻¹). Al respecto, estudios demuestran un mayor cubrimiento y cobertura en aplicaciones con equipos terrestres que con drones de aspersión (Pan et al., 2016; Zhang et al., 2019). Sin embargo, con estos últimos utilizando volúmenes iguales o inferiores a 100 L ha⁻¹ se ha logrado un control sobre plagas y enfermedades en diferentes cultivos, similar al obtenido con equipos terrestres que aplican más de 200 L ha⁻¹ (G. Wang et al., 2019; K. Wang et al., 2020; Zhang et al., 2019); dado que, generalmente, la cantidad del pesticida aplicada por hectárea es igual, tanto con drones como con equipos terrestres, la concentración en el primer caso aumenta considerablemente. Por ejemplo, el control de áfidos en el cultivo de pimienta tuvo una concentración del insecticida flonicamid entre 7 y 21 veces más con respecto a la aspersión terrestre (Xiao et al., 2020); de igual manera, en huertos de castaño, para el control del coleóptero *Curculio sikkimensis* Heller, la concentración de flubendiamida se incrementó 50 veces (Arakawa & Kamio, 2023); en el cultivo del café, para el control de *Hemileia vastatrix* y *Cercospora coffeicola*, la concentración del fungicida cyproconazol y la mezcla azoxystrobin más cyproconazol aumentó entre 28 y 76 veces (Vitória et al., 2023); Rodrigues (2024), afirma que el aumento de la concentración insecticida mejora la eficacia del control de la broca del café.

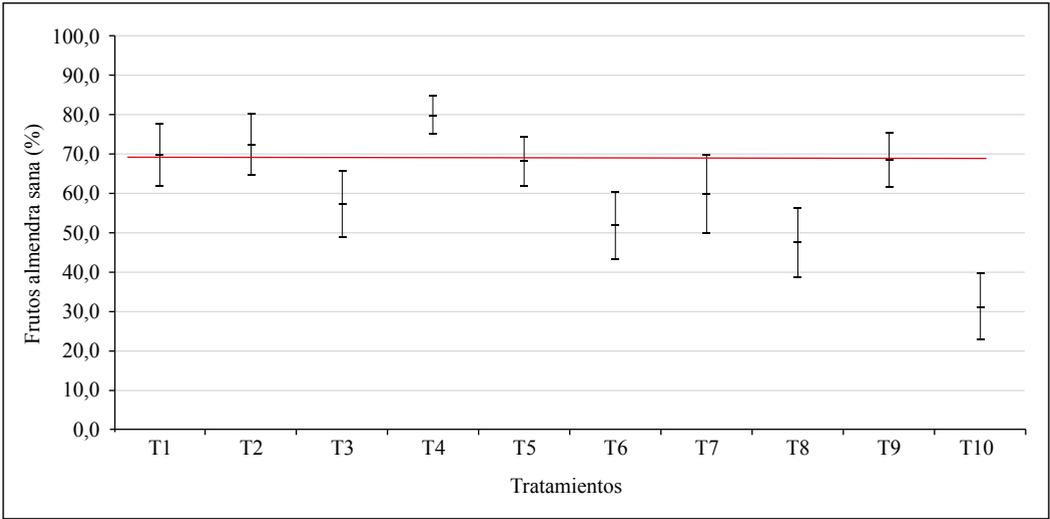


Figura 5. Promedio de porcentaje de frutos de café con almendra sana en cada tratamiento, obtenida con el dron DJI Agras MG -1S operando a 1 m s^{-1} y una altura de vuelo sobre el dosel del cultivo de 2,3 m. Naranjal, 2021

A pesar del incremento de la concentración aplicada, algunas investigaciones con drones de aspersión, han encontrado una reducción entre 25% y 66% de ingrediente activo por hectárea sin afectar la eficacia del control (Sreenivas et al., 2024; Xiao et al., 2020); en este sentido, dosis de 1.000 o $500\text{ cm}^3\text{ ha}^{-1}$, serían innecesarios y, posiblemente, podría utilizarse la dosis de etiqueta del producto ($350\text{ cm}^3\text{ L}^{-1}$) o menos, al aplicar volúmenes bajos de mezcla que permitan una concentración igual o mayor a $5,0\text{ cm}^3\text{ L}^{-1}$, para ello es necesario continuar los estudios y determinar si estos volúmenes ocasionan un cubrimiento óptimo.

Puede concluirse que:

Las aspersiones con drones para el control de la broca del café permiten obtener una adecuada distribución de las gotas en el estrato productivo de árboles de café de segunda a cuarta cosechas, cuando se usan boquillas TJ XR11001, TX4 y TX6, a una velocidad de 1 m s^{-1} , para las condiciones de este

estudio. La calidad física de las aspersiones permitió demostrar que pueden usarse drones para aplicar insecticidas para el control de la broca con eficacias similares a las obtenidas con el equipo de espalda con boquilla TX3 en la concentración de insecticida y volumen de mezcla, que se usa tradicionalmente en la caficultura colombiana.

Los resultados hallados también aportan conocimiento para el posible manejo de otras plagas o enfermedades que se ubican, particularmente, en los sectores del árbol evaluados en el presente estudio.

Es necesario validar estos resultados en lotes de diferentes pendientes, usando volúmenes por hectárea óptimos y limitando la dosis a la recomendada por la casa comercial.

Se recomienda realizar calibraciones y ajustes de operación de los drones para establecer los parámetros óptimos de vuelo como altura, ancho de faja y desplazamiento lateral o interlineado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Comité de Cafeteros del Quindío; a los Coordinadores y personal de las Estaciones Experimentales de Naranjal y Paraguaicito que participaron en el montaje de los ensayos; a los auxiliares Faber de los Ríos, de la disciplina de Entomología, a Juan Carlos Ortiz, de la disciplina de Poscosecha quien realizó todo el procesamiento de digitalización de las tarjetas y ajuste del software de análisis de imágenes; y al personal de las empresas operadoras de los drones. Esta

investigación fue financiada con recursos del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), proyecto ENT107005.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, curación de datos, investigación, metodología, administración del proyecto, visualización, redacción–borrador original: A.A.M; análisis formal, redacción–borrador original: L.C.I.Q; supervisión, visualización, redacción–borrador original: P.B.M.; todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Alvarenga, C. B. de, Zampiróli, R., Cunha, J. P. A. R. de, Rinaldi, P. C. N., Cunha, B. A. da, & Faria, L. O. (2024). Application rate and hydraulic tips used in remotely piloted aircraft affect the phytosanitary products in coffee plant canopies. *Acta Scientiarum. Agronomy*, *46*, e62969. <https://doi.org/10.4025/actasciagr.v46i1.62969>
- Arakawa, T., & Kamio, S. (2023). Control efficacy of UAV-based ultra-low-volume application of pesticide in chestnut orchards. *Plants*, *12*(14), 2597. <https://doi.org/10.3390/plants12142597>
- Arcila-Moreno, A., Benavides Machado, P., & Mejía Orozco, J. (2015). Nueva alternativa de control químico para el manejo integrado de la broca del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, *453*, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0453>
- Arcila-Moreno, A., Duarte, A. F., Villalba, D. A., & Benavides-Machado, P. (2013). Nuevo producto en el manejo integrado de la broca del café en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, *437*, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0437>
- Baio, F. H. R., Scarpin, I. M., & Silva, E. E. da. (2014). Papel hidrossensível e alternativo fotográfico em ensaios de deposição de gotas. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, *9*(4), 339-347. <https://doi.org/10.18011/bioeng2015v9n4p339-347>
- Benavides Machado, P., Ángel C., C. A., & Rivillas O., C. A. (2021). Sanidad vegetal. En *Centro Nacional de Investigaciones de Café. Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3a ed., pp. 133-178). Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/10791/00149>
- Benavides Machado, P., Gil-Palacio, Z. N., Constantino C, L. M., Villegas García, C., & Giraldo-Jaramillo, M. (2013). Plagas del café: Broca, minador, cochinillas harinosas, araña roja y monalónion. En Federación Nacional de Cafeteros (Ed.), *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 2, pp. 215-260). Cenicafé.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2017). *Anuario meteorológico cafetero 2016*. <https://doi.org/10.38141/10782/anu2016>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2018). *Anuario meteorológico cafetero 2017*. <https://doi.org/10.38141/10782/anu2017>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2022). *Anuario meteorológico cafetero 2021*. <https://doi.org/10.38141/10782/anu2021>
- Chen, S., Lan, Y., Zhou, Z., Ouyang, F., Wang, G., Huang, X., Deng, X., & Cheng, S. (2020). Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV. *Agronomy*, *10*(2), 195. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020195>
- Crause, D. H., Vitória, E. L. da, Ribeiro, L. F. O., Ferreira, F. de A., Lan, Y., & Chen, P. (2023). Droplet deposition of leaf fertilizers applied by an unmanned aerial vehicle

- in *Coffea canephora* plants. *Agronomy*, 13(6), 1506. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061506>
- Cunha, J. P. A. R. da, Lopes, L. de L., & Alvarenga, C. B. de. (2024). Chemical control of coffee berry borer using unmanned aerial vehicle under different operating conditions. *AgriEngineering*, 6(2), 1639-1648. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020093>
- Cunha, M., Carvalho, C., & Marcal, A. R. S. (2012). Assessing the ability of image processing software to analyse spray quality on water-sensitive papers used as artificial targets. *Biosystems Engineering*, 111(1), 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.002>
- Deveau, J. (2021a, julio 7). Comparing three brands of water sensitive paper – sprayers 101. *Sprayers101*. https://sprayers101.com/3_wsp/
- Deveau, J. (2021b, julio 9). Assessing water sensitive paper – Part 1 – sprayers 101. *Sprayers101*. https://sprayers101.com/assessing_wsp_pt1/
- Deveau, J. (2021c, julio 12). Assessing water sensitive paper – Part 2 – sprayers 101. *Sprayers101*. https://sprayers101.com/assessing_wsp_pt2/
- Deveau, J. (2021d, julio 27). Assessing water sensitive paper – Part 3 – Sprayers 101. *Sprayers101*. https://sprayers101.com/assessing_wsp_pt3/
- Ferguson, J. C., Chechetto, R. G., Hewitt, A. J., Chauhan, B. S., Adkins, S. W., Kruger, G. R., & O'Donnell, C. C. (2016). Assessing the deposition and canopy penetration of nozzles with different spray qualities in an oat (*Avena sativa* L.) canopy. *Crop protection*, 81, 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.11.013>
- Ferguson, J. C., Chechetto, R. G., O'Donnell, C. C., Fritz, B. K., Hoffmann, W. C., Coleman, C. E., Chauhan, B. S., Adkins, S. W., Kruger, G. R., & Hewitt, A. J. (2016). Assessing a novel smartphone application – SnapCard, compared to five imaging systems to quantify droplet deposition on artificial collectors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 128, 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.08.022>
- Ferrazzini, H., & Zamora, E. (2004). *Calibración de equipos de aeroaplicación. Tablas y esquemas* (p. 43). Dirección General de Servicios Agrícolas República Oriental del Uruguay. <http://www.chasque.net/dgsa/nuevo/DivAnalisisDiagnostico/documentosDAYD/CalibequiposAEREOS.pdf>
- Fox, R. D., Derksen, R. C., Cooper, J. A., Krause, C. R., & Ozkan, H. E. (2003). Visual and image system measurement of spray deposits using water-sensitive paper. *Applied engineering in agriculture*, 19(5), 549. <https://doi.org/10.13031/2013.15315>
- Grisso, R. D. (2019). *Droplet chart/selection guide*. <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstreams/76053ef5-e359-44b1-b785-bfeb746eb18b/download>
- He, M., Qi, P., Han, L., & He, X. (2024). Study on spray evaluation: The key role of droplet collectors. *Agronomy*, 14(2), 305. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020305>
- Hołownicki, R., Doruchowski, G., Świechowski, W., & Jaeken, P. (2002). Methods of evaluation of spray deposit and coverage on artificial targets. *Electronic journal of polish agricultural universities*, 5(1), 3. <http://www.ejpau.media.pl/articles/volume5/issue1/engineering/art-03.pdf>
- Li, L., Hu, Z., Liu, Q., Yi, T., Han, P., Zhang, R., & Pan, L. (2022). Effect of flight velocity on droplet deposition and drift of combined pesticides sprayed using an unmanned aerial vehicle sprayer in a peach orchard. *Frontiers in Plant Science*, 13, 981494. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.981494>
- Li, X., Andaloro, J. T., Lang, E. B., & Pan, Y. (2019, julio 7-10). *Best management practices for unmanned aerial vehicles (UAVs) application of insecticide products on rice*. 2019 ASABE Annual International Meeting, Boston, Massachusetts. <https://doi.org/10.13031/aim.201901493>
- Lou, Z., Xin, F., Han, X., Lan, Y., Duan, T., & Fu, W. (2018). Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites. *Agronomy*, 8(9), 187. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090187>
- Matthews, G. A. (2000). *Pesticide application methods* (Third edition). Blackwell Science Ltd.
- Meng, Y., Su, J., Song, J., Chen, W.-H., & Lan, Y. (2020). Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: Effects of operational parameters on droplet distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105282. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105282>
- Merani, V. H., Guilino, F., Ponce, M., Vázquez, J. M., Larriue, L., Giambelluca, A. L., Platz, P., Tour, S., & Mur, M. (2021). Pulverizaciones agrícolas: Comparación de metodologías para su evaluación. *Chilean journal of agricultural and animal sciences*, 37(3), 325-337. <https://doi.org/10.29393/CHJAAS37-33PAVM90033>
- Montoya, D. F., & Villalba, D. A. (2013). Evaluación física de las aplicaciones con diferentes equipos de aspersión

- para el manejo de la broca. *Revista Cenicafé*, 64(2), 48-58. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/530>
- Moraes, H. M. F. e. (2022). *Aplicação de pesticidas com veículos aéreos não tripulados nas culturas de café, citros e feijão* [Tesis de Doctorado, Universidade Federal de Viçosa]. <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.783>
- Pan, Z., Kejian, W., Qiang, L., Shaolan, H., Shilai, Y., Rangjin, X., Yongqiang, Z., Yanyan, M., & Lie, D. (2017). Droplet distribution and control against citrus leafminer with UAV spraying. *International Journal of Robotics and Automation*, 32(3), 299-307. <https://doi.org/10.2316/journal.206.2017.3.206-4980>
- Pan, Z., Lie, D., Qiang, L., Shaolan, H., Shilai, Y., Yande, L., Yongxu, Y., & Haiyang, P. (2016). Effects of citrus tree-shape and spraying height of small unmanned aerial vehicle on droplet distribution. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(4), 45-52. <https://doi.org/10.25165/ijabe.v9i4.2178>
- Qin, W.-C., Qiu, B.-J., Xue, X.-Y., Chen, C., Xu, Z.-F., & Zhou, Q.-Q. (2016). Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers. *Crop Protection*, 85, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.cpro.2016.03.018>
- Rodrigues, A. V. (2024). *Aplicação de inseticida em volumes de calda baixos para controle da broca-do-café com uso de aeronave remotamente pilotada* [Tesis de Maestría, Universidade Estadual Paulista]. <https://hdl.handle.net/11449/257515>
- Sesquile Peña, J. D. (2014). *Evaluación de la calidad de aplicación de plaguicidas en un cultivo de espinaca* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52003>
- Shan, C., Xue, C., Zhang, L., Song, C., Kaousar, R., Wang, G., & Lan, Y. (2024). Effects of different spray parameters of plant protection UAV on the deposition characteristics of droplets in apple trees. *Crop Protection*, 184, 106835. <https://doi.org/10.1016/j.cpro.2024.106835>
- Souza, F. G., Portes, M. F., Silva, M. V., Teixeira, M. M., & Furtado Júnior, M. R. (2022). Impact of sprayer drone flight height on droplet spectrum in mountainous coffee plantation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 26, 901-906. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n12p901-906>
- Sreenivas, A. G., Ranganath, Wazid, Vijayalakshmi, & Shivayogiyappa. (2024). Unmanned aerial vehicle (UAVs): A novel spraying technique for management of sucking insect pests in cotton ecosystem. *Journal of Biosystems Engineering*, 49(2), 103-111. <https://doi.org/10.1007/s42853-024-00219-y>
- Syngenta. (2020). *Manual en tecnología de aplicación (p. 94)*. https://www.syngenta.com.ar/sites/g/files/kgtny396/files/migration/f/2021/04/16/manual_en_tecnologia_de_aplicacion_syngenta.pdf
- Tabares-Carrillo, J. E., Villalba-Gault, D. A., Bustillo-Pardey, A. E., & Vallejo-Espinosa, L. F. (2008). Eficacia de insecticidas para el control de la broca del café usando diferentes equipos de aspersión. *Revista Cenicafé*, 59(3), 227-237. <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/136>
- Tang, Y., Hou, C. J., Luo, S. M., Lin, J. T., Yang, Z., & Huang, W. F. (2018). Effects of operation height and tree shape on droplet deposition in citrus trees using an unmanned aerial vehicle. *Computers and electronics in agriculture*, 148, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.026>
- TeeJet® Technologies. (2023a). *A user's guide to spray technology LI-TJ416 (p.103)*.
- TeeJet® Technologies. (2023b). *Catalog 52-M (p. 204)*. <https://www.teejet.com/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat52-m.pdf>
- Teixeira, M. M. (2010). Capítulo 5. Estudio de la población de gotas de pulverización. En J. C. Magdalena, B. Castillo, A. Di Prinzio, I. Homer Bannister, & J. Villalba (Eds.), *Tecnología de aplicación de agroquímicos* (pp. 67-76). INTA Alto Valle. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/16353>
- The Royal Meteorological Society. (s.f.). *The Beaufort Wind Scale. Weather. Recuperado el 17 de julio de 2025*. <https://www.rmets.org/metmatters/beaufort-wind-scale>
- Verma, A., Singh, M., Parmar, R. P., & Bhullar, K. S. (2022). Feasibility study on hexacopter UAV based sprayer for application of environment-friendly biopesticide in guava orchard. *Journal of Environmental Biology*, 43(1), 97-104. <https://doi.org/10.22438/JEB/43/1/MRN-1912>
- Villalba-Gault, D. A. (2008). Tecnología de aplicación y equipos de aspersión de agroquímicos. En A. E. Bustillo. (Ed.), *Los insectos y su manejo en la caficultura colombiana* (pp. 201-225). Cenicafé.
- Vitória, E. L. da, Krohling, C. A., Borges, F. R. P., Ribeiro, L. F. O., Ribeiro, M. E. A., Chen, P., Lan, Y., Wang, S., Moraes, H. M. F. e, & Furtado Júnior, M. R. (2023). Efficiency of fungicide application using an unmanned aerial vehicle and pneumatic sprayer for control of *Hemileia vastatrix* and *Cercospora coffeicola* in mountain coffee

crops. *Agronomy*, 13(2), 340. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020340>

Wang, G., Lan, Y., Yuan, H., Qi, H., Chen, P., Ouyang, F., & Han, Y. (2019). Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat field of the unmanned aerial vehicle with boom sprayer and two conventional knapsack sprayers. *Applied sciences*, 9(2), 218. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/2/218>

Wang, K., Li, L., Lü, Q., Yi, S., Zheng, Y., Xie, R., Ma, Y., He, S., & Deng, L. (2020). UAV spray technology for the citrus orchard: Taking control of the *Diaphorina citri* and *Phyllocnistis citrella* as examples. *Scientia Agricultura Sinica*, 53(17), 3509-3517. <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2020.17.008>

Xiao, Q., Du, R., Yang, L., Han, X., Zhao, S., Zhang, G., Fu, W., Wang, G., & Lan, Y. (2020). Comparison of droplet deposition control efficacy on *Phytophthora capsica* and aphids in the processing pepper field of the unmanned

aerial vehicle and knapsack sprayer. *Agronomy*, 10(2), 215. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020215>

Xu, G., Zhang, R., Chen, L., Tang, Q., Xu, M., & Zhang, W. (2019). Assessing the ability of image processing methods of droplets sprayed on water sensitive papers for aerial application. En D. Li (Ed.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture X* (Vol. 509, pp. 10-19). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06155-5_2

Zhang, X.-Q., Liang, Y.-J., Qin, Z.-Q., Li, D.-W., Wei, C.-Y., Wei, J.-J., Li, Y.-R., & Song, X.-P. (2019). Application of multi-rotor unmanned aerial vehicle application in management of stem borer (Lepidoptera) in sugarcane. *Sugar Tech*, 21(5), 847-852. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0695-y>

Zhu, H., Salyani, M., & Fox, R. D. (2011). A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(1), 38-43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.003>

EVALUACIÓN DEL GERMOPLASMA ETÍOPE COMO RECURSO PARA EL MEJORAMIENTO GENÉTICO DE *Coffea arabica* L.

Juan Carlos Arias Suárez *, Rubén Darío Medina Rivera **

Arias, J. C., & Medina-Rivera, R. (2025). Evaluación del germoplasma etíope como recurso para el mejoramiento genético de *Coffea arabica* L. *Revista Cenicafé*, 76(1), e76103. <https://doi.org/10.38141/10778/76103>



Ante el impacto económico de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br) para el cultivo de *Coffea arabica* L., la resistencia genética ha sido uno de los propósitos de los programas de mejoramiento. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el potencial de diversas fuentes de resistencia, en cruzamiento con germoplasma etíope, para la obtención de genotipos con atributos agronómicos deseables. Se evaluaron 44 progenies F4 y F5, por un ciclo de cultivo, en dos lotes experimentales, en un diseño de bloques completos al azar, registrando variables relacionadas al crecimiento, producción, características de grano y resistencia a la roya. La información obtenida en el ANOVA fue utilizada para calcular los parámetros Coeficiente de Variación Experimental (CVe), Coeficiente de Variación Genética (CVg) y Heredabilidad (h_a^2). Los CVe y CVg fueron menores al 8,0% para las variables relacionadas al crecimiento, superando este umbral para las demás variables. La h_a^2 fue superior al 78,5% en todos los casos. Estos valores indican una fuerte fijación de las características agronómicas, permitiendo mejoras en los atributos del grano y rendimiento a través de selección, mientras se conserva un crecimiento compacto. En cuanto a la resistencia a la roya, aunque todas las progenies son resistentes, el 25,0% presenta los valores más bajos de incidencia, lo que indica un alto potencial de selección. El 9,0% de las progenies cumplen con los criterios de selección establecidos por el programa y pueden ser potencialmente evaluadas en pruebas de adaptación regional, para su utilización futura en la caficultura colombiana.

Palabras clave: Recursos genéticos, fitomejoramiento, diversidad genética, fuentes de resistencia a la roya, variedades de café, Colombia, café, Cenicafé.

EVALUATION OF ETHIOPIAN GERMOPLASM AS A RESOURCE FOR THE GENETIC IMPROVEMENT OF *Coffea arabica* L.

Given the economic impact of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br) on the cultivation of *Coffea arabica* L., genetic resistance has been one of the basic objectives of breeding programs. The aim of this study was to evaluate the potential of various sources of resistance, in crossing with germplasm of Ethiopian origin, to obtain genotypes with desirable agronomic attributes. For this purpose, 44 progenies F4 and F5 were evaluated over one crop cycle in two experimental plots, using a randomized complete block design, recording variables related to growth, yield, bean characteristics, and resistance to coffee leaf rust. The data obtained from the ANOVA was used to calculate the Experimental Coefficient of Variation (CVe), Genetic Coefficient of Variation (CVg) and heritability (h_a^2) parameters. The CVe and CVg were less than 8% for growth-related variables, but exceeded this threshold for other variables. Meanwhile, h_a^2 was greater than 78.5% in all cases. These values indicate a strong fixation of agronomic traits, enabling improvements in bean characteristics and yield through selection while maintaining compact growth. In terms of rust resistance, although all progenies are resistant, 25% exhibit the lowest incidence values, indicating a high selection potential. The set of results identified that 9% of the progenies meet the selection criteria established by the program and can potentially be evaluated in regional adaptation trials, with a view to their future use in Colombian coffee growing.

Keywords: Genetic resources, plant breeding, genetic diversity, sources of resistance to coffee leaf rust, coffee varieties.

* Investigador Científico I. Disciplina de Mejoramiento Genético, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-5004-2423>

** Investigador Científico II. Disciplina de Biometría, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-9753-9613>



Con un consumo estimado de 400 billones de tazas por año, sustento de más de 60 millones de personas en docenas de países (Sachs et al., 2019), posicionan al café como uno de los cultivos de mayor importancia económica a nivel mundial. La producción está soportada en dos especies, *Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* Pierre ex A. F., siendo la primera la de mayor importancia económica y de alto reconocimiento por la calidad de su bebida. Desde el punto de vista biológico, esta especie destaca además por su adaptación a un amplio rango de ambientes, principalmente en la zona intertropical, entre los 20°N y 24°S, en rangos altitudinales entre los 700 a 2.000 m (Jaramillo, 2018). A su vez, sobresale por la diversidad de sistemas productivos donde es utilizada, desde pequeños agroforestales hasta monocultivos mecanizados a gran escala (McCook & Montero-Mora, 2024).

Estos aspectos contrastan con la baja diversidad genética de las variedades de *C. arabica* cultivadas, originada a partir de unas pocas semillas (Scalabrin et al., 2020), haciéndolas particularmente vulnerables a plagas y enfermedades. Dentro de éstas, la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk & Br.) es la de mayor impacto económico, causando pérdidas en la producción superiores al 30% en ausencia de medidas de control (Rivillas et al., 2005). Desde antes de la llegada de la enfermedad a América, programas de mejoramiento genético de los países productores de la región, con el apoyo del CIFIC (Centro de Investigaçã das Ferrugens do Cafeeiro -Portugal), iniciaron la obtención de variedades con resistencia genética, método económica y ambientalmente de mayor viabilidad. El Híbrido de Timor, híbrido natural entre *C. arabica* x *C. canephora*, fue la fuente por excelencia para este propósito, dando origen a un sinnúmero de variedades a nivel mundial, algunas de estas siendo utilizadas recientemente en la producción de híbridos F1 (Bertrand

et al., 2011). Sin embargo, muchas de las variedades obtenidas a partir de esta fuente son actualmente consideradas susceptibles (Cortina et al., 2012), posible consecuencia de la alta flexibilidad que tiene el patógeno para generar nuevas variantes en comparación a la rigidez del cultivo. En Colombia, se utilizó esta misma fuente para la obtención de las diferentes variedades, implementando la diversidad genética como estrategia para extender la durabilidad de la resistencia (Castillo & Moreno, 1988; Moreno, 2004), y estudios posteriores han demostrado su efectividad en presencia de razas compatibles (Alvarado & Moreno, 2005; Arias, 2019).

En especies perennes como el café, la obtención de variedades requiere una alta inversión en área, recursos y tiempo, los cuales, en el caso de la resistencia a la roya contrasta con la rapidez con que la enfermedad es capaz de vencerla. Ante este panorama, es necesario recurrir a diferentes fuentes, conservadas y evaluadas en los bancos de germoplasma, que permitan alcanzar los objetivos propuestos (Arias, 2023), ampliando además la diversidad genética de las variedades cultivadas. Dentro de este, recurrir al acervo genético secundario representado por las especies diploides ha sido una constante, y frecuentemente resaltado (Bertrand et al., 2023), principalmente por sus atributos intrínsecos, producto de los ambientes en los cuales evolucionaron. No obstante, su uso significa resolver problemas como las diferencias en ploidía con *C. arabica* (tetraploide vs diploide), genes deletéreos, además de un mayor tiempo de selección. En contraste, el acervo genético primario ha sido pobremente aprovechado, con la concepción de la estrecha base genética que dio origen a la especie (Scalabrin et al., 2020). Sin embargo, las evaluaciones realizadas sobre el germoplasma silvestre procedente de Etiopía, centro de origen y diversidad de la especie, denotan su potencial para diversos atributos

(Arias et al., 2025; Arias & Flórez, 2023; Molina & Medina, 2022; Romero y Cortina, 2004). El uso de este germoplasma ha sido particularmente propuesto para la producción de híbridos F1 (Bertrand et al., 2011; Georget et al., 2019) y selección (Benti et al., 2021), siendo pocos los casos donde son incluidos para mejoramiento a través de hibridación (Gichuru et al., 2021; Molina et al., 2022).

Es de tener en cuenta que, fuera de Etiopía, el acceso a germoplasma silvestre está restringido al existente en los bancos de germoplasma, que en el caso de Colombia es conservado en la Colección Colombiana de Café (Arias, 2023). Desde el ingreso de germoplasma silvestre a la CCC, este ha sido sometido a diversas caracterizaciones, que incluyen comportamiento agronómico (Castillo, 1977), características de grano (Castillo, 1978), resistencia a roya (Castillo et al., 1976), resistencia a plagas (Romero & Cortina, 2004), factores abióticos (Acuña & Sadeghian, 2020; Molina & Medina, 2022) y calidad sensorial (Arias et al., 2025), entre otros. Estos han sido valiosos aportes en el conocimiento del potencial del germoplasma conservado, y han definido su utilización en el mejoramiento genético (Castillo et al., 1976; Castillo & Moreno, 1988; Molina et al., 2022).

A pesar del gran número de variedades de *C. arabica* existentes, son escasas las que incluyen el germoplasma de procedencia etíope bajo el esquema de hibridación. Este hecho puede ser debido a la necesidad de largos periodos de evaluación y selección, que al final pueden ser compensados por la facilidad de distribución través de semilla. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue evaluar el potencial del germoplasma de procedencia etíope seleccionado en cruzamiento con otras fuentes de origen diverso en la obtención de variedades, a través del comportamiento agronómico y de resistencia a roya de 44 progenies de generaciones avanzadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. Los lotes experimentales se establecieron en un área 0,5 ha en la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé (Chinchiná, Caldas), con ubicación 04°58' N y 75°39' O, a 1.381 m de altitud, con un promedio de precipitación anual de 2.556 mm, 1.816 horas de brillo solar al año, humedad relativa de 78% y temperatura media de 20,8°C. La evaluación de las progenies se realizó entre los años 2018 y 2024, comprendiendo un ciclo productivo del cultivo.

Progenies. Se sembraron 44 progenies, 31 F4 y 13 F5, las cuales fueron producto del cruzamiento entre progenitores de diversos orígenes. El 70% de estas utilizan como progenitor recurrente progenies F3RC1 producto de la hibridación interespecífica (HIE) entre *C. arabica* x *C. canephora* seleccionadas (Alvarado & Cortina, 1997), el 22% emplea derivados de Caturra x Híbrido de Timor 1343 (CatxHdT), y en la fracción restante intervienen progenies F3 derivadas de Sudán Rumé x Catuai. Como progenitor recurrente se emplearon en 36 de las progenies 15 accesiones de origen etíope, mientras en los restantes se utilizaron progenies que involucran la variedad N.197 (Tabla 1).

Los progenitores que intervienen en los diferentes cruzamientos fueron seleccionados principalmente por resistencia a la roya del cafeto (*H. vastatrix*). En todas las generaciones se ejerció presión de selección por este aspecto, además de otras características agronómicas de interés, como producción, altura de planta, calidad sensorial, tamaño de grano, resistencia a roya, entre otros aspectos que se ilustran en la Tabla 2 (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2016).

Tabla 1. Genealogía de las 44 progenies F4 y F5 evaluadas en dos lotes experimentales.

Lote	Trat.	Cruzamiento	F2	F3	F4
1	1	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.1072	MEG2.32(2006-2) #5858	MEG2.32(2009-14) #1419	
	2		MEG2.32(2006-2) #6245	MEG2.32(2009-14) #889	
	3	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.50		MEG2.32(2009-14) #72	
	4		MEG2.32(2006-2) #6310	MEG2.32(2009-14) #78	
	5		MEG2.32(2006-2) #2997	MEG2.32(2009-14) #1282	
	6		MEG2.32(2006-2) #2947	MEG2.32(2009-14) #1465	
	7	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.173		MEG2.32(2009-14) #1200	
	8		MEG2.32(2006-2) #2985	MEG2.32(2009-14) #1199	
	9			MEG2.32(2009-14) #942	
	10	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.175	MEG2.32(2006-2) #4516	MEG2.32(2009-14) #598	
	11		MEG2.32(2006-2) #2123	MEG2.32(2009-14) #399	
	12	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.1055		MEG2.32(2009-14) #1013	
	13		MEG2.32(2006-2) #3130	MEG2.32(2009-14) #487	

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Cruzamiento	F2	F3	F4
	14			MEG2.32(2009-14) #1057	
		[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>) x CCC.250	MEG2.32(2006-2) #5782		
	15			MEG2.32(2009-14) #62	
	16	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>) x CCC.304	MEG2.32(2006-2) #5614	MEG2.32(2009-14) #503	
	17	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>) x CCC.338	MEG2.32(2006-2) #5685	MEG2.32(2009-14) #951	
1	18	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>) x [Catuaí x (Caturra x N.197)]	MEG2.32(2006-2) #4444	MEG2.32(2009-14) #403	
	19	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>) x CCC.50	MEG2.32(2006-2) #6454	MEG2.32(2009-14) #620	
	20	{[(Caturra x HDT) x (Caturra x HDT)] x [Catuaí x (Caturra x N.197)]} x CCC.175	MEG2.32(2006-2) #4250	MEG2.32(2009-14) #1308	
	21		MEG2.32(2006-2) #636w9	MEG2.32(2009-14) #1070	
		[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>) x CCC.249			
	22		MEG2.32(2006-2) #6328	MEG2.32(2009-14) #1331	

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Cruzamiento	F2	F3	F4
	1		MEG2.32(2006-2) #4426	MEG2.32(2009-13) #333	FIT102009(Vitrina) #427
	2	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>) x [Catuai x (Caturra x N.197)]]	MEG2.32(2006-2) #4478	MEG2.32(2009-13) #958	FIT102009(Vitrina) #493
	3		MEG2.32(2006-2) #4394	MEG2.32(2009-13) #53	FIT102009(Vitrina) #480
	4		MEG2.32(2006-2) #4405	MEG2.32(2009-13) #195	FIT102009(Vitrina) #460
	5	{(Caturra x HDT) x [(Caturra x Ennarea) x HDT]} x CCC.291	MEG2.32(2006-2) #216	MEG2.32(2009-13) #85	FIT102009(Vitrina) #218
2	6	[(Caturra x HDT) x (Caturra x HDT)] x [Catuai x (Caturra x N.197)]	MEG2.32(2006-2) #5365	MEG2.32(2009-13) #66	FIT102009(Vitrina) #116
	7	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.173	MEG2.32(2006-2) #2979	MEG2.32(2009-13) #242	FIT102009(Vitrina) #364
	8		MEG2.32(2006-2) #2975	MEG2.32(2009-14) #1563	
	9	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.1055	MEG2.32(2006-2) #3139	MEG2.32(2009-13) #604	FIT102009(Vitrina) #612
	10	{(Caturra x HDT) x [Caturra x (Caturra x HDT)]} x CCC.50	MEG2.32(2006-2) #14	MEG2.32(2009-13) #572	FIT102009(Vitrina) #341
	11				FIT102009(Vitrina) #728

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Cruzamiento	F2	F3	F4
	12		MEG2.32(2006-2) #567	MEG2.32(2009-13) #155	FIT102009(Vitrina) #621
	13	[(Caturra x HDT) x (Caturra x HDT)] x CCC.1162			FIT102009(Vitrina) #633
	14		MEG2.32(2006-2) #569	MEG2.32(2009-13) #585	FIT102009(Vitrina) #635
	15	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x [Catuai x (Caturra x N.197)]	MEG2.32(2007-7) #731	MEG2.32(2010-5) #34	
	16	[(Caturra x HDT) x (Caturra x HDT)] x CCC.1049	MEG2.32(2007-7) #73	MEG2.32(2010-5) #67	
2	17	(Caturra x HDT) x CCC.1166	MEG2.32(2007-7) #523	MEG2.32(2010-5) #197	
	18		MEG2.32(2007-7) #563	MEG2.32(2010-5) #461	
	19	(Sudan Rume x Catuai) x CCC.249		MEG2.32(2010-5) #205	
	20		MEG2.32(2007-7) #545	MEG2.32(2010-5) #528	
	21	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x [Catuai x (Caturra x N.197)]	MEG2.32(2007-7) #760	MEG2.32(2010-5) #384	
	22	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.1060	MEG2.32(2007-7) #668	MEG2.32(2010-5) #633	

Fuente: Evaluación de poblaciones con resistencia a la roya, derivadas del Híbrido de Timor (MEG102004). Informe anual. Cenicafé 2016.

Tabla 2. Evaluación de poblaciones con resistencia a la roya, derivadas del Híbrido de Timor (MEG102004).

Lote	Progenitor	Progenie	Producción (kg/planta)	Altura a 24 meses (cm)	Calidad sensorial (SCAA)	Tamaño de grano (% supremo)	% Plantas <3 (Eskes)	Color de fruto	Color de hojas jóvenes
	MEG2.32(2006-2) #5858	1	10,3	145,0	83,3	74,9	90,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #6245	2	9,2	135,1	81,0	64,7	85,0	Rojo, segrega	Verde
	MEG2.32(2006-2) #6310	3, 4	9,3	144,7	83,0	74,1	94,7	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #2997	5	9,1	147,1	83,5	68,1	100,0	Rojo	Bronce
	MEG2.32(2006-2) #2947	6	7,3	147,3	83,5	79,0	100,0	Rojo, segrega	Verde
	MEG2.32(2006-2) #2985	7, 8	8,1	147,4	83,0	82,1	90,0	Rojo, segrega	Verde
	MEG2.32(2006-2) #4516	9, 10	9,8	139,0	81,0	78,9	95,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #2123	11	7,8	145,3	83,8	68,3	100,0	Rojo	Verde
1	MEG2.32(2006-2) #3130	12, 13	7,2	133,3	82,5	59,1	75,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #5782	14, 15	6,4	139,4	83,3	71,8	75,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #5614	16	6,8	138,7	-	83,2	100,0	Rojo, segrega	Verde
	MEG2.32(2006-2) #5685	17	5,7	123,0	-	80,3	100,0	Rojo, segrega	Verde
	MEG2.32(2006-2) #4444	18	8,9	144,6	-	82,6	85,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #6454	19	7,5	143,8	83,0	79,1	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #4250	20	9,4	143,0	83,0	55,8	77,8	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #6369	21	7,3	139,6	82,5	72,5	85,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #6328	22	7,1	142,3	80,5	63,2	70,0	Rojo, segrega	Verde

Continúa...

...continuación.

Lote	Progenitor	Progenie	Producción (kg/planta)	Altura a 24 meses (cm)	Calidad sensorial (SCAA)	Tamaño de grano (% supremo)	% Plantas <3 (Eskes)	Color de fruto	Color de hojas jóvenes
	MEG2.32(2009-13) #333	1	8,8	151,0	85,5	62,9	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2009-13) #958	2	9,6	166,0	86,6	48,7	100,0	Rojo, segrega	Bronce
	MEG2.32(2009-13) #53	3	11,8	173,0	84,3	68,7	100,0	Rojo	Bronce, segrega
	MEG2.32(2009-13) #195	4	11,0	167,0	-	-	100,0	Rojo, segrega	Bronce
	MEG2.32(2009-13) #85	5	10,5	146,0	-	77,2	100,0	Rojo	Bronce, segrega
	MEG2.32(2009-13) #66	6	14,1	156,0	83,4	56,3	100,0	Rojo	Bronce, segrega
	MEG2.32(2009-13) #242	7	9,8	145,0	-	-	100,0	Rojo, segrega	Bronce, segrega
	MEG2.32(2006-2) #2975	8	7,0	148,9	83,3	81,3	95,0	Rojo	Verde
2	MEG2.32(2009-13) #604	9	9,3	150,0	-	-	100,0	Rojo	Bronce
	MEG2.32(2009-13) #572	10, 11	7,7	148,0	-	-	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2009-13) #155	12	6,8	148,0	-	-	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2009-13) #585	13, 14	7,4	163,0	-	-	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #731	15	14,1	158,5	80,5	35,3	94,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #73	16	15,2	159,5	83,6	72,1	85,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #523	17	13,4	123,9	82,5	22,7	89,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #563	18	12,7	146,8	81,6	47,4	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #545	19, 20	11,0	139,3	80,6	37,2	90,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #760	21	12,4	155,0	81,0	46,5	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #668	22	11,0	156,8	81,3	49,4	94,0	Rojo	Verde

Fuente: Informe anual. Cenicafé 2016.

Diseño experimental. Las progenies se establecieron bajo el modelo de bloques completos al azar con seis bloques, donde la parcela experimental fue un surco con diez plantas, de las cuales ocho fueron efectivas, y la unidad de observación fue la planta. Además de las 44 progenies se incluyeron dos variedades comerciales utilizadas como control así, la variedad Caturra como control susceptible, mientras que la variedad Castillo® fue utilizada como control resistente a la roya.

Antes del establecimiento de las progenies en el campo, en la etapa de almácigo dentro de cada progenie se eliminaron las plantas anormales y de escaso crecimiento, siendo solo establecidas aquellas que conservaron el fenotipo de la progenie. De igual manera, durante esta etapa se identificó la segregación o no para el gen *Ct* que condiciona porte bajo en todas las progenies evaluadas.

En el lote experimental, las progenies se establecieron a una densidad de 7.142 plantas/ha (distancias de siembra de 1,0 m entre plantas y 1,4 m entre surcos), con un tallo por sitio. Se realizó el reemplazo de sitios perdidos durante los primeros seis meses, utilizando plantas establecidas para este propósito. No se realizó control químico de enfermedades en ninguna de las etapas de establecimiento y evaluación. La fertilización y corrección de acidez se realizó de acuerdo a los resultados del análisis de suelos.

Evaluación agronómica. Se evaluaron solo aquellas variables de interés agronómico, las cuales se relacionan con la densidad de siembra y ciclos de renovación (crecimiento), valor y aceptación comercial del producto (características del grano), potencial productivo (producción) y resistencia a enfermedades (roya).

Altura de la planta (ALT) y diámetro de copa (DCOP). Estas variables se evaluaron a los 24 meses después del establecimiento en el campo. Para la altura de la planta se tomó la distancia en centímetros (cm) desde la base del suelo hasta el ápice, mientras que para el diámetro de copa se tomó la distancia (en cm) entre las ramas plagiotrópicas opuestas de mayor longitud.

Características de fruto y grano. Los muestreos para su evaluación se realizaron en las semanas de mayor producción, determinando: porcentaje de granos vanos (GVAN), definido como el número de frutos maduros sanos que flotan en una muestra de 100 granos tomada al azar de la masa recolectada. El porcentaje de grano tipo caracol (GCAR) se determinó contando el número de granos con esta forma, existentes en una muestra de 400 granos tomada al azar. Para la estimación del tamaño de grano se utilizó una muestra de 90 a 100 gramos de café almendra (sin pergamino), y se determinó mediante el porcentaje del peso total retenido sobre una malla de orificios circulares de tamaño 17/64 de pulgada después de un minuto de agitación. Comercialmente, este tipo de café es denominado como café supremo (GSUP).

Adicionalmente, mediante observaciones de campo se denotó la segregación o no para color de fruto en las progenies evaluadas. Esta actividad se realizó por la importancia que sobre la calidad puede tener la presencia de frutos amarillos, debido la dificultad de reconocimiento del grado de madurez óptimo.

Producción. Para determinar el potencial productivo de las progenies, se registró la cantidad en kilogramos de café cereza en cada uno de los pases para cada planta, desde el inicio del período productivo durante tres años consecutivos (PACU).

Resistencia a la roya. Se utilizó la infección bajo condiciones de campo para determinar la resistencia de las progenies, teniendo la variedad susceptible como punto de referencia para determinar la presencia de la enfermedad y condiciones ambientales favorables para su desarrollo. Para la evaluación, se empleó la escala I (Eskes & Toma-Braghini, 1981), la cual considera el árbol entero como unidad de observación, asignando un valor ascendente entre 0 y 9, dependiendo del número de lesiones esporuladas y su posición en el árbol. Se realizaron seis mediciones, dos por año a partir de los 18 meses después de la siembra, en los periodos de mayor incidencia de la enfermedad para la zona de estudio.

Análisis de la información

Se verificó la consistencia de los valores para las variables en cada una de las unidades de observación, descartando aquellos que provenían de plantas con problemas de desarrollo o afectación mecánica. Para la variable producción, se sumaron los kilogramos de café cereza obtenidos en cada planta durante el período evaluado. En el caso de las características de grano, se verificó la consistencia entre períodos, y se promediaron los valores por planta. Para las variables cuantitativas, se realizó el análisis de varianza (ANAVA) para un diseño en bloques completos al azar, utilizando el procedimiento GLM del programa estadístico SAS V 9.4. Cuando el ANAVA mostró diferencias estadísticamente

significativas, se realizó la prueba de Dunnett para identificar diferencias a favor de progenies con respecto a la variedad resistente (testigo). Los estimadores coeficiente de variación experimental (CV_e), coeficiente de variación genética (CV_g) y heredabilidad en sentido amplio (h_a^2) se determinaron por el método de los cuadrados medios esperados de los componentes de la varianza y el cociente entre los desvíos estándar respectivos y la media de cada variable, respectivamente (Barriga et al., 1983; Johnson et al., 1955).

Para determinar la resistencia de las progenies evaluadas se tomó la calificación máxima obtenida en cada unidad de observación, como el nivel que la enfermedad puede alcanzar, y se realizaron distribuciones de frecuencia para cada progenie. Las plantas con calificaciones iguales o menores a tres pueden ser consideradas resistentes (Eskes et al., 1990), por lo que, en este estudio se definió una progenie como resistente, cuando al menos el 90% de las plantas evaluadas presentan valores máximos menores o iguales a tres en la escala.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación agronómica. En términos generales, en los lotes experimentales se observaron progenies con atributos agronómicos de gran interés que denotan la fijación de estos, así como la posibilidad de obtener avances significativos a través de selección (Tabla 3).

Tabla 3. Valores medios y error estándar (EE) para las variables agronómicas de 44 progenies F4 y F5 evaluadas en los dos lotes experimentales.

Lote	Trat.	Progenie	Variable											
			ALT (cm)	EE	DCOP (cm)	EE	GVAN (%)	EE	GCAR (%)	EE	GSUP (%)	EE	PACU (kg/cc/p)	EE
1	1	MEG2.32(2009-14) #1419	125,4*	1,6	140,5*	2,2	5,4	0,3	16,2*	0,6	47,1*	2,0	9,7	0,3
	2	MEG2.32(2009-14) #889	155,5	2,2	151,0	2,3	5,9	0,4	12,4*	0,4	55,8*	2,1	9,3	0,2
	3	MEG2.32(2009-14) #72	128,9*	3,9	121,6*	5,8	3,6	0,3	11,8	0,4	49,6*	2,7	7,1*	0,5
	4	MEG2.32(2009-14) #78	125,8*	3,1	118,3*	4,7	4,3	0,7	11,1	0,6	51,6*	3,5	4,8*	0,3
	5	MEG2.32(2009-14) #1282	141,0	2,6	145,7	2,8	9,3	0,8	17,0*	0,9	47,0*	2,6	10,2	0,5
	6	MEG2.32(2009-14) #1465	156,5	3,3	149,0	3,9	7,1	0,4	10,2	0,6	56,0*	2,2	10,2	0,3
	7	MEG2.32(2009-14) #1200	131,8*	3,3	122,3*	4,0	6,5	0,7	12,4*	0,9	50,3*	3,0	9,1	0,5
	8	MEG2.32(2009-14) #1199	131,7*	2,8	132,4*	3,2	6,1	0,5	14,2*	0,6	35,9*	2,5	9,6	0,5
	9	MEG2.32(2009-14) #942	161,4*	2,4	157,4	2,2	4,6	0,5	9,7	0,5	75,2	1,3	10,8	0,4
	10	MEG2.32(2009-14) #598	150,6	2,3	145,1	3,5	3,8	0,3	16,7*	0,5	81,5	0,6	10,6	0,3
	11	MEG2.32(2009-14) #399	145,7	1,8	131,7*	2,0	7,0	0,4	13,8*	0,7	78,9	0,9	7,4*	0,3
	12	MEG2.32(2009-14) #1013	145,8	3,6	149,3	4,2	6,8	0,5	13,3*	0,7	59,9*	2,5	11,4	0,5

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Progenie	Variable												
			ALT (cm)	EE	DCOP (cm)	EE	GVAN (%)	EE	GCAR (%)	EE	GSUP (%)	EE	PACU (kg/cc/p)	EE	
1	13	MEG2.32(2009-14) #487	139,8*	2,4	136,1*	3,4	6,8	0,6	10,5	1	23,5*	2,7	7,3*	0,4	
	14	MEG2.32(2009-14) #1057	142,3	2,5	142,5	2,5	4,3	0,2	14,2*	0,5	59,8*	2,0	8,5	0,3	
	15	MEG2.32(2009-14) #62	139,6	2,5	135,1*	2,3	6,2	0,4	14,4*	0,5	72,4	1,1	8,8	0,3	
	16	MEG2.32(2009-14) #503	142,7	2,1	142,9	3,2	3,8	0,4	7,2	0,4	40,8*	2,1	11,3	0,4	
	17	MEG2.32(2009-14) #951	137,3	3,2	144,7	3,1	3,6	0,2	10,7	0,6	83,8	1,1	7,6*	0,4	
	18	MEG2.32(2009-14) #403	146,0	2,1	147,3	2,6	7,8	1,2	11,6	0,7	80,5	1,9	10	0,4	
	19	MEG2.32(2009-14) #620	135,4*	2,5	144,9	3,3	4,3	0,3	13,9*	0,5	45,9*	2,5	10,1	0,4	
	20	MEG2.32(2009-14) #1308	147,8	2,7	147,0	2,3	5,7	0,4	16,6*	1	67,4*	2,0	8,3	0,4	
	21	MEG2.32(2009-14) #1070	135,6*	2,2	136,2*	3,1	7,9	1	15,1*	0,6	66,0*	1,6	8,6	0,5	
	22	MEG2.32(2009-14) #1331	145,1	2,3	149,8	3,1	6,6	0,7	12,4*	0,5	66,9*	2,4	9,3	0,4	
			Variedad Resistente	151,0	3,2	151,8	3,9	5,6	0,4	9,7	0,5	79,1	1,9	9,7	0,4
			Variedad Susceptible	154,3	2,0	150,7	2,2	7,2	0,9	11,0	0,6	42,7*	2,6	4,9*	0,3

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Progenie	Variable											
			ALT (cm)	EE	DCOP (cm)	EE	GVAN (%)	EE	GCAR (%)	EE	GSUP (%)	EE	PACU (kg/cc/p)	EE
2	1	FIT102009(Vitrina) #427	146,2	2,4	140,5*	3,1	4,4	0,3	15,2*	0,5	71,6	1,8	9,1*	0,4
	2	FIT102009(Vitrina) #493	178,1*	1,9	169,1	2,1	4,6	0,3	12,2	0,4	38,3*	2,9	11,9*	0,3
	3	FIT102009(Vitrina) #480	170,1*	2,0	163,8	2,1	6,3	0,7	14,2*	0,6	66,1*	2,6	9,4*	0,3
	4	FIT102009(Vitrina) #460	156,6	3,6	150,7*	3,3	9,1	0,8	15,9*	0,6	71	2,0	8,9	0,4
	5	FIT102009(Vitrina) #218	175,8*	2,2	176,6*	2,2	7,8	0,9	15,5*	0,7	83	1,2	10,8*	0,4
	6	FIT102009(Vitrina) #116	160,3	2,7	149,7*	3,3	4,6	0,3	15,2*	0,8	73,5	2,0	9	0,4
	7	FIT102009(Vitrina) #364	169,8*	1,8	164,3	2,2	3,5	0,2	11,8	0,3	65,6*	2,4	12,2*	0,5
	8	MEG2.32(2009-14) #1563	165,2*	2,3	165,8	3,0	6,3	0,7	13,7	0,8	60,1*	2,2	9,4*	0,3
	9	FIT102009(Vitrina) #612	153,9	1,9	150,7*	2,0	7,0	0,4	12,4	0,4	77,4	1,7	9,3*	0,4
	10	FIT102009(Vitrina) #341	152,0	1,9	150,9*	2,8	3,4	0,7	17,0*	1,2	45,1*	4,7	6,3	0,3
	11	FIT102009(Vitrina) #728	148,9	2,0	156,3	1,9	4,0	0,9	15,9*	1,9	30,2*	5,4	5,8*	0,3
	12	FIT102009(Vitrina) #621	151,3	2,6	146,9*	2,2	6,8	1,1	16,6	1,9	67,8*	3,0	5,9*	0,3

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Progenie	Variable											
			ALT (cm)	EE	DCOP (cm)	EE	GVAN (%)	EE	GCAR (%)	EE	GSUP (%)	EE	PACU (kg/cc/p)	EE
2	13	FIT102009(Vitrina) #633	157,4	2,1	137,7*	2,2	4,6	0,6	12,8*	1,1	38,6*	3,7	6,1*	0,3
	14	FIT102009(Vitrina) #635	145,8	2,2	141,6*	2,2	6,5	0,7	13	0,8	48,9*	3,7	7,0	0,3
	15	MEG2.32(2010-5) #34	173,5*	2,1	166,0	2,5	4,7	0,5	16,1*	0,9	53,8*	2,6	9,1*	0,3
	16	MEG2.32(2010-5) #67	166,2*	2,4	153,0	2,5	6,3	0,5	7,6	1	90,3	1,1	8,8	0,3
	17	MEG2.32(2010-5) #197	153,1	2,4	138,8*	2,1	5,6	0,5	17,8*	0,9	62,5*	3,0	7,8	0,4
	18	MEG2.32(2010-5) #461	169,6*	2,6	161,2	3,0	3,8	0,3	12,7	0,5	61,9*	2,3	9,0	0,4
	19	MEG2.32(2010-5) #205	146,8	2,5	150,2*	3,7	7,2	0,8	18,4*	0,7	71,7	1,5	8,0	0,4
	20	MEG2.32(2010-5) #528	141,8*	2,0	146,9*	2,0	7,4	0,8	20,2*	1	67,0*	2,5	6,0*	0,3
	21	MEG2.32(2010-5) #384	168,0*	2,5	164,9	3,1	5,0	0,5	10,6	0,5	70,0	1,2	9,2*	0,3
	22	MEG2.32(2010-5) #633	158,7	3,7	151,7*	3,1	4,3	0,3	14,5	0,5	73	1	9,8*	0,3
		Variedad Resistente	154,0	2,2	163,6	3,0	8,9	0,9	9,5	0,7	87,7	0,8	7,6	0,3
		Variedad Susceptible	152,8	3,2	148,4*	3,6	3,3	0,3	10,2	0,4	52,8*	1,7	6,9	0,3

* Indica diferencias estadísticamente significativas con respecto a la variedad comercial (Variedad Castillo®) según prueba de Dunnett al 5%.

ALT: Altura de planta, DCOP: diámetro de copa, GVAN: contenido de granos vanos, GCAR: tipo caracol, GSUP: tamaño de grano y PACU: producción acumulada.

Adicional al comportamiento agronómico de los genotipos evaluados, en el mejoramiento genético los estimadores CV_e , CV_g y h_a^2 son de gran relevancia. El primero es un indicativo de la variabilidad de los datos registrados en el lote experimental, además de permitir cuantificar de forma práctica la influencia del ambiente sobre la expresión de una determinada característica. Así mismo, el CV_g indica la cantidad de variabilidad genética entre familias y las medias poblacionales respectivas, mientras la h_a^2 expresa la confiabilidad del valor fenotípico como estimador del valor genético, convirtiéndose en un valor predictivo del comportamiento de la población (Falconer, 1987). De acuerdo con este, a mayor valor de heredabilidad, mayor será la ganancia genética por selección. En resumen, estos estimadores representan la magnitud de la variabilidad genética existente e indican que la selección de las progenies con los mejores valores repercutirá en la mejora de estos atributos en la población (Piza et al., 2023).

En las progenies el CV_e presentó valores bajos (<10%) para tres de las seis variables evaluadas, para el caso de aquellas relacionadas al crecimiento de la planta (ALT, DCOP) los valores fueron similares en el parámetro CV_g , mientras para el contenido de GSUP fue cerca de un tercio de su valor (Tabla 4). Este comportamiento permite denotar la imposibilidad de seguir reduciendo el porte de las plantas a través de selección, mientras que la variación debida al componente genético en el tamaño de grano, así como para las demás variables permite obtener avances importantes en la población.

Para el caso de las variables ALT y DCOP, fenotípicamente para ambos lotes experimentales todas las progenies fueron consideradas de crecimiento compacto por dos razones fundamentales: primero, los valores para las variables relacionadas (ALT,

DCOP) no se alejaron de los observados para este tipo de crecimiento; segundo, en las observaciones realizadas en almácigo y durante el establecimiento no se denotó en ninguna de las progenies la presencia de entrenudos de mayor longitud, característico de variedades de porte alto.

Adicionalmente, el bajo CV_g puede estar relacionado con el determinismo genético de esta variable en la especie, donde a pesar de ser de tipo cuantitativo, se han identificado tres genes dominantes (Ct , Sb y Sr) (Carvalho et al., 1984) que reducen de manera significativa la longitud de entrenudos, siendo las progenies evaluadas de constitución $CtCt$. Adicionalmente los valores de h_a^2 , superiores al 78% para estas variables manifiestan la posibilidad de predecir su comportamiento en generaciones posteriores. Es de tener en cuenta que las estimaciones realizadas son el resultado de su interacción en un único ambiente, por lo que los valores de h_a^2 determinados pueden ser sobreestimados (Johnson et al., 1955; Servellón, 1996), siendo necesaria su comprobación temporal y espacial. Sin embargo, en *C. arabica* la variación observada para estas variables son mayoritariamente de origen genético por lo que, si bien es reconocida una interacción con el ambiente, las diferencias entre progenies tienden a mantenerse a través de estos (Castillo & Moreno, 1988).

Caso contrario ocurre con las características de grano, donde los mayores valores de CV_g y h_a^2 fueron observados para las progenies evaluadas en ambos lotes experimentales, denotando la posibilidad de obtener avances debido al control genético existente. En el caso de los defectos de grano, su ocurrencia está relacionada con abortos en estados tempranos (grano caracol) o tardíos (grano vano) de desarrollo del grano (Bertrand et al., 2011) que, bajo condiciones óptimas de cultivo tienen un componente genético importante, de mayor

Tabla 4. Parámetros estadísticos para distintas variables medidas en 44 progenies F4 y F5 evaluadas en los dos lotes experimentales.

Variable	QM _{Pro}		QM _{Res}		μ _{Pr}		CVe		CVg		h _a ²			
	Lote 1	p-value	Lote 2	p-value	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2		
ALT (cm)	590,0	1,9 E-12	703,6	2,4 E-15	88,4	79,3	141,9	159,6	6,6	5,6	6,5	6,4	85,0	88,7
DCOP (cm)	597,0	3,1 E-8	684,9	9,1 E-12	128,2	102,2	141,3	154,6	8,0	6,6	6,3	6,4	78,5	85,1
GVAN (%)	13,0	3,4 E-14	10,4	1,1 E-13	1,6	1,5	5,6	5,4	22,7	23,1	24,7	22,7	87,5	85,7
GCAR (%)	41,2	6,7 E-23	31,3	7,2 E-12	2,9	5,0	13,1	13,7	13,1	16,5	19,5	15,4	93,1	84,2
GSUP (%)	1603,0	1,2 E-24	1291,5	6,3 E-47	32,6	25,5	59,3	64,0	9,8	8,1	27,4	23,1	98,0	98,0
PACU (kg/ cc/p)	16,6	1,9 E-16	19,8	4,1 E-20	2,3	1,6	9,1	8,6	18,4	15,4	18,2	20,8	86,0	91,7

QM_{Pro} cuadrado medio progenie; QM_{Res}, cuadrado medio del residuo; μ_{Pr}, media de progenies; CVe, coeficiente de variación experimental; CVg, coeficiente de variación genética; h_a², heredabilidad en sentido amplio.

ALT: Altura de planta, DCOP: diámetro de copa, GVAN: contenido de granos vanos, GCAR: tipo caracol, GSUP: tamaño de grano y PACU: producción acumulada.

frecuencia en poblaciones de origen híbrido (Alvarado & Cortina, 1997; Cortina & Castro, 2015). A su vez, para el tamaño de grano se reconoce una alta influencia ambiental (Castillo & Moreno, 1982) y efectos heteróticos (Castillo & Moreno, 1988).

En el cultivo de café la variación existente para las características de grano ha permitido cambios importantes, donde el mayor tamaño y reducido contenido de defectos (vanos y caracol) son la constante y un prerrequisito de aceptación (Alvarado, 2002). Entre lotes experimentales, las progenies evaluadas presentan valores similares, donde las diferencias entre las medias no supera el 8,0%, por lo que podrían considerarse uniformes. Este hecho está posiblemente relacionado a los criterios de selección establecidos en generaciones anteriores, aspecto que se refleja principalmente en el contenido de GVAN, donde todas las progenies presentaron valores dentro del rango de aceptación comercial (<10%) (Tabla 3). Este comportamiento es concordante con otros estudios (Castillo & Moreno, 1988), que resaltan la alta respuesta a la selección de esta variable, con h_a^2 entre 0,51 y 0,86, valores similares a los observados en este estudio (0,87 – 0,85).

Entre tanto, el contenido de GCAR tuvo una media de 13,1 y 13,7, donde el 20% de las progenies presentan valores por debajo del valor fijado como criterio de selección (<10%), mientras en 73% de estas no supera el 15% (Tabla 3), valor común en variedades comerciales de amplia aceptación (Castillo & Moreno, 1988).

El mayor contenido de este tipo de grano en las progenies evaluadas puede tener relación con los progenitores utilizados. En primer lugar, el 70% de estas utilizan derivados de hibridación interespecífica (*C. arabica* x *C. canephora*) donde una

alta frecuencia de este tipo de grano es característico (Alvarado & Cortina, 1997; Cortina, 2019; Cortina & Castro, 2015). En segundo lugar, como progenitor recurrente es utilizado germoplasma de procedencia etíope, donde este tipo de grano es predominante (Meyer et al., 1968). Estos hechos demuestran la importancia del conocimiento de las fuentes a utilizar por los programas de mejoramiento genético, del cual dependerá la intensidad de selección requerida cuando se quiere hacer selección para diversos atributos. Este aspecto es resaltado (Bertrand et al., 2005), y aunque el valor de h_a^2 observado en las poblaciones bajo estudio es mayor a 84%, los CV_g inferiores al 20% indicarían que la ganancia agronómica posiblemente sea baja en generaciones posteriores. Sin embargo, al igual que para las variables de crecimiento, los valores para los defectos observados en las progenies no son una limitante importante. En contraste, variables como el tamaño de grano, rendimiento y especialmente resistencia a la roya del café, son clave para el uso y aceptación comercial de cualquier genotipo.

En las progenies bajo estudio se observó un contenido de GSUP comprendido entre el 21,7% y el 88,3%, siendo para el 54% de ellas superior al 60%, valor de referencia en variedades tradicionales (Tabla 3). A pesar de que se ha indicado una h_a^2 de 0,39 (Castillo & Moreno, 1982) y la presencia de efectos heteróticos, los cuales tienden a disminuir a través de generaciones, el contenido de GSUP es después de la resistencia a la roya, la variable donde mayores logros se ha obtenido en las variedades actuales (Alvarado, 2002; Flórez et al., 2016). Los contenidos de GSUP han pasado de alrededor de 60% a valores por encima del 80% (Flórez et al., 2016), preferidas por los caficultores, dada su relación directa con un mayor valor comercial del producto

(Alvarado, 2002). Contrario a otros estudios (Castillo & Moreno, 1982), en este la h_a^2 tomó valores en ambos lotes mayores al 95%, que sumado a los CVg mayores al 20% indican la posibilidad de seleccionar progenies con altos contenidos de GSUP y que esta característica posiblemente será mantenida en generaciones posteriores. Este hecho es resaltado por Castillo & Moreno (1988), donde además indican que existe una correlación alta ($>0,67$) entre progenitores y progenie para esta variable. No obstante, en este estudio solo el 25% de las progenies presentaron un comportamiento similar al de su progenitor, siendo en el lote experimental uno, el contenido menor al esperado, mientras en el lote experimental dos ocurrió el caso opuesto.

Es de anotar que el comportamiento para esta variable en las familias que dieron origen a las progenies evaluadas en el lote experimental dos, pudo ser influenciado por condiciones ambientales o de manejo agronómico, dado que las variedades comerciales utilizadas como control presentaron contenidos inferiores a los esperados (datos no mostrados). Si bien los valores de h_a^2 y CVg son favorables para la selección, los factores no genéticos también deben ser considerados.

El potencial productivo es un objetivo básico de los programas de mejoramiento genético, debido a que otros aspectos como calidad y resistencia a enfermedades pierden interés cuando la producción es baja. Las progenies evaluadas produjeron entre 4,8 y 12,2 kg/planta de café cereza (cc), la media entre lotes experimentales, difirió en 0,5 kg/planta de cc, mientras los valores extremos difirieron entre 0,8 y 1,0 kg/planta de cc (Tabla 3). En ambos lotes experimentales, los parámetros de h_a^2 y CVg mostraron valores de utilidad para la selección, similares a los reportados en otros estudios (Castillo

& Moreno, 1982), que en conjunto con las demás características evaluadas podrían denotar el potencial de estas progenies. Aunque la selección de las progenies de mayor producción asegura ganancias considerables en las generaciones siguientes (Castillo & Moreno, 1988), los valores de CVg no superaron el 20%, lo que limitaría dicha ganancia. De igual manera, para el lote experimental uno, el CVe (18,43%) fue similar al CVg (18,16%), consecuencia posiblemente de la alta interacción genotipo x ambiente, la cual condiciona la expresión de esta variable.

Resistencia a la roya

En el caso de la resistencia a la roya, principal propósito de desarrollo de las progenies bajo estudio, aunque en las generaciones anteriores se hizo selección por esta característica (Tabla 2), se observó una considerable variación en su respuesta bajo condiciones de campo. De acuerdo con los criterios de selección establecidos, el 25% de las progenies evaluadas se destaca por su resistencia a la roya, mientras en las demás se observó un comportamiento variable, sin alcanzar en ningún caso valores similares a los de la variedad susceptible (Tabla 5).

En café, la resistencia a la enfermedad se rige bajo la teoría de gen por gen (Flor, 1971), hecho que permitió la identificación de genes y su transferencia para la obtención de variedades resistentes mediante selección asistida (Mayne, 1932; Rodrigues et al., 1975). Después de la llegada de la enfermedad a América, la infección natural en el campo fue implementada por los programas de mejoramiento genético (Moreno, 2004), dado que una mayor diversidad de variantes de la enfermedad hacía poco eficiente la selección previamente realizada con razas conocidas (Alvarado & Cortina, 1997).

Tabla 5. Distribución de frecuencia para la calificación máxima de incidencia por roya en 44 progenies F4 y F5 evaluadas en dos lotes experimentales.

Lote	Tratamiento	Progenie	Porcentaje de plantas de cada en cada grado de la escala I de Eskes y Braghini			Total Plantas	Moda
			0-3	4-5	6-8		
1	1	MEG2.32(2009-14) #1419	66,7	22,9	10,4	48	3
	2	MEG2.32(2009-14) #889	8,3	56,3	35,4	48	2
	3	MEG2.32(2009-14) #72	58,1	41,9	0,0	43	1
	4	MEG2.32(2009-14) #78	64,6	31,3	4,2	48	4
	5	MEG2.32(2009-14) #1282	20,8	47,9	31,3	48	5
	6	MEG2.32(2009-14) #1465	100,0	0,0	0,0	47	0
	7	MEG2.32(2009-14) #1200	68,1	17,0	14,9	47	0
	8	MEG2.32(2009-14) #1199	93,6	6,4	0,0	47	0
	9	MEG2.32(2009-14) #942	23,4	55,3	21,3	47	4
	10	MEG2.32(2009-14) #598	79,2	20,8	0,0	48	3
	11	MEG2.32(2009-14) #399	27,1	58,3	14,6	48	4
	12	MEG2.32(2009-14) #1013	80,0	17,8	2,2	45	3
	13	MEG2.32(2009-14) #487	10,4	50,0	39,6	48	5
	14	MEG2.32(2009-14) #1057	6,3	87,5	6,3	48	4
	15	MEG2.32(2009-14) #62	16,7	81,3	2,1	48	4
	16	MEG2.32(2009-14) #503	100,0	0,0	0,0	48	0
	17	MEG2.32(2009-14) #951	91,1	8,9	0,0	45	2
	18	MEG2.32(2009-14) #403	14,6	70,8	14,6	48	4
	19	MEG2.32(2009-14) #620	85,4	14,6	0,0	48	0
	20	MEG2.32(2009-14) #1308	10,4	77,1	12,5	48	4
	21	MEG2.32(2009-14) #1070	72,9	25,0	2,1	48	3
	22	MEG2.32(2009-14) #1331	66,7	31,3	2,1	48	4
		Variedad Susceptible	0	0	100	48	8

Continúa...

...continuación.

Lote	Tratamiento	Progenie	Porcentaje de plantas de cada en cada grado de la escala I de Eskes y Braghini			Total Plantas	Moda
			0-3	4-5	6-8		
	1	FIT102009(Vitrina) #427	72,9	16,7	10,4	48	3
	2	FIT102009(Vitrina) #493	93,8	6,3	0,0	48	2
	3	FIT102009(Vitrina) #480	100,0	0,0	0,0	48	0
	4	FIT102009(Vitrina) #460	50,0	41,7	8,3	48	5
	5	FIT102009(Vitrina) #218	100,0	0,0	0,0	48	0
	6	FIT102009(Vitrina) #116	66,7	25,0	8,3	48	1
	7	FIT102009(Vitrina) #364	89,6	10,4	0,0	48	0
	8	MEG2.32(2009-14) #1563	29,2	58,3	12,5	48	4
	9	FIT102009(Vitrina) #612	100,0	0,0	0,0	47	0
	10	FIT102009(Vitrina) #341	55,3	44,7	0,0	47	4
	11	FIT102009(Vitrina) #728	85,4	14,6	0,0	48	5
2	12	FIT102009(Vitrina) #621	12,5	83,3	4,2	48	4
	13	FIT102009(Vitrina) #633	4,2	70,8	25,0	48	5
	14	FIT102009(Vitrina) #635	10,4	58,3	31,3	48	5
	15	MEG2.32(2010-5) #34	31,3	33,3	35,4	48	6
	16	MEG2.32(2010-5) #67	27,1	64,6	8,3	48	4
	17	MEG2.32(2010-5) #197	81,3	16,7	2,1	48	0
	18	MEG2.32(2010-5) #461	53,2	27,7	19,1	47	2
	19	MEG2.32(2010-5) #205	20,8	79,2	0,0	48	4
	20	MEG2.32(2010-5) #528	66,7	29,2	4,2	48	3
	21	MEG2.32(2010-5) #384	89,6	10,4	0,0	48	2
	22	MEG2.32(2010-5) #633	93,8	6,3	0,0	48	1
		Variedad Susceptible	0,0	22,9	77,1	48	7

Es necesario tener en cuenta que, si las condiciones ambientales no son favorables, las infecciones naturales pueden conducir a una sobrestimación de la resistencia de determinado genotipo y, por lo tanto, la fijación de la característica en la población. En este sentido, la observación de la respuesta frente a la roya, en progenies descendientes de una misma familia F3, contribuye a validar los resultados, dado que en el 90% de ellas, la incidencia de la enfermedad fue comparable. Para el caso de las progenies MEG2.32(2009-14) #1199 y MEG2.32(2009-14) #1200 fue contrastante, dado que las plantas de la segunda se distribuyeron en siete de los nueve valores de la escala, a diferencia de la primera cuyo valor máximo registrado en las plantas fue de cuatro (Tabla 5). Este comportamiento puede obedecer a una posible segregación en los genes que condicionan la resistencia en uno de estos genotipos o a un posible escape de la enfermedad.

En relación a la correspondencia entre el progenitor y su progenie, se denotó que en aquellas seleccionadas por tener el 100% de sus plantas con los valores más bajos en la escala (0-3), conllevó en el 43% de los casos a una respuesta similar en su progenie. Así mismo, a medida que disminuyó la resistencia en el progenitor, aumentó la incidencia en su progenie, evidenciando la necesidad de una fuerte presión de selección desde etapas tempranas. El control susceptible, utilizado para determinar el grado de infección natural y las condiciones ambientales favorables para su desarrollo, presentó en ambos lotes experimentales valores en la escala ≥ 5 , con moda de ocho y siete en el lote experimental uno y dos, respectivamente, siendo así el de mayor afectación. En contraste, ninguna de las progenies evaluadas fue similar a esta, prevaleciendo valores intermedios en la escala de evaluación, predominando

modas de tres y cuatro, las cuales podrían considerarse como moderadamente resistentes (Eskes et al., 1990).

Si bien es cierto que en café la resistencia de tipo cualitativo o vertical (Van der plank, 1963) ha demostrado ser poco durable (Eskes et al., 1990), su utilización dentro de la estrategia de diversidad ha sido efectiva para el manejo de la enfermedad, como lo han demostrado las variedades compuestas utilizadas en la caficultura colombiana (Moreno, 2004). Esta afirmación es soportada por dos aspectos fundamentales: (i) los parámetros para determinar su eficacia son cumplidos (período de tiempo utilizadas, área ocupada y condiciones ambientales favorables para el desarrollo de la enfermedad) (Johnson, 1984); y (ii) a diferencia de variedades tales como Costa Rica 95 o Lempira 98 de liberación posterior y usadas a menor escala, la variedad Colombia (Castillo & Moreno, 1988) continúa siendo considerada resistente. Adicionalmente, las observaciones realizadas señalan como en café el uso de esta estrategia, ante la presencia de variantes compatibles, limita el desarrollo de la enfermedad, evitando alcanzar niveles de daño económico (Alvarado & Moreno, 2005; Arias, 2019).

Así mismo, para *C. arabica* a los genes responsables de la resistencia cualitativa le han sido atribuidos efectos residuales que condicionan la resistencia cuantitativa una vez la primera es vencida (Herrera et al., 2009). En este sentido, son diversos los estudios en café que señalan este hecho, en su gran mayoría realizados bajo condiciones controladas, a través de la estimación de diferentes componentes de este tipo de resistencia (Alvarado & Solórzano, 2001; Eskes et al., 1990; Zambolim, 2016). En genotipos considerados resistentes, ante la

presencia de variantes de roya compatibles y fuera del esquema de diversidad, la enfermedad puede alcanzar en el tiempo valores similares a los observados en genotipos susceptibles (Arias, 2019). Este comportamiento también fue observado en *Plantago lanceolata*, donde genotipos seleccionados por resistencia cuantitativa bajo condiciones controladas, eran afectadas de forma similar que los susceptibles en condiciones de campo (Susi & Laine, 2015). Por tal motivo, una alta intensidad de selección debe ser realizada y aunque las progenies con valores intermedios podrían poseer resistencia de tipo cuantitativo, el desconocimiento de su durabilidad, sumado al largo ciclo de cultivo de la especie (>20 años) restringiría su uso.

Potencial de selección

Si bien, la importancia económica de la roya del café indica la necesidad de ser un objetivo básico en el mejoramiento genético de la especie, en la práctica es un atributo más dentro del conjunto agronómico deseado. En las progenies evaluadas, como se denotó anteriormente, la variación observada en el crecimiento (ALT, DCOP) y defectos de grano (GVAN, GCAR) no distan de las observadas en las variedades comerciales, por lo que no son limitantes. Caso contrario ocurre con GSUP y la PACUM, donde una amplia variación fue observada, siendo además variables clave para definir su aceptación o rechazo de una determinada progenie. La Tabla 6 muestra el comportamiento para estas variables en las progenies consideradas de mayor resistencia.

El tamaño de grano es quizás la principal limitante de selección para las progenies resistentes a la roya, dado que el contenido de

GSUP en seis de ellas es significativamente inferior al de las variedades actualmente utilizadas (Dunnett $p < 0,05$), identificando incluso tres casos con menos del 50% de grano supremo. Caso opuesto ocurre con el potencial productivo, el cual es igual (Dunnett $p > 0,05$) o con diferencias a favor (Dunnett $p < 0,05$) al observado en el testigo comercial de mejor rendimiento, exceptuando la progenie MEG2.32(2009-14) #951. La selección conjunta por diversos atributos permite identificar cuatro progenies, equivalentes al 9% de la población, con potencial para su evaluación en pruebas de adaptación regional, con miras a ser utilizadas en la caficultura colombiana en el corto plazo.

Un punto importante a considerar está relacionado con el origen genético de la resistencia a la roya de estas progenies, dado que proceden de diferentes híbridos, hecho que indicaría la presencia de diversos genes de resistencia. En tres de los casos se usó como progenitor femenino derivados de HIE, y uno proveniente de CatxHdT, mientras que como donante de polen se utilizaron tres accesiones etíopes recolectadas por la FAO y ORSTOM en Etiopía (Meyer et al., 1968; Guillaumet & Halle, 1978), y la variedad N.197 proveniente del programa de mejoramiento genético de Tanzania (Indian Coffee Board, 1953). El origen del germoplasma utilizado puede ser considerado diverso, no explotado de forma comercial y bajo el esquema de diversidad utilizado en las variedades compuestas, contribuirá de forma importante en la durabilidad de la resistencia. Es este sentido, la inclusión de la mayor cantidad posible de heterogeneidad genética de resistencia dentro de una variedad repercutirá en su durabilidad (Clin et al., 2022), limitando la diseminación de los cambios en el patógeno con la capacidad de vencerla.

Tabla 6. Comportamiento agronómico de las progenies con menor incidencia de la enfermedad (>90% plantas con calificaciones ≤ 3).

Lote	Trat.	Progenie	(Porcentaje de plantas con incidencia ≤ 3 escala de Eskes & Braghini)	GSUP (Porcentaje de granos sobre malla 17/64)	PACU (kg/planta de cc)
1	6	MEG2.32(2009-14) #1465	100%	56,0* [↓]	10,2
	8	MEG2.32(2009-14) #1199	94%	35,9* [↓]	9,6
	16	MEG2.32(2009-14) #503	100%	40,8* [↓]	11,3
	17	MEG2.32(2009-14) #951	91%	83,8	7,6*
2	2	FIT102009(Vitrina) #493	94%	38,3* [↓]	11,9* [↑]
	3	FIT102009(Vitrina) #480	100%	66,1* [↓]	9,4
	5	FIT102009(Vitrina) #218 [†]	100%	83,0	10,8* [↑]
	7	FIT102009(Vitrina) #364	90%	65,6* [↓]	12,2* [↑]
	9	FIT102009(Vitrina) #612 [†]	100%	77,4	9,3* [↑]
	22	MEG2.32(2010-5) #633 [†]	94%	73,0	9,8* [↑]
	21	MEG2.32(2010-5) #384 [†]	90%	70,0	9,2* [↑]

*Dentro de cada lote experimental, el valor de la progenie presenta diferencias estadísticas significativas con respecto a la variedad comercial, según prueba de Dunnett al 5%. [↓] valor inferior o [↑] superior al testigo comercial.

[†] Progenies con atributos agronómicos con potencial para selección.

Puede concluirse que la obtención de variedades en café, debido al largo ciclo de cultivo, requiere de un esfuerzo en tiempo y recursos, donde las fuentes a utilizar y la presión de selección ejercida impactará el cumplimiento de los objetivos propuestos. La evaluación realizada demuestra este hecho, donde después de 20 años de haber sido elegidas las fuentes y formadas las poblaciones, fue posible obtener un grupo de progenies con las características agronómicas propuestas. Adicionalmente, es la primera vez que germoplasma de otros orígenes, diferentes a Caturra x Híbrido de Timor, especialmente etíope, es utilizado en la obtención de progenies avanzadas, las cuales pueden ser fácilmente distribuidas a través de semillas. Es importante anotar que, la utilización de estos orígenes ha sido ampliamente aprovechada en la obtención de híbridos F1, no obstante, la ausencia de técnicas prácticas a precios razonables para su distribución han sido su principal limitante (McCook & Montero-Mora, 2024), por lo que su área cultivada es mínima. El uso comercial de las progenies seleccionadas estará condicionado por los resultados de las pruebas de adaptación regional, paso siguiente en el proceso de fitomejoramiento, que de ser favorables impactará de manera positiva a la caficultura.

AGRADECIMIENTOS

A los colaboradores del Programa de Mejoramiento Genético, especialmente a los señores Jhon Esteban Quintero Arango, Juan Pablo Montoya y Gilbert Rodríguez. Al ingeniero agrónomo Jhon Félix Trejos y demás colaboradores de la Estación Experimental Naranjal. La investigación fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), código MEG102004.

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

LITERATURA CITADA

- Acuña-Zornosa, R. & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2020). Identification of acid-tolerant coffee genotypes in a coffee germplasm collection in Colombia. *Coffee Science*, 15, e151727. <https://doi.org/10.25186/v15i1.1727>
- Alvarado, G. (2002). Mejoramiento de las características agronómicas de la variedad Colombia mediante la modificación en su composición. *Avances Técnicos Cenicafé*, 304, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0304>
- Alvarado, G., & Cortina, H. (1997). Comportamiento agronómico de progenies de híbridos triploides de *C. arabica* var. Caturra x (Caturra x *C. canephora*). *Revista Cenicafé*, 48(2), 73–91.
- Alvarado, G., & Moreno, G. (2005). Cambio de la virulencia de *Hemileia vastatrix* en progenies de Caturra X Híbrido de Timor. *Revista Cenicafé*, 56(2), 110–126.
- Alvarado, G., & Solórzano, L. (2001). Caracterización de la resistencia incompleta a *Hemileia vastatrix* en genotipos de café en Colombia. *Revista Cenicafé*, 52(1), 5–19. <http://hdl.handle.net/10778/765>
- Arias, J. C. (2019). Efecto de mezclas y unidad del área del genotipo sobre el incremento progresivo de *Hemileia vastatrix* Berk. y Br. *Revista Cenicafé*, 70(2), 30–44. <https://doi.org/10.38141/10778/70203>

- 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>
- Arias, J. C., & Flórez, C. P. (2023). Identification of sources of male sterility in the Colombian Coffee Collection for the genetic improvement of *Coffea arabica* L. *PLOS ONE*, *18*(9), e0291264. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291264>
- Arias, J. C., López-Monsalve, L. F., Medina-Rivera, R. D., & Flórez-Ramos, C. P. (2025). Sensory characterization of the Ethiopian germplasm of *Coffea arabica* L. conserved in the Colombian Coffee Collection. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *9*, 1497350. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1497350>
- Barriga, P., Fuentes, R., Carrillo, B., & Jobet, C. (1983). Heredabilidad de algunos caracteres agronómicos y morfofisiológicos en triticale hexaploide. *Agro Sur*, *11*(1), 43–48
- Benti, T., Gebre, E., Tesfaye, K., Berecha, G., Lashermes, P., Kyallo, M., & Kouadio Yao, N. (2021). Genetic diversity among commercial arabica coffee (*Coffea arabica* L.) varieties in Ethiopia using simple sequence repeat markers. *Journal of Crop Improvement*, *35*(2), 147–168. <https://doi.org/10.1080/15427528.2020.1803169>
- Bertrand, B., Alpizar, E., Lara, L., SantaCreo, R., Hidalgo, M., Quijano, J. M., Montagnon, C., Georget, F., & Etienne, H. (2011). Performance of *Coffea arabica* F1 hybrids in agroforestry and full-sun cropping systems in comparison with american pure line cultivars. *Euphytica*, *181*(2), 147–158. <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0372-7>
- Bertrand, B., Davis, A. P., Maraval, I., Forestier, N., & Mieulet, D. (2023). Potential beverage quality of three wild coffee species (*Coffea brevipes*, *C. congensis* and *C. stenophylla*) and consideration of their agronomic use. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *103*(7), 3602–3612. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12347>
- Bertrand, B., Etienne, H., Cilas, C., Charrier, A., & Baradat, P. (2005). *Coffea arabica* hybrid performance for yield, fertility and bean weight. *Euphytica*, *141*(3), 255–262. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-7681-7>
- Carvalho, A., Medina Filho, H. P., Fazuoli, L. C., & Costa, W. M. da. (1984). Number of loci and gene action of short stature factors in *Coffea arabica* L. *Bragantia*, *43*, 425–442. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051984000200014>
- Castillo, J. (1977). Producción, variabilidad y distribución de la cosecha en introducciones de café, *Revista Cenicafé*, *28*(3), 82–107. <http://hdl.handle.net/10778/4311>
- Castillo, J. (1978). Características de grano de introducciones de café. *Revista Cenicafé*, *29*(1), 3–17. <http://hdl.handle.net/10778/4310>
- Castillo, J., & Moreno, G. (1982). Selección de cruzamientos derivados del Híbrido de Timor en la obtención de variedades mejoradas de café para Colombia. *Revista Cenicafé*, *32*(2), 37–53.
- Castillo, J., & Moreno, G. (1988). *La Variedad Colombia: Selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del cafeto*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0023>
- Castillo, J., Moreno, G., & López, S. (1976). *Uso de resistencia genética a Hemileia vastatrix Berk & Br. Existente en el germoplasma de café en Colombia*. *Revista Cenicafé*, *27*(1), 3–25. <http://hdl.handle.net/10778/994>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2016). *Informe Anual Cenicafé 2016*. <https://doi.org/10.38141/10783/2016>
- Clin, P., Grognard, F., Andrivon, D., Mailleret, L., & Hamelin, F. M. (2022). Host mixtures for plant disease control: Benefits from pathogen selection and immune priming. *Evolutionary Applications*, *15*(6), 967–975. <https://doi.org/10.1111/eva.13386>
- Cortina, H. (2019). Evaluación de progenies f4rc1 de (Caturra x *Coffea canephora*) x Caturra. *Revista Cenicafé*, *70*(1), 44–64. <https://doi.org/10.38141/10778/70104>
- Cortina, H., & Castro, B. (2015). Evaluación de híbridos interespecíficos de *Coffea arabica* x *Coffea canephora* con resistencia a *Hemileia vastatrix* y *Ceratocystis colombiana*. *Revista Cenicafé*, *66*(2), 17–29.
- Cortina, H. A., Moncada, M., & Herrera, J. C. (2012). Variedad Castillo®: Preguntas frecuentes. *Avances Técnicos Cenicafé*, *426*, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0426>
- Eskes, A. B., Hoogstraten, J. G. J., Toma-Braghini, M., & Carvalho, A. (1990). Race-specificity and inheritance of incomplete resistance to coffee leaf rust in some Icatu coffee progenies and derivatives of Híbrido de Timor. *Euphytica*, *47*(1), 11–19. <https://doi.org/10.1007/BF00040356>
- Eskes, A. B., & Toma-Braghini, M. (1981). Métodos de evaluación de la resistencia contra la roya del cafeto

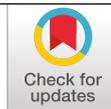
- (*Hemileia vastatrix* Berk. et Br.). *Boletín Fitosanitario FAO*, 29(3-4), 56–66.
- Falconer, D. S. (1987). *Introducción a la genética cuantitativa*. Compañía Editorial Continental.
- Flor, H. H. (1971). Current Status of the Gene-For-Gene Concept. *Annual Review of Phytopathology*, 9(1), 275–296. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.09.090171.001423>
- 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*, 469, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0469>
- Meyer, F. G., Fernie, L. M., Narasimhaswamy, R. L., Monaco, L. C., & Greathead, D. J. (1968). *FAO Coffee Mission to Ethiopia 1964-1965*. FAO.
- Georget, F., Marie, L., Alpizar, E., Courtel, P., Bordeaux, M., Hidalgo, J. M., Marraccini, P., Breitlet, J., Déchamp, E., Poncon, C., Etienne, H., & Bertrand, B. (2019). Starmaya: The first arabica F1 coffee hybrid produced using genetic male sterility. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1344. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01344>
- Gichuru, E., Alwora, G., Gimase, J., & Kathurima, C. (2021). Coffee Leaf Rust (*Hemileia vastatrix*) in Kenya—A Review. *Agronomy*, 11(12), 2590. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122590>
- Guillaumet, J. L., & Halle, F. (1978). Échantillonnage du matériel *Coffea arabica* récolté en Éthiopie. En A. Charrier (Ed.), *Etude de la structure et de la variabilité génétique des caféiers: Résultats des études et des expérimentations réalisées au Cameroun, en Cote d'Ivoire et à Madagascar sur l'espèce Coffea arabica L. collectée en Ethiopie par une mission ORSTOM en 1966- Bulletin IFCC 14* (pp. 13–18). IFCC.
- Herrera, J. C., Alvarado, G., Cortina, H. A., Combes, M. C., Romero, G., & Lashermes, P. (2009). Genetic analysis of partial resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk & Br.) introgressed into the cultivated *Coffea arabica* L. from the diploid *C. canephora* species. *Euphytica*, 167(1), 57–67. <https://doi.org/10.1007/s10681-008-9860-9>
- Indian Coffee Board. (1953). *The sixth annual report of the research department of the Indian Coffee Board (1952 – 53)* (Núm. 6; Bulletin Research Department, pp. 7–27).
- Jaramillo, A. (2018). *El Clima de la Caficultura en Colombia*. Cenicafé.
- Johnson, H., Robinson, H. F., & Comstock, R. E. (1955). Estimates of Genetic and Environmental Variability in Soybeans I. *Agronomy Journal*, 47(7), 314–318. <https://doi.org/10.2134/agronj1955.00021962004700070009x>
- Johnson, R. (1984). A Critical Analysis of Durable Resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 22(1), 309–330. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.22.090184.001521>
- Mayne, W. W. (1932). Physiological Specialisation of *Hemileia vastatrix* B. and Br. *Nature*, 129(3257), 510–510. <https://doi.org/10.1038/129510a0>
- McCook, S., & Montero Mora, A. (2024). Coffee breeding in a time of crisis: F₁ hybrids in Central America since 1990. *Plants, People, Planet*, 6(5), 1070–1079. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10480>
- Molina, D., & Medina Rivera, R. (2022). Identifying Coffea genotypes tolerant to water deficit. *Coffee Science*, 17, e171994. <https://doi.org/10.25186/v17i.1994>
- Molina, D., Moncada-Botero, M. P., Cortina-Guerrero, H. A., & Benavides, P. (2022). Searching for a Coffee variety with antibiosis effect to *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera: Curculionidae). *Euphytica*, 218(7), 97. <https://doi.org/10.1007/s10681-022-03047-3>
- Moreno, G. (2004). Obtención de variedades de café con resistencia durable a enfermedades, usando la diversidad genética como estrategia de mejoramiento. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 187–200. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.28\(107\).2004.1988](https://doi.org/10.18257/raccefyn.28(107).2004.1988)
- Piza, M. R., Luz, S. R. O. T. D., Andrade, V. T., Figueiredo, V. C., Abrahão, J. C. D. R., Bruzi, A. T., & Botelho, C. E. (2023). Multiple Traits Selection Strategies: A Proposal for Coffee Plant Breeding. *Agronomy*, 13(8), 2033. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082033>
- Rivillas, C., Leguizamón, J., Gil, L. F., & Duque, H. (2005). Recomendaciones para el manejo de la roya del café en Colombia. *Boletín Técnico Cenicafé*, 19, 1–36. <https://doi.org/10.38141/10781/019>
- Rodrigues, C. J., Bettencourt, A. J., & Rijo, L. (1975). Races of the Pathogen and Resistance to Coffee Rust. *Annual Review of Phytopathology*, 13(1), 49–70. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.13.090175.000405>
- Romero, J. V., Bustamante, L. A., Cortina, H., & Moncada, M. P. (2012). Evaluación por resistencia a *Hypothenemus hampei* Ferrari en poblaciones derivadas de cruces entre

- Caturra e introducciones etiopes. *Revista Cenicafé*, 63(2), 31–49. <http://hdl.handle.net/10778/534>
- Romero, J. V., & Cortina, H. (2004). Fecundidad y ciclo de vida de *Hypothenemus hampei* (Coleoptera:Curculionidae:Scolytinae) en introducciones silvestres de café. *Revista Cenicafé*, 55(3), 221–231.
- Sachs, J. D., Cordes, K., Rising, J., Toledano, P., & Maennling, N. (2019). Ensuring Economic Viability and Sustainability of Coffee Production. Columbia Center on Sustainable Investment.
- Scalabrin, S., Toniutti, L., Di Gaspero, G., Scaglione, D., Magris, G., Vidotto, M., Pinasio, S., Cattonaro, F., Magni, F., Jurman, I., Cerutti, M., Suggi Liverani, F., Navarini, L., Del Terra, L., Pellegrino, G., Ruosi, M. R., Vitulo, N., Valle, G., Pallavicini, A., ... Bertrand, B. (2020). A single polyploidization event at the origin of the tetraploid genome of *Coffea arabica* is responsible for the extremely low genetic variation in wild and cultivated germplasm. *Scientific Reports*, 10(1), 4642. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61216-7>
- Servellón, R. (1996). Estimación de parámetros genéticos y de respuestas a la selección en la población de arroz irrigado CNA 1. *Agronomía Mesoamericana*, 7(2), 50–57. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5546862>
- Susi, H., & Laine, A. (2015). The effectiveness and costs of pathogen resistance strategies in a perennial plant. *Journal of Ecology*, 103(2), 303–315. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12373>
- Van Der Plank, J. E. (1963). The Control of Plant Disease Studied as Part of Epidemiology. En *Plant Diseases* (pp. 1–6). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-711450-7.50004-4>
- Zambolim, L. (2016). Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, 41(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0065-9>

PRODUCCIÓN Y CALIDAD FÍSICA DEL CAFÉ EN RESPUESTA A FERTILIZANTES DE SÍNTESIS DE DIFERENTE TECNOLOGÍA

Hernán González Osorio *, Siavosh Sadeghian Khalajabadi *, Guido Hernán Franco **, Víctor Hugo Ramirez B.**

González-Osorio, H., Sadeghian, S., Franco, G. H., & Ramírez-Builes, V. H. (2025). Producción y calidad física del café en respuesta a fertilizantes de síntesis de diferente tecnología. *Revista Cenicafé*, 76(1), e76106. <https://doi.org/10.38141/10778/76106>



La fertilización es una práctica clave para la producción y la calidad del café en Colombia. Para este propósito, el mercado local ofrece fertilizantes simples, fertilizantes en mezcla física (MF) y complejos granulados (CG) fabricados a partir de diferentes tecnologías. Con el objetivo de evaluar el efecto de diferentes tipos de fertilizantes en la producción de café y la calidad del grano, en cuatro localidades de la zona cafetera colombiana se evaluaron siete tratamientos, consistentes en el suministro de macro y micro nutrientes en cafetales en edad productiva, a partir de las siguientes fuentes: 1). CG tradicional (CG1), 2). CG2 fabricado con tecnología diferente al CG1, 3). CG2 + MF (K+nitrato Ca y B), 4). CG2 + MF (nitrato Ca y B), 5). MF-NPKMgS (urea-DAP-KCl-Kieserita) + Zn + nitrato de Ca (sin B), 6). MF- NPKMgS+B, y, 7). MF basada en análisis de suelos (sin Ca, Zn, B) utilizando NPKMg. La producción anual y acumulada de café varió entre las localidades como consecuencia de la oferta ambiental de cada sitio, sin presentarse efecto diferencial de los tratamientos suministrados. La conversión café cereza/café pergamino seco, estuvo en promedios de referencia asociados con café de buena calidad y el factor de rendimiento en trilla, registró promedios inferiores al 89,5%. Se demostró que la fertilización del café en producción puede realizarse de manera efectiva, suministrando los nutrientes requeridos y las cantidades recomendadas, utilizando complejos granulados de diferente tecnología o su equivalente nutricional a partir de fertilizantes en mezcla física, manteniendo la producción y la calidad física del grano.

Palabras clave: Fertilizantes en mezcla física, complejos granulados, rendimiento en trilla, micronutrientes, análisis de suelos.

COFFEE YIELD AND QUALITY RESPONSE TO SYNTHETIC FERTILIZERS FROM DIFFERENT TECHNOLOGY

Fertilization is a key practice to achieve an adequate yield and quality of coffee in Colombia. For this purpose, the local trade offers simple, bulk blends (BF), and compound fertilizers (CF) made of different technologies. This study aimed to evaluate the effect of different types of fertilizers on the yield and physical quality of coffee beans. In four localities of Colombian coffee zone, seven treatments were evaluated, which consisted of supplying macro and micronutrients to coffee crops during its reproductive stage, applying the next sources of fertilizers: 1). CF of traditional use (CF1), 2). CF2 from different technology of CF1, 3). CF2 + BF (K+Ca-B nitrate), 4). CF2 + BF (Ca-B nitrate), 5). BF-NPKMgS (Urea-DAP-KCl-Kieserite) + Zn + Ca nitrate (without B), 6). BF-NPKMgS + B + Ca, and 7). BF based on Soil Analysis (Ca, Zn, B) using NPKMg. The treatments did not affect the annual and cumulative production of coffee. Variations on yield among localities were associated with environmental conditions. The ratio coffee cherry/dry coffee parchment had values of reference associated with good coffee quality, while the threshing performance factor was below 89.5% across all the treatments and localities evaluated. The results demonstrate the possibility of fertilizing effectively the coffee at the reproductive stage, applying the required nutrients and recommended doses, through compound fertilizer from different technologies or its nutritional equivalent using bulk blend, preserving the yield and the physical quality of coffee.

Keywords: Bulk blend fertilizers, compound fertilizer, threshing performance factor, micronutrients, soil analysis.

* Investigador Científico II y III, respectivamente. Disciplina Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0001-5716-2172> y <https://orcid.org/0000-0003-1266-0885>

** Yara, Crop Science. guido.franco@yara.com, victor.ramirez@yara.com



Durante la última década, el mundo viene enfrentando escasez de fertilizantes (FAO, 2022); predicciones establecen que la tasa de adquisición de materias primas para su fabricación tiende a incrementarse hasta el año 2050, con el objetivo de suplir la demanda requerida en cultivos de cereales y oleaginosas, principalmente (Chen et al. 2017; Alexandratos & Bruinsma, 2012). Este fenómeno ha dado como resultado una proyección de sobre abastecimiento a escala industrial, para satisfacer las potenciales necesidades del mercado, generando incertidumbre por escasez (Rolewicz et al., 2017; Wendling et al., 2013). Las anteriores circunstancias vienen, por lo general, acompañadas de coyunturas socioeconómicas, por cuenta de las variaciones en los precios del gas y del petróleo que, al ser materia prima para la fabricación y el transporte de los fertilizantes utilizados en la agricultura del mundo, finalmente impactan la rentabilidad de los productores (Morão, 2025; Wilson & Shakya, 2023; Williams, 2022). Un claro ejemplo de esto fue el alza de más del 355% en los precios de venta de fertilizantes de uso común en la caficultura colombiana como la urea, los fosfatos de amonio (MAP y DAP) y las fuentes de potasio como el KCl, registrados en sólo 18 meses como consecuencias de la cotización internacional del petróleo (Suárez, 2008) y los altos precios generados a raíz del conflicto político entre Rusia y Ucrania, que desencadenó en escasez de fertilizantes y especulación de precios en los mercados locales e internacionales durante los primeros meses posteriores a la pandemia por COVID-19 (Vos et al. 2025; Arndt et al., 2023).

A la anterior problemática, se suman las preocupaciones ambientales derivadas del uso de fuentes fertilizantes que generan alta polución (Hu & Smidhalter, 2024; Jacobst et al., 2017). Esto ejerce una permanente presión por la adopción de estrategias de fertilización

más efectivas (Prashan et al. 2025; Cai et al., 2025), en las que además se incluye el uso de análisis de suelos y la adquisición de fertilizantes de tecnología avanzada (Kumar et al., 2025), y de baja huella de carbono, que permitan al caficultor seleccionar un producto que contenga los nutrientes requeridos por el cultivo y que, aplicado en las cantidades adecuadas, garantice la productividad y la calidad del grano.

Con base en las experiencias de investigación relacionadas con la respuesta del café a la fertilización, en Colombia se han desarrollado diferentes fórmulas fertilizantes conformes con la dinámica de la caficultura del país. A partir de los estudios realizados por Uribe y Mestre (1976), las recomendaciones para cafetales a plena exposición solar se centran en 240 kg ha-año⁻¹ de nitrógeno (N) y potasio (K₂O) y entre 40 y 80 kg ha-año⁻¹ de fósforo (P₂O₅). En los últimos años, los ajustes derivados de las investigaciones de Sadeghian (2022), sugieren por hectárea por año, hasta 300 kg de N, 260 kg de K₂O y alrededor de 50 kg de P₂O₅, de magnesio (MgO) y de azufre (S), dependiendo de la densidad de siembra y del nivel de sombrero. En el mismo sentido, en casos específicos de acidez y de fertilidad del suelo, se plantea la necesidad de incluir calcio (Ca), zinc (Zn) y boro (B) (Sadeghian & González-Osorio, 2012). Los nutrimentos y cantidades mencionadas, pueden ser aplicados a través de mezclas de fertilizantes simples (MF) o complejos granulados (CG), dado que ha sido demostrado que la producción y calidad física del grano alcanzadas a través de cualquiera de estas opciones es similar (Sadeghian & González-Osorio, 2022; Sadeghian et al., 2007).

No obstante, persiste el criterio de efectividad en la fertilización a favor de los CG, dado que las fuentes regularmente utilizadas en las MF, generan una combinación heterogénea e incompatibilidad física (Miserque

& Pirard, 2004), presentan dificultades en el almacenamiento (Gezerman, 2020; Wang et al., 2019; Albadarín et al., 2017) y desencadenan reacciones químicas que pueden ocasionar deterioro en el producto final (Saha et al., 2018; Rahmanian et al., 2015). Por el contrario, a través los CG se facilita, entre otros, la inclusión de nutrimentos que se requieren en baja concentración y la posibilidad de ofrecer formulaciones, cuyo balance iónico de elementos, se estima, es favorable para la fisiología, la producción y la calidad de diversos cultivos (Tawfeeq et al., 2017; Piwpuan et al., 2013; Witte, 2011).

Con base en el anterior planteamiento, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de fertilizantes en MF y fertilizantes CG en la producción y calidad del café.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en cuatro localidades de la zona cafetera colombiana contrastantes en clima y suelos (tablas 1 y 2).

Procedimiento. En tres de las cuatro localidades se instaló un germinador y un vivero o almácigo de café (*Coffea arabica*) Variedad

Tabla 1. Ubicación, características climáticas y de los suelos en las localidades objeto de estudio.

Depto.	Municipio	Finca	Suelos	Ubicación	Altitud	Temp.	Lluvia
			Material parental	Latitud/ longitud	m	°C	mm/ año
Quindío	Montenegro	El Agrado	Cenizas volcánicas	4°31'N / 75°48'W	1.275	21,9	2.066
Caldas	Chinchiná	Naranjal	Cenizas volcánicas	4°58'N / 75°39'W	1.381	20,6	2.711
Santander	Floridablanca	San Antonio	Roca sedimentaria	7°6'N / 73°4'W	1.539	19,7	1.480
Antioquia	Venecia	El Rosario	Roca ígnea	5°58'N / 75°42'W	1.635	20,5	2.571

Tabla 2. Características químicas de los suelos al inicio de la fase experimental.

Finca	pH	Materia orgánica	P	K	Ca	Mg
		%	mg kg ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹	
El Agrado	4,5	5,8	123	0,42	0,83	0,14
Naranjal	5,1	13,4	20	0,16	1,33	0,47
San Antonio	4,8	5,2	8	0,28	2,02	0,44
El Rosario	4,8	14,5	37	0,82	1,34	0,60

Métodos. pH: relación suelo:agua 1:1 (potenciométrico); Materia orgánica: Walkey & Black (colorimetría); fósforo (P): Bray II (azul de molibdato, colorimétrico); potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg): Acetato de amonio pH:7,0 (espectrofotometría de absorción atómica-EAA).

Castillo[®], siguiendo las recomendaciones de Cenicafé. Una vez el almácigo cumplió los seis meses, se condujo a un lote de aproximadamente 1.500 m², buscando un patrón de siembra mínimo de 6.000 plantas/ha. En El Agrado, la experimentación se llevó a cabo en un cafetal Variedad Castillo[®] sembrado a una densidad de 10.000 plantas/ha, con 18 meses de edad. Durante la fase de crecimiento vegetativo, todas las plantaciones recibieron la fertilización y/o correctivos de la acidez (aplicación de cal), de acuerdo con los resultados de los análisis de suelos y siguiendo las recomendaciones de Cenicafé (Sadeghian, 2022). Una vez los lotes cumplieron 18 meses, se aplicaron los tratamientos objetos de estudio.

Tratamientos. Se evaluaron siete tratamientos (Tabla 3), consistentes en fertilizar el café con macro y micronutrientes, a partir de las siguientes fuentes fertilizantes: 1). Un complejo granulado tradicional (CG1), 2). su equivalente nutricional con un complejo granulado de tecnología diferente (CG2), 3). CG2+KCl+nitratoCa y B (KNCaB), 4). CG2+KNCaB, 5). la mezcla física de Urea+DAP+KCl+Kieserita (NPKMg)+NCa+Zn (-B), 6). Mezcla física NPKMg+B, 7). fertilización basada en análisis de suelos (sin Ca, B ni Zn) utilizando NPKMg.

Teniendo en cuenta que los fertilizantes evaluados difieren en su concentración de N, P₂O₅, K₂O y MgO, las cantidades calculadas para el presente experimento, se fijaron tomando como base una dosis intermedia de nitrógeno equivalente a 240 kg ha-año⁻¹, por ser el elemento que siempre se incluye en los planes de fertilización para la fase de producción. Este cálculo permitió además suplir adecuadamente el café con otros nutrientes requeridos para la producción, en cantidades aproximadas a lo recomendado por Sadeghian & González-Osorio (2012), para una adecuada fertilización

cuando no se cuenta con los resultados del análisis de suelos.

La fertilización del tratamiento MF-según análisis de suelos, se hizo conforme a las actuales recomendaciones de Cenicafé y tuvo como base los resultados obtenidos mediante un muestreo de suelos, tomado antes de la primera aplicación de tratamientos. En adelante, con una frecuencia bianual, se tomaron muestras de suelos en las parcelas correspondientes a este tratamiento para efectuar los ajustes de fertilización y/o enmiendas correspondientes.

Todos y cada uno de los tratamientos se aplicaron fraccionados dos veces por año, el 50% entre febrero y marzo, y la cantidad restante entre agosto y septiembre.

Parcela y diseño experimental. Las parcelas experimentales fueron asignadas a los tratamientos, bajo el diseño experimental bloques completos al azar con siete repeticiones, donde el factor de bloque correspondió al gradiente de fertilidad.

Variables evaluadas. Para cada localidad, tratamiento y parcela experimental se evaluó la producción anual de café cereza y el acumulado de la producción (variables de respuesta). Dichas evaluaciones se realizaron durante cuatro años en El Agrado y Naranjal, cinco años en El Rosario y tres años en San Antonio. Adicionalmente, en el segundo año del experimento de cada localidad, durante el pico de recolección de la cosecha principal, se tomaron muestras de café cereza, para evaluar la calidad física del grano (variable complementaria), de acuerdo con los protocolos de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC, sf). Para tal fin, 5,0 kg de café cereza fueron recolectados por cada parcela experimental, se removió el pericarpio de los frutos y el café resultante se lavó y secó hasta una humedad del 11% (café pergamino seco-

Tabla 3. Descripción de los tratamientos.

Tratamiento	Fuentes y dosis de nutrientes																		
	17-6-18-2	19-4-19-3	CaNO ₃ y B	urea	KCl	DAP	Kieserita	B-kelato	Zn-kelato	CaNO ₃	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	S	CaO	B	Zn	
							(25MgO-20S)	(21B)	(9Zn)	(26CaO)									
	(kg ha-año ⁻¹)																		
CG1	1.412										240	85	254	28	28	0	2,8	1,4	
CG2		1.263									240	51	240	38	22	0	1,3	1,2	
CG2 + MF (KNCaB)		900	460		115						240	36	240	27	16	120	2,3	1,0	
CG2 + KNCaB*		900	460								240	36	171	27	16	120	2,3	1,0	
MF(NPKMgS)+NCa+Zn (-B)				336	400	87		120		16	453	240	40	240	30	25	120	0	1,4
MF(NPKMgS)+B				488	400	87		120	11,2	16		240	40	240	30	25	0	2,3	1,4
MF según A. Suelos (-Ca, -B, -Zn)							Análisis de suelos**				230-300	0-50	130-285	30-50	25-40	0	0	0	

*Tratamiento comercial; **Rangos de nutrientes aplicados según el análisis de suelos de cada localidad basados en las actuales recomendaciones (Sadeghian, 2022).

cps). A continuación, en una muestra de 250 g de cps, se evaluó el factor de rendimiento en trilla (FRT), luego de remover el pergamino del café en una máquina trilladora. La masa resultante (café almendra, sin pergamino) se tamizó durante cinco minutos sobre malla 14 y se cuantificó el porcentaje de café retenido (café supremo).

Análisis estadístico. Para cada sitio y tratamiento se estimaron los promedios y el error estándar para las variables de respuesta y las variables complementarias. Posteriormente, se efectuó un análisis de varianza (anava) de acuerdo con el diseño experimental propuesto

y la prueba de Tukey al 5%, para seleccionar aquellos con mayor valor promedio, en caso de que el anava indicara efecto de los tratamientos. Todos los resultados se analizaron utilizando el paquete estadístico SAS versión 9.4® (2016 by SAS Institute Inc. Cary NC, USA).

RESULTADOS

En general, la producción de café cereza en todos los tratamientos evaluados, varió tratándose de una u otra localidad, como consecuencia de la edad de la plantación y de la oferta ambiental de cada sitio (Tabla 4). El análisis por localidad se detalla a continuación.

Tabla 4. Cuadrado medio del error y valor p del análisis de varianza de la producción anual y acumulada de café cereza en las localidades objeto de estudio.

Localidad	Producción	CME*	p-valor
El Agrado	Año 1	33564	0,931
	Año 2	29479	0,731
	Año 3	58913	0,184
	Año 4	38219	0,196
	Acumulada	44266	0,401
Naranjal	Año 1	13097	0,915
	Año 2	59692	0,169
	Año 3	41615	0,190
	Año 4	70533	0,016
	Acumulada	50857	0,117
San Antonio	Año 1	11450	0,169
	Año 2	42214	0,040
	Año 3	41993	0,876
	Acumulada	47528	0,450
El Rosario	Año 1	10206	0,293
	Año 2	52034	0,313
	Año 3	10854	0,134
	Año 4	45615	0,643
	Año 5	32360	0,234
	Acumulada	87992	0,241

*CME: cuadrado medio del error. Indica la variabilidad dentro de los tratamientos que pertenecen a su misma condición experimental.

El Agrado y Naranjal. En El Agrado no se detectaron diferencias entre los tratamientos en la producción de café cereza durante los años de evaluación (Tabla 5), ni en el acumulado de la producción de tres años de cosecha (Figura 1a). En Naranjal tampoco hubo efecto de los tratamientos durante los tres primeros años, no obstante, en el último año de evaluación se observó que la producción alcanzada con CG2 + MF (KNCaB), fue 25% inferior a la registrada con CG1 (Tabla 6). Dado que la tendencia registrada no se mantuvo durante tres años de evaluación previos, y que la certeza con la cual se estaría tomando la decisión de aceptar las diferencias (potencia de la prueba < 22%) que muestra la prueba Tukey al 5%, este resultado no debería considerarse confiable para efectuar una diferencia clara entre estos tratamientos (Tabla 4). En consecuencia, el efecto diferencial de los tratamientos tampoco se reflejó en el acumulado de los cuatro años de producción (Figura 1b).

San Antonio y El Rosario. Para el primer y último año de evaluación, la producción de café en San Antonio fue similar tratándose de una u otra fuente fertilizante. Sólo para el segundo período, el tratamiento portador de la recomendación de fertilización según el análisis de suelos (MF según A. suelos -Ca -B -Zn) presentó la más baja producción, respecto al tratamiento CG2 (Tabla 7). Al igual que para Naranjal, la certeza de la prueba, al ser del 59% (potencia de la prueba) generó un alto grado de incertidumbre para aceptar dicha diferencia. El efecto mencionado anteriormente, tampoco se vio reflejado en el acumulado de tres años de producción (Figura 1c).

Para El Rosario, las producciones anuales (Tabla 8) y acumuladas (Figura 1d), no se afectaron significativamente por efecto de los tratamientos evaluados.

Tabla 5. Producción anual promedio de café cereza en respuesta a los tratamientos aplicados en El Agrado.

Tratamiento	Producción café cereza kg/parcela											
	Año 1	*EE	Año 2	EE	Año 3	EE	Año 4	EE				
CG1	26,74	a	6,15	58,58	a	2,73	47,90	a	1,87	34,32	a	1,34
CG2	25,11	a	2,42	54,44	a	2,66	51,21	a	3,97	40,44	a	2,25
CG2 + MF (KNCaB)	25,84	a	2,62	60,24	a	1,78	53,67	a	1,82	37,54	a	2,87
CG2 + KNCaB*	36,59	a	2,63	56,96	a	1,82	52,13	a	2,24	41,64	a	2,62
MF(NPKMgS)+NCa+Zn (-B)	27,38	a	3,45	55,08	a	1,78	49,46	a	3,67	38,43	a	1,44
MF(NPKMgS)+B	32,44	a	3,41	57,52	a	3,16	50,81	a	2,10	38,48	a	2,18
MF según análisis de suelos (-Ca, -B, -Zn)	25,82	a	4,34	55,65	a	4,09	44,94	a	3,08	37,54	a	2,22

*EE: error estándar. Letras no comunes indican diferencia entre tratamientos según prueba Tukey 5%

Tabla 6. Producción anual promedio de café cereza, en respuesta a los tratamientos aplicados en la Estación Experimental Naranjal.

Tratamiento	Producción café cereza kg/parcela											
	Año 1	*EE	Año 2	EE	Año 3	EE	Año 4	EE				
CG1	33,96	a	2,17	58,77	a	1,55	45,41	a	2,49	37,11	ab	1,63
CG2	30,99	a	2,51	53,31	a	1,68	41,19	a	1,44	32,70	ab	1,30
CG2 + MF (KNCaB)	33,35	a	1,91	55,29	a	1,53	44,69	a	1,88	27,75	b	1,85
CG2 + KNCaB*	32,99	a	1,86	55,03	a	3,72	41,81	a	1,62	29,89	ab	2,22
MF(NPKMgS)+NCa+Zn (-B)	35,23	a	2,96	59,17	a	0,97	47,42	a	2,40	35,11	ab	2,41
MF(NPKMgS)+B	32,34	a	2,91	52,42	a	3,18	40,91	a	2,15	32,00	ab	1,37
MF según análisis Suelos (-Ca, -B, -Zn)	32,15	a	3,25	51,83	a	2,80	42,90	a	1,93	30,65	ab	1,36

*EE: error estándar. Letras no comunes indican diferencia entre tratamientos según prueba Tukey 5%.

Tabla 7. Producción anual promedio de café cereza, en respuesta a los tratamientos aplicados en la parcela experimental de San Antonio.

Tratamiento	Producción promedio café cereza kg/parcela								
	Año 1	*EE	Año 2	EE	Año 3	EE			
CG1	4,06	a	0,83	55,98	ab	5,60	35,56	a	3,04
CG2	6,93	a	1,56	61,18	a	3,60	33,06	a	2,15
CG2 + MF (KNCaB)	3,34	a	1,12	43,01	ab	5,63	36,49	a	3,25
CG2 + KNCaB*	4,32	a	1,28	50,51	ab	5,18	39,48	a	6,69
MF(NPKMgS)+NCa+Zn (-B)	4,48	a	0,76	47,81	ab	7,76	32,60	a	6,91
MF(NPKMgS)+B	4,00	a	0,82	49,40	ab	6,08	36,67	a	4,16
MF según análisis Suelos (-Ca, -B, -Zn)	6,08	a	0,96	37,77	b	6,59	33,61	a	6,03

*EE: error estándar. Letras no comunes indican diferencia entre tratamientos según prueba Tukey 5%.

Tabla 8. Producción anual promedio de café cereza, en respuesta a los tratamientos en El Rosario.

Tratamiento	Producción café cereza kg/parcela														
	Año 1	*EE	Año 2	EE	Año 3	EE	Año 4	EE	Año 5	EE					
CG1	51,89	a	3,86	31,24	a	2,36	53,28	a	3,61	51,34	a	1,77	18,39	a	1,76
CG2	62,52	a	5,37	37,54	a	3,45	64,59	a	4,24	59,77	a	3,18	15,36	a	1,62
CG2 + MF (KNCaB)	56,60	a	3,63	37,09	a	3,09	56,88	a	4,57	55,53	a	4,97	18,92	a	2,13
CG2 + KNCaB*	58,56	a	4,88	38,68	a	3,89	64,08	a	2,61	56,28	a	3,30	18,81	a	1,59
MF(NPKMgS)+NCa+Zn (-B)	58,52	a	4,94	36,36	a	3,18	59,02	a	3,11	55,77	a	1,22	13,72	a	1,33
MF(NPKMgS)+B	54,18	a	3,62	35,69	a	3,67	59,37	a	3,50	56,58	a	2,06	14,83	a	1,79
MF según análisis Suelos (-Ca, -B, -Zn)	52,46	a	5,42	32,50	a	2,44	58,93	a	4,48	57,62	a	3,95	17,90	a	2,08

*EE: error estándar. Letras no comunes indican diferencia entre tratamientos según prueba Tukey 5%.

Calidad física del grano. La relación café cereza (cc)/café pergamino seco (cps), para los diferentes tratamientos y localidades evaluadas presentó valores entre 4,7 y 5,3 en El Agrado, de 5,8 y 6,4 en Naranjal, de 4,8

a 5,1 en San Antonio y alrededor de 4,8 para El Rosario (Figura 2). Con relación al factor de rendimiento en trilla (FRT), se registraron valores promedios entre 87,8 y 89,5 en las diferentes localidades y tratamientos (Figura 3).

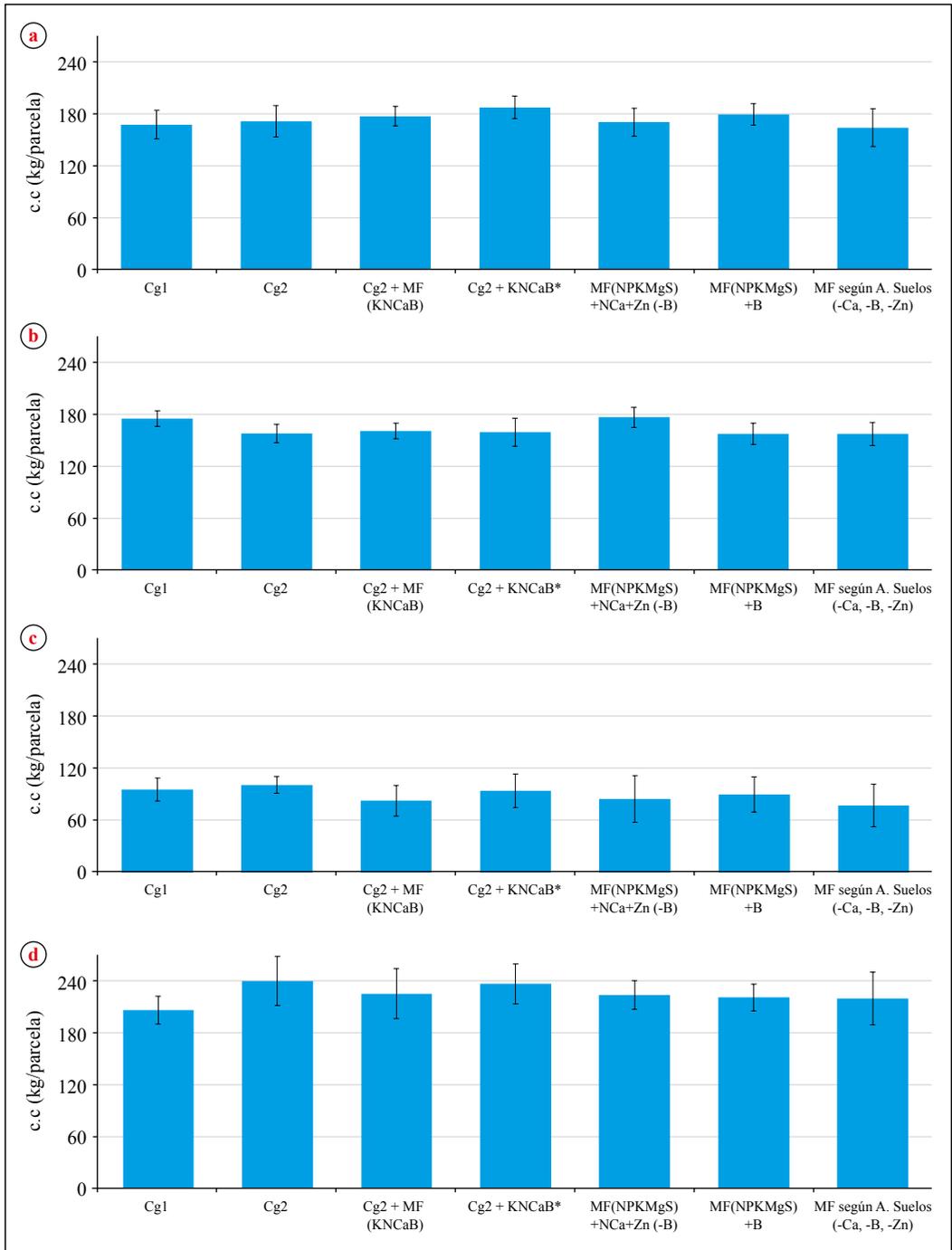


Figura 1. Acumulado de producción de café cereza por efecto de los tratamientos en El Agrado (a), Naranjal (b), San Antonio (c) y El Rosario (d). Barras indican error de estimación al 5%.

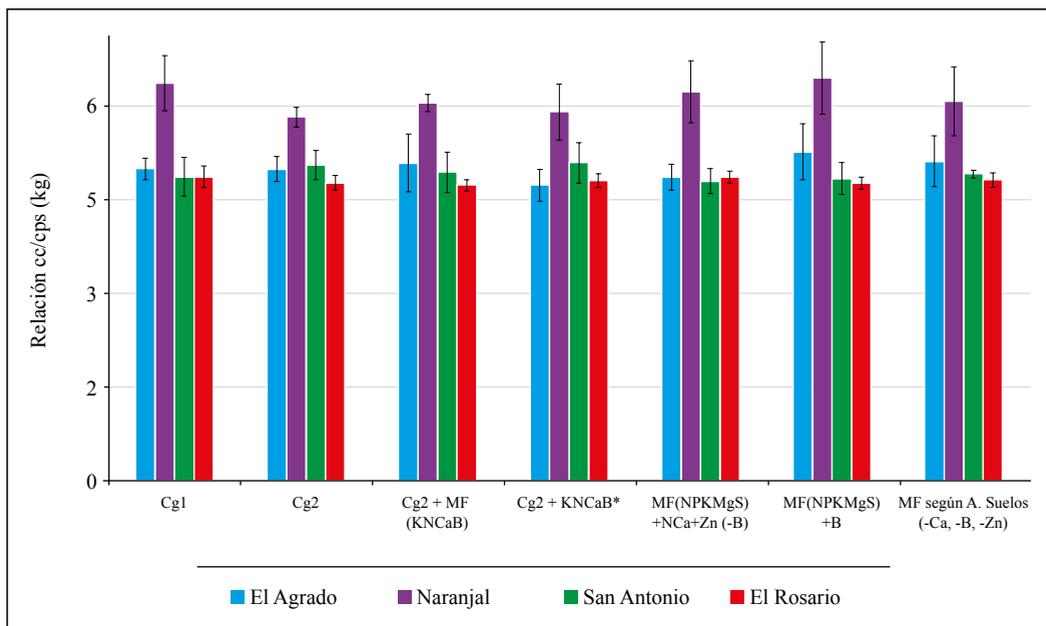


Figura 2. Relación cc/cps en respuesta a los diferentes tratamientos evaluados por localidad objeto de estudio. Barras representan intervalos de confianza al 95%.

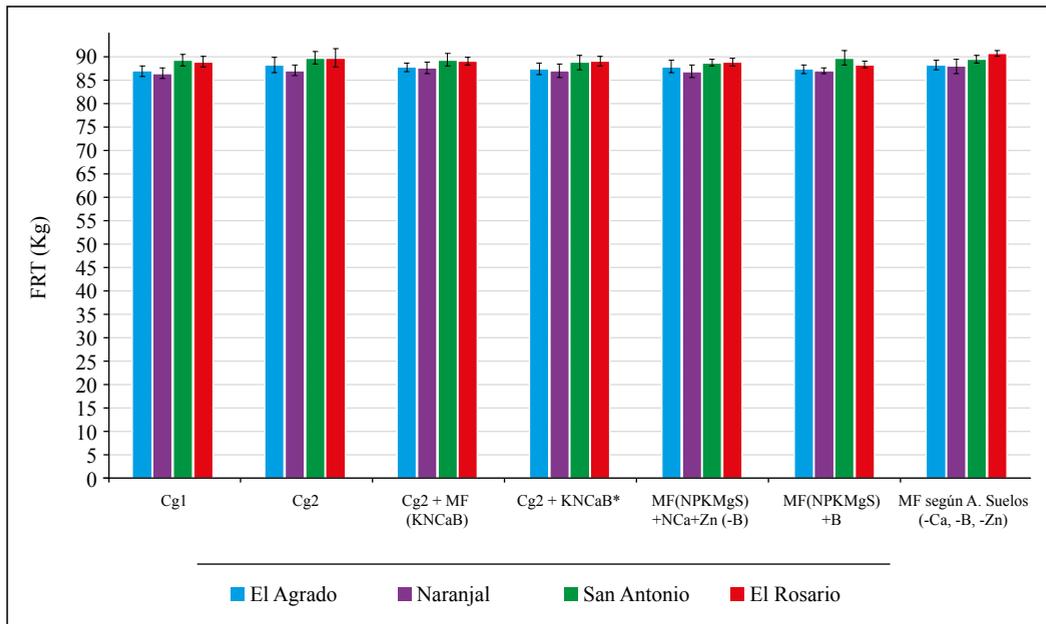


Figura 3. Factor de rendimiento en trilla (FRT) por localidad y tratamiento. Barras representan intervalos de confianza al 95%.

DISCUSIÓN

Los resultados permiten establecer que el café responde al suministro de los nutrientes recomendados y en las cantidades adecuadas, independientemente del tipo de fertilizante que se utilice para tal fin. Esta situación puede asociarse en primera instancia, al hecho de que los fertilizantes portadores de P, K y Mg que fueron utilizados en los diferentes tratamientos, tienen en común las mismas materias primas. De esta forma, la roca fosfórica es tratada con ácido para generar P soluble de los CG y el DAP o MAP de las MF (Belboom et al., 2019). La fuente original de K para ambos tipos de fertilizantes proviene de yacimientos naturales de KCl o K_2SO_4 (Shirale et al., 2019), mientras que la kieserita y el óxido de Mg son fuentes básicas de S y Mg en los CG, en las MF la fuente de estos dos nutrientes son regularmente sulfatos de magnesio o kieserita. Estos resultados muestran que los nutrientes contenidos en los CG y las MF una vez suministrados al suelo, estarían sujetos a una dinámica similar de adsorción, inmovilización, fijación o lixiviación.

En los CG, el N se formula manteniendo igual proporción de amonio (NH_4^+) y de nitrato (NO_3^-), condición que se deriva de su proceso de fabricación, en la cual las materias primas reaccionan con HNO_3 o H_2SO_4 dependiendo de la industria o la tecnología de fabricación (Hussain, 2012). Cuando la reacción se cataliza con HNO_3 , se obtiene además KNO_3 libre de Cl^- (Han et al., 2017), mientras que, en presencia de H_2SO_4 , queda un remanente de sulfato de Ca y otros minerales como un subproducto, el cual, por lo general, se excluye del proceso. Para generar nitrato de Ca, la roca caliza se pone a reaccionar con HNO_3 , dando como resultado un fertilizante altamente soluble sin el poder neutralizador de pH de su fuente original de la caliza, materia prima original (IFS, 2024).

Tomando en consideración los anteriores aspectos, puede esperarse mayor efectividad agronómica al suministrar los nutrientes a través de los CG, dado que las formas de N aprovechables por las raíces de las plantas estarían disponibles en el corto plazo. Es decir, habría una inmediata disponibilidad de NO_3^- y NH_4^+ por las raíces.

Respecto a las MF, cuyo portador de N es la urea, es evidente que esta fuente requiere de transformaciones bioquímicas adicionales una vez ingresa al suelo. A partir de estas reacciones, una parte del nutriente (NH_4^+) queda inmediatamente disponible para las raíces del café y, a la par, una proporción significativa que puede representar entre el 20% y el 30% del N aplicado, se volatiliza (González-Osorio et al., 2015; González-Osorio & Sadeghian, 2012). Este último fenómeno en particular, sumado al hecho de que el N constituye el nutrimento más limitante en la producción de café en Colombia (Sadeghian, 2010), han conducido a establecer en el ámbito técnico y comercial, que la urea y los fertilizantes que la contienen, son menos efectivos.

Trabajos de investigación relacionados con la volatilización de N a partir del suministro de urea en cultivos de café de la zona cafetera colombiana, concluyen que es posible disminuir significativamente las citadas pérdidas, si la aplicación de esta fuente se realiza en condiciones adecuadas de humedad del suelo, procurando que los gránulos queden separados entre sí (González-Osorio et al. 2015, González-Osorio & Sadeghian, 2012), tal como se realizó en el presente estudio. Es bien sabido que los CG al ser portadores de N- NO_3 y N- NH_4 , no presentan susceptibilidad a la volatilización de N en los suelos de la zona cafetera colombiana, sin embargo, se ha demostrado en condiciones de laboratorio que la lixiviación de N derivada de la

utilización de fuentes como el sulfato y nitrato de amonio, en muchos casos, puede superar la magnitud de pérdidas respecto a la urea (Gonzalez-Osorio y Sadeghian, 2012).

Con base en lo anterior, la similitud en producción hallada a partir de los CG y MF objetos de estudio, puede asociarse con las diferentes rutas de transformación a las que se somete el N en el suelo, independientemente de la fuente suministrada, las cuales varían en el tiempo y el espacio por cuenta de diferentes condiciones de tipo edáfico, de clima y de manejo. Estas circunstancias, pueden dar sustento al por qué el uso de tecnologías tendientes a disminuir la lixiviación, la volatilización o a controlar la liberación gradual del nutriente hacia la solución del suelo, pueden ser promisorias desde el punto de vista teórico o condiciones controladas, pero en muchos escenarios agrícolas del mundo y de Colombia, no han arrojado resultados satisfactorios (Chen et al. 2017; Lominadze & Nakashidze, 2016; González-Osorio, 2012).

Desde el punto de vista de la fisiología vegetal, se ha establecido como norma general, que un balance en la nutrición entre NO_3^- - NH_4^+ favorece el desempeño fisiológico de las plantas (Carr et al. 2020, Lominadze & Nakashidze, 2016; Ramirez et al. 2024), pero poco se conoce acerca del efecto que puede tener en el café la absorción de urea como fuente de N, tal como se registra en otras especies (Fujii & Hayakawa, 2022, Witte, 2011). Por otro lado, específicamente hablando del K, mientras que en Brasil, Santos et al. (2023) reportan afectación de la calidad de la bebida del café por efecto del cloro que se suministra a través del KCl (Santos et al. 2023), González et al. (2023) en condiciones de la zona cafetera colombiana, demostraron que la fertilización potásica en el café puede hacerse con fuentes

a base de cloruro (KCl) o sulfato (sulfato de potasio), sin afectar negativamente la producción, la calidad física del grano ni la calidad de la bebida.

Con relación al S, el suministro entre 16 y 40 kg ha-año⁻¹, fueron suficientes para cubrir los requerimientos del cultivo, de allí que no se hubiera presentado efecto diferencial a las dosis aplicadas. Dicha respuesta puede asociarse con el aporte adicional del nutriente a partir de la materia orgánica del suelo, la cual se ha demostrado, constituye la principal fuente natural de este nutriente para el café, en los suelos de la zona cafetera colombiana (González et al., 2003).

Respecto al Ca, Sadeghian (2022), sostiene que es el tercer elemento de mayor concentración en las plantas de café y es un constitutivo de las estructuras vegetativas. En consecuencia, es factible que a través del ciclaje permanente de hojas y ramas que se presenta en los sistemas de producción cafeteros, retorne al suelo el Ca requerido por el cultivo. Sin embargo, no se descarta que en condiciones de clima y de suelos diferentes a los del presente estudio, haya respuesta tanto al Ca, como al B y/o al Zn, particularmente cuando las prácticas de manejo de la fertilidad del suelo omitan su aplicación durante largos períodos de tiempo. Sobre el tema en particular, Ramírez-Builes et al. (2024), registran respuesta en producción y otras variables fisiológicas del café al suministro de Ca y B aplicados en un suelo con niveles de pH y contenidos de materia orgánica de 4,4% y 3,8%, respectivamente.

Con relación al suministro de los micronutrientes boro B (principalmente) y cinc Zn, no se registraron incrementos en la producción ni en la calidad física del grano como respuesta a su aplicación, en ninguno de los años ni las localidades evaluadas.

Evidencia de ello es que las producciones e indicadores de calidad del café en los tratamientos portadores de estos elementos, no fueron estadísticamente diferentes respecto al tratamiento MF según análisis de suelos, donde no se incluyeron como alternativa de fertilización. Los resultados pueden asociarse con los niveles de materia orgánica de los lotes experimentales (entre 5,2% y 14,5%), la cual constituye una fuente importante de estos microelementos (Dhaliwal et al. 2019).

Finalmente, en términos de calidad física del café, los resultados de conversión cc/cps se ubicaron en el rango de valores promedios de referencia asociados con café de buena calidad para la zona cafetera de Colombia (Osorio-Pérez et al. 2023). El registro superior de factor de conversión para todos los tratamientos realizados en Naranjal, deja en evidencia la expresión de un fenómeno diferente a la fertilización. Aun así, en todas las localidades se produjo café objeto de bonificación comercial, como consecuencia del FRT alcanzado en todos y cada uno de los tratamientos (FRT < 89,5).

CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados de esta investigación, la respuesta del café a la fertilización es igual tratándose de alternativas basadas en complejos granulados o mezcla física de fertilizantes. Esto brinda a los caficultores del país la posibilidad de que utilicen la fuente fertilizante de su preferencia según la oferta del mercado.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada con recursos del Centro Nacional de Investigaciones de Café y Yara Colombia (Crossref Funder ID 100019597), proyecto SUE0534.

Contribuciones de los Autores: Conceptualización, metodología, desarrollo experimental, curación de datos, análisis de resultados, redacción y edición: H.G.O.; Conceptualización, análisis y metodología: S.S.; Redacción- revisión y edición: V.H.R.B. y G.H.F. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Albadarin, A. B., Lewis, T. D., & Walker, G. M. (2017). Granulated polyhalite fertilizer caking propensity. *Powder Technology*, 308, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.004>
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). *World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/items/1308edd5-1ee1-43e8-a811-f71fe73014ff>
- Arndt, C., Diao, X., Dorosh, P., Pauw, K., & Thurlow, J. (2023). The Ukraine war and rising commodity prices: Implications for developing countries. *Global Food Security*, 36, 100680. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100680>
- Belboom, S., Szöcs, C., & Léonard, A. (2015). Environmental impacts of phosphoric acid production using di-hemihydrate process: A Belgian case study. *Journal of Cleaner Production*, 108, 978–986. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.141>
- Cai, S., Zhao, X., & Yan, X. (2025). Towards precise nitrogen fertilizer management for sustainable agriculture. *Earth Critical Zone*, 2, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.ecz.2025.100026>
- Carr, N. F., Boaretto, R. M., & Mattos, D. (2020). Coffee seedlings growth under varied NO₃⁻:NH₄⁺ ratio: Consequences for nitrogen metabolism, amino acids profile, and regulation of plasma membrane H⁺-ATPase. *Plant Physiology and Biochemistry*, 154, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.042>
- Chen, J., Cao, F., Xiong, H., Huang, M., Zou, Y., & Xiong, Y. (2017). Effects of single basal application of coated

- compound fertilizer on yield and nitrogen use efficiency in double-cropped rice. *The Crop Journal*, 5(3), 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.01.002>
- Dhaliwal, S. S., Naresh, R. K., Mandal, A., Singh, R., & Dhaliwal, M. K. (2019). Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 1–2, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC). (sf). Aprende a vender su café. Federación Nacional de Cafeteros. <https://federaciondecafeteros.org/wp/servicios-al-caficultor/aprenda-a-vender-su-cafe/>
- Fujii, K., & Hayakawa, C. (2022). Urea uptake by spruce tree roots in permafrost-affected soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 169, 108647. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108647>
- Gezerman, A. O. (2020). A novel industrial-scale strategy to prevent degradation and caking of ammonium nitrate. *Heliyon*, 6(3), e03628. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03628>
- González-Osorio, H., & Sadeghian, S. (2012). Volatilización del nitrógeno a partir de diferentes fuentes fertilizantes en la etapa de crecimiento vegetativo del café. *Revista Cenicafé*, 63(1), 132–143. <http://hdl.handle.net/10778/518>
- González, H., Sadeghian, S., Medina, R., & Castro, A. (2015). Alternativas para disminuir la volatilización de nitrógeno producida por la fertilización con urea. *Revista Cenicafé*, 66(1), 7–16. <http://hdl.handle.net/10778/604>
- González-Osorio, H., Sadeghian, S., Medina, R., & Furia, L. (2023). Response of Granulated Polyhalite on Yield and Quality of Coffee (*Coffea arabica*). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(11), 1525–1536. <https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2171051>
- González-Osorio, H., Sadeghian, S., & Mejía, B. (2003). Caracterización del azufre en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 54(3), 226–233. <http://hdl.handle.net/10778/267>
- Han, X., Yan, X., Wang, X., Ran, J., Wu, C., & Zhang, X. (2018). Preparation of chloride-free potash fertilizers by electro dialysis metathesis. *Separation and Purification Technology*, 191, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.022>
- Hu, Y., & Schmidhalter, U. (2024). Annual consumption and types of synthetic nitrogen fertilizers: Ammonia emission indicators for mitigation strategies in the European Union. *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, 100365. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100365>
- Hussain, I. (2012). The Operating experience of Nitrophosphate Plant. *Procedia Engineering*, 46, 172–177. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.462>
- IFS. International fertilizer society (2025). Construction of a calcium nitrate plant in the Czech Republic. <https://fertiliser-society.org/store/construction-of-a-calcium-nitrate-plant-in-the-czech-republic/>. Consultado Julio 2025.
- Jacobs, B., Cordell, D., Chin, J., & Rowe, H. (2017). Towards phosphorus sustainability in North America: A model for transformational change. *Environmental Science & Policy*, 77, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.009>
- Kumar, S., Sharma, Y., Khandelwal, V., Rawat, K., & Patil, A. (2025). Applications of nanotechnology in fertilizers: A review study. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 10, 100247. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100247>
- Lominadze, S., & Nakashidze, N. (2016). The influence of nitrogen fertilizers on nitrate accumulation in leaves of orange Washington Navel. *Annals of Agrarian Science*, 14(3), 233–236. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.07.008>
- Miserque, O., & Pirard, E. (2004). Segregation of the bulk blend fertilizers. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 74(1), 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.03.017>
- Morão, H. (2025). The economic consequences of fertilizer supply shocks. *Food Policy*, 133, 102835. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2025.102835>
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: FAO promueve el manejo sostenible de la fertilidad de los suelos para hacer frente a la escasez de fertilizantes. <https://www.fao.org/colombia/noticias/detail-events/en/c/1603182/>
- Osorio Pérez, V., Matallana Pérez, L. G., Fernández Alduenda, M. R., Álvarez 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>
- Piwpuan, N., Zhai, X., & Brix, H. (2013). Nitrogen nutrition of *Cyperus laevigatus* and *Phormium tenax*: Effects of ammonium versus nitrate on growth, nitrate reductase

- activity and N uptake kinetics. *Aquatic Botany*, 106, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2013.01.002>
- Rahmanian, N., Naderi, S., Supuk, E., Abbas, R., & Hassanpour, A. (2015). Urea Finishing Process: Prilling Versus Granulation. *Procedia Engineering*, 102, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.122>
- Ramírez-Builes, V. H., Küsters, J., Thiele, E., & Leal-Varon, L. A. (2024). Boron Nutrition in Coffee Improves Drought Stress Resistance and, Together with Calcium, Improves Long-Term Productivity and Seed Composition. *Agronomy*, 14(3), 474. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030474>
- Ramírez-Builes, V. H., Küsters, J., Thiele, E., & Lopez-Ruiz, J. C. (2024). Physiological and Agronomical Response of Coffee to Different Nitrogen Forms with and without Water Stress. *Plants*, 13(10), 1387. <https://doi.org/10.3390/plants13101387>
- Rodrigo, P. M., Varco, J. J., Arwenyo, B., Paganucci, M. G., Abeyasinghe, H. P., Hartley, J. A., Davis, A. C., Navarathna, C. M., Thirumalai, R. V. K. G., Zhang, X., Pittman, C. U., & Mlsna, T. E. (2025). Douglas fir biochar enriched with plant nutrients as a controlled release fertilizer. *Soil Advances*, 3, 100052. <https://doi.org/10.1016/j.soiland.2025.100052>
- Rolewicz, M., Rusek, P., & Borowik, K. (2018). Obtaining of granular fertilizers based on ashes from combustion of waste residues and ground bones using phosphorous solubilization by bacteria *Bacillus megaterium*. *Journal of Environmental Management*, 216, 128–132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.004>
- Sadeghian, S. (2010). Fertilización: Una práctica que determina la producción de los cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé*, 391, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0391>
- 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., Hernández, E., & González, H. (2007a). Mezcla de fertilizantes en la finca, una buena opción para el caficultor. *Avances Técnicos Cenicafé*, 362, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0362>
- Sadeghian, S., & González, H. (2012). Alternativas generales de fertilización para cafetales en la etapa de producción. *Avances Técnicos Cenicafé*, 424, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0424>
- Sadeghian, S., & González-Osorio, H. (2022). Fertilizantes nitrogenados. Implicaciones agronómicas para el cultivo del café en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, 544, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0544>
- Saha, B. K., Rose, M. T., Wong, V. N. L., Cavagnaro, T. R., & Patti, A. F. (2019). A slow release brown coal-urea fertiliser reduced gaseous N loss from soil and increased silver beet yield and N uptake. *Science of The Total Environment*, 649, 793–800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.145>
- Santos, C., Malta, M. R., Gonçalves, M. G. M., Borém, F. M., Pozza, A. A. A., Martínez, H. E. P., De Souza, T. L., Chagas, W. F. T., De Melo, M. E. A., Oliveira, D. P., Lima, A. D. C., De Abreu, L. B., Reis, T. H. P., De Souza, T. R., Builes, V. R., & Guelfi, D. (2023). Chloride Applied via Fertilizer Affects Plant Nutrition and Coffee Quality. *Plants*, 12(4), 885. <https://doi.org/10.3390/plants12040885>
- Santos, C., Malta, M. R., Gonçalves, M. G. M., Borém, F. M., Pozza, A. A. A., Martínez, H. E. P., De Souza, T. L., Chagas, W. F. T., De Melo, M. E. A., Oliveira, D. P., Lima, A. D. C., De Abreu, L. B., Reis, T. H. P., De Souza, T. R., Builes, V. R., & Guelfi, D. (2023). Chloride Applied via Fertilizer Affects Plant Nutrition and Coffee Quality. *Plants*, 12(4), 885. <https://doi.org/10.3390/plants12040885>
- Shirale, A. O., Meena, B. P., Gurav, P. P., Srivastava, S., Biswas, A. K., Thakur, J. K., Somasundaram, J., Patra, A. K., & Rao, A. S. (2019). Prospects and challenges in utilization of indigenous rocks and minerals as source of potassium in farming. *Journal of Plant Nutrition*, 42(19), 2682–2701. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659353>
- Suárez, C. (2008, julio 15-18). Mercado mundial de fertilizantes de nitrógeno, fósforo y potasio. *Memorias. I Integración nacional sobre nutrición y fertilización de café*, San Andrés, Colombia.
- Tawfeeq, A., Culham, A., Davis, F., & Reeves, M. (2016). Does fertilizer type and method of application cause significant differences in essential oil yield and composition in rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.)? *Industrial Crops and Products*, 88, 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.03.026>
- Uribe, A. & Mestre, A. (1976). Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. *Revista Cenicafé*, 27(4), 158–173. <http://hdl.handle.net/10778/4273>
- Vos, R., Glauber, J., Hebebrand, C., & Rice, B. (2025). Global shocks to fertilizer markets: Impacts on prices, demand and farm profitability. *Food Policy*, 133, 102790. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2024.102790>

- Wang, L. S., Wang, R. J., Lu, C. P., Wang, J., & Huang, W. (2019). Rapid determination of moisture content in compound fertilizer using visible and near infrared spectroscopy combined with chemometrics. *Infrared Physics & Technology*, *102*, 103045. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103045>
- Wendling, L. A., Blomberg, P., Sarlin, T., Priha, O., & Arnold, M. (2013). Phosphorus sorption and recovery using mineral-based materials: Sorption mechanisms and potential phytoavailability. *Applied Geochemistry*, *37*, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.07.016>
- Williams, G. (2022, enero 26). Phosphate Outlook 2022: Geopolitics to be a Key Market Mover. *Phosphate Investing*. <https://investingnews.com/phosphate-outlook-2022/>
- Wilson, W. W., & Shakya, S. (2023). Quantifying impacts of competition and demand on the risk for fertilizer plant locations. *Journal of Commodity Markets*, *30*, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.jcomm.2023.100326>
- Witte, C.-P. (2011). Urea metabolism in plants. *Plant Science*, *180*(3), 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.11.010>

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

Carolina Ramírez C., Ing. Agrícola, M.Sc.
Juan Carlos García L., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Ninibeth Gibelli Sarmiento H., Ing. Agrícola, M.Sc.
Wílmur 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.
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.
Angy Paola Pulgarín E., 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 Alberto Quintero A.
Claudia Bibiana Tabares B.

Fáber de Los Ríos P.
José Robín García C.
Gloria Patricia Naranjo E.
Ramón Antonio Montoya C.
Juan Pablo Arboleda V., Pasante
Sergio Rodríguez A., Pasante
Nicolás González S., Pasante

Fisiología Vegetal

Tatiana María Saldaña V., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Aristóteles Ortiz, Químico, M.Sc.
Carlos Andrés Unigarro M., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Marta Bibiana Escobar P., Tecnóloga Química
Claudia Patricia Valencia V., Técnico en Producción de Café
Jhon James Ladino Q.

Fitopatología

Marco Aurelio Cristancho A., Microbiología, Ph.D.
Rosa Lilia Ferrucho, Ing. Agrónoma, Ph.D.
Gustavo Adolfo Marín R., Ing. Agrónomo, M.Sc.
José Didier Bermúdez G., Tecnólogo en Producción
Agropecuaria
Yoni Alejandro González A. Técnico Producción de Cafés
Especiales
Jerson Steven Villa A., Técnico en Agroindustria Alimentaria
Daniela Lucía Ubaque C., Pasante
Luisa Fernanda Taborda R., Pasante
Dayani Jiménez C., Aprendiz

Fitotecnia

José Raúl Rendón S., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Santiago Jaramillo C., Ing. Agrónomo, M.Sc, Ph.D.
Andrés Felipe León B., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Alexander Jaramillo J.
Natalia Catalina Flechas B., Bióloga
Juliana Vargas L., Pasante

Mejoramiento Genético

Claudia Patricia Flórez R., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Carmenza E. Góngora B., Microbióloga, Ph.D.
Diana María Molina V., Bacterióloga, 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

Diana Marcela Giraldo V.
Cristian Giovanni Samper O., Pasante
David Mauricio Guzmán J., Pasante

Pocosecha

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.
Eduardo Duque D., Ing. Mecánico, Ph.D.
Álvaro Guerrero A., Ing. Electrónico/Electricista, M.Sc.
Carol Vanessa Osorio V., Ing. de Alimentos*
Willy Fernando Rojas B. Ing. Agroindustrial*
Cristian Camilo Arboleda O., Biólogo
Ricardo José Grisales M., Tecnólogo en Electrónica
Jorge Alexander Londoño C., Técnico en Soldadura
Yennifer Ospina P., Aprendiz
Camila Buitrago Z. Pasante
María Camila Quiroz S. Pasante
Ricardo López B., Pasante
Valentina Cruz O., Agrónomo
Laura Vanessa Cano R., Ing. de Alimentos
Jorge Wilmar Zuluaga A. Técnico profesional en
Mantenimiento Industrial
Juan Sebastián Rivera R.
Juan Carlos Ortiz F.
Cristian David Rendón L.
José Gilmar Carmona V.
Samuel Osbaldo López G.
Samuel Antonio Castañeda

Suelos

Hernán González O., Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.
Siavosh Sadeghian K., Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.
Luis Fernando Salazar G., Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.
Vanessa Catalina Díaz P., Química, M.Sc.
Eliana Gómez A., Tecnóloga Química
Juan Manuel Rendón R., Tecnólogo Químico
Ange Camila Rodríguez R., Pasante
Jhon Alexis Henao C., Pasante
Keylen Daniela Buitrago L., Aprendiz Universitario
Jaroliver Cardona G.

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.
Melsar Danilo Santamaría B., Ing. de Alimentos
Tito Alberto Ramírez S.
Dayana Alejandra Ríos O., 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.

Estación Experimental Jorge Villamil

Víctor Ricardo Montaña E., 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.
Estefanía Gil M., Pasante
Valentina Marroquín A., Pasante

Tecnología de la Información y Comunicaciones

Leonardo Adolfo Velásquez N., Ing. de Sistemas y
Telecomunicaciones, Esp.
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.
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, Esp.
Paula Andrea García M., Ingeniera Ambiental, Esp.
Andrés Felipe Zuleta E., Aprendiz

UNIDAD ADMINISTRATIVA Y FINANCIERA

Jesús Alberto Cardona L., Ing. Industrial, M.Sc., PMP®
Luz Adriana Jiménez Q., Técnico profesional en
Contabilidad y Finanzas
Kelly Johanna Agudelo G., Administradora de Empresas
Diana Marcela Palacio R., Abogada, Esp.
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
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
Juan Camilo López G., 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
Jorge Hernán Marulanda E., Tecnólogo en Electrónica
Gabriel Hernando Ortiz C., Tecnólogo en Gestión Bancaria y Financiera
Óscar 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
Gustavo Andrés Araujo G., Tecnólogo en Mantenimiento Electrónico e Instrumental Industrial

Juan Diego Pérez V., Aprendiz
Freddy Alexander Sánchez O.
Fredy Hernán Osorio C.
Jhon Fredy Rojo G.
Ferney Cifuentes R.

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
Andrés Steven Cardona M., Aprendiz Universitario

Planeación Financiera y Presupuesto

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 <>: $A = R \times K \times S \times L \times C \times P <1>$.
- 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.