

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

# Cenicafé

Revista del  
Centro Nacional de Investigaciones de Café



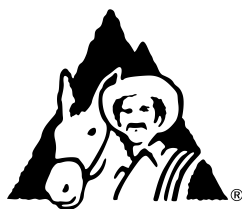
**Federación Nacional de  
Cafeteros de Colombia**

---

Volumen 72 Número 1

Enero - Junio 2021





**Federación Nacional de  
Cafeteros de Colombia**

**COMITÉ NACIONAL**

---

**Ministro de Hacienda y Crédito Público**

José Manuel Restrepo Abondano

**Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural**

Rodolfo Enrique Zea Navarro

**Ministro de Comercio, Industria y Turismo**

María Ximena Lombana Villalba

**Director del Departamento Nacional de Planeación**

Luis Alberto Rodríguez Ospino

**Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros**

Marcela Urueña Gómez

Periodo 1° enero/2019 - diciembre 31/2022

José Eliecer Sierra Tejada (Antioquia)

José Alirio Barreto Buitrago (Boyacá)

Eugenio Vélez Uribe (Caldas)

Danilo 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)

Luis Javier Trujillo Buitrago (Tolima)

Camilo Restrepo Osorio (Valle)

**Gerente General**

Roberto Vélez Vallejo

**Gerente Administrativo y Financiero**

Juan Camilo Becerra Botero

**Gerente Comercial**

Juan Camilo Ramos Mejía

**Gerente Técnico**

Hernando Duque Orrego

**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.cenicafe72-1>

Editada en junio de 2021

Tel: 57(6)8500707 Fax: 57(6)8504723 A.A.: 2427 Manizales

E-mail: [cenicafe@cafedecolombia.com](mailto:cenicafe@cafedecolombia.com)

[www.cenicafe.org](http://www.cenicafe.org)

# Cenicafé

Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café

Manizales - Caldas - Colombia

VOL. 72

ENERO - JUNIO 2021

No. 1

## CONTENIDO

<b>CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN SUELOS CULTIVADOS EN CAFÉ Y OTRAS PROPIEDADES EDÁFICAS RELACIONADAS.</b> Luz Adriana Lince Salazar .....	7
<b>WATER HOLDING CAPACITY OF SOILS CULTIVATED WITH COFFEE AND OTHER EDAPHIC PROPERTIES</b> .....	7
<b>DINÁMICA POBLACIONAL, DISPERSIÓN Y COLONIZACIÓN DE LA BROCA DEL CAFÉ <i>Hypothenemus hampei</i> EN COLOMBIA.</b> Luis Miguel Constantino Chuaire; José Raúl Rendón Sáenz; Giovanni Cuesta Giraldo; Rubén Darío Medina Rivera; Pablo Benavides Machado .....	23
<b>POPULATION DYNAMICS, DISPERSAL AND COLONIZATION OF COFFEE BERRY BORER <i>Hypothenemus hampei</i> IN COLOMBIA</b> .....	23
<b>EFFECTO DE LAS TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE TUESTE EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CAFÉ.</b> Valentina Osorio Pérez; Jenny Paola Pabón Usaquén; Claudia Patricia Gallego Agudelo; Luz Fanny Echeverri-Giraldo .....	44
<b>EFFECT OF ROASTING TEMPERATURES AND TIME ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF COFFEE</b> .....	44
<b>ESTRUCTURA Y DISTRIBUCIÓN LUMÍNICA EN EL DOSEL DE DOS PROGENIES DE CAFÉ CON ÁNGULOS FOLIARES DIFERENTES.</b> Carlos Andrés Unigarro Muñoz; Jhon Félix Trejos Pinzón; José Ricardo Acuña Zornosa .....	61
<b>CANOPY STRUCTURE AND LIGHT DISTRIBUTION OF TWO COFFEE PROGENIES WITH DIFFERENT LEAF ANGLES</b> .....	61
<b>IDENTIFICACIÓN DE ALGUNAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS ASOCIADAS CON EL DEFECTO REPOSO EN EL CAFÉ.</b> Claudia Patricia Gallego Agudelo; Nelson Rodríguez Valencia .....	76
<b>IDENTIFICATION OF SOME PHYSICOCHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL VARIABLES RELATED TO AGED COFFEE</b> .....	76
<b>PRODUCCIÓN DE CAFÉ VARIEDAD CASTILLO® EN ALTAS DENSIDADES DE SIEMBRA CON UNO Y DOS TALLOS POR SITIO.</b> José Raúl Rendón Sáenz .....	94
<b>COFFEE PRODUCTION OF THE CASTILLO® VARIETY AT HIGH PLANTING DENSITIES WITH ONE AND TWO STEMS PER SITE</b> .....	94

## COMITÉ EDITORIAL

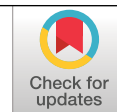
Pablo Benavides M.  
Carmenza Esther Góngora B.  
José Ricardo Acuña Z.  
Diana María Molina V.  
Luis Fernando Salazar G.

Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé  
Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé  
Ph.D. Biólogo. Fisiología Vegetal, Cenicafé  
Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético, Cenicafé  
Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé

# CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN SUELOS CULTIVADOS EN CAFÉ Y OTRAS PROPIEDADES EDÁFICAS RELACIONADAS

Luz Adriana Lince Salazar  \*

Lince-Salazar, L. A. (2021). Capacidad de almacenamiento de agua en suelos cultivados en café y otras propiedades edáficas relacionadas. *Revista Cenicafé*, 72(1), e72101. <https://doi.org/10.38141/10778/72101>



La capacidad de almacenamiento de agua–CAA es una propiedad determinante de la producción de los cultivos. Cenicafé desarrolló una investigación cuyo objetivo fue estudiar la CAA en lotes cafeteros y las propiedades del suelo con las que se relaciona (textura, materia orgánica–MO, densidad aparente–Da, densidad real–Dr, retenciones de humedad y porosidad total–Pt), a través del perfil del suelo como entre unidades cartográficas. Se utilizaron suelos cultivados en café de las unidades Catarina, Chinchiná, Doscientos, Guamal y Quindío, en cuatro profundidades (entre 0 y 5, 5 y 10, 10 y 20, 20 y 30 cm). Las propiedades que presentaron diferencia de medias en la profundidad del perfil fueron CAA y retención de humedad a capacidad de campo–CC en la unidad Chinchiná, retención de humedad a punto de marchitez permanente–PMP en las unidades Quindío y Catarina, limos en la unidad Doscientos, Pt en la unidad Catarina, Da en la unidad Quindío, Dr en la Unidad Catarina y MO en todas las unidades. Se determinó que entre unidades hay diferencia de las propiedades analizadas, excepto para la Dr. Los modelos de regresión que explicaron las variables fueron en su mayoría exponenciales simples, lineal para MO, y para las unidades estudiadas, la textura y la Da explican la CC y el PMP, las cuales determinan la CAA. Además, se encontró que las unidades de mayor Pt no siempre presentan la mayor CAA, a pesar de que la Pt se relaciona directamente con la CC y el PMP.

**Palabras clave.** Capacidad de campo, densidad aparente, densidad real, materia orgánica, punto de marchitez permanente, textura.

## WATER HOLDING CAPACITY OF SOILS CULTIVATED WITH COFFEE AND OTHER EDAPHIC PROPERTIES

Water holding capacity (WHC) is one of the determining properties of crop production. Cenicafé conducted research in order to study WHC in coffee plots and the related soil properties [texture, organic matter (OM), bulk density (BD), real density (RD), moisture retention, and total porosity (TP)], through soil profile and among cartographic units. Soils cultivated with coffee in the Catarina, Chinchiná, Doscientos, Guamal and Quindío Units were used at four depths (between 0 and 5, 5 and 10, 10 and 20, and 20 and 30 cm). The properties that showed means difference in profile depth were WHC and moisture retention at field capacity (FC) at the Chinchiná Unit, moisture retention at permanent wilting point (PWP) at the Quindío and Catarina Units, slimes at the Doscientos Unit, TP at the Catarina Unit, BD at the Quindío Unit, RD at the Catarina Unit, and OM at all units. The regression models that explained the properties were mostly simple exponential, linear for OM, and for the units studied, texture and BD explain FC and PWP, which determine WHC. Another finding was that the units with the highest TP do not always have the highest WHC, even though TP is directly related to CC and PWP.

**Keywords.** Bulk density, field capacity, Organic matter, permanent wilting point, real density, texture.

\* Investigador Científico I. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-4263-5357>



La capacidad de almacenamiento de agua del suelo-CAA hace referencia a la máxima cantidad de agua que un suelo puede almacenar en la fase aprovechable por las plantas (Veihmeyer y Hendrickson, 1927), como resultado de la combinación de sus propiedades químicas y físicas, entre ellas, textura, materia orgánica-MO, densidades, estructura y retenciones de humedad, entre otras (Lipiec et al., 2007).

La CAA es considerada como una de las variables determinantes en la producción y sostenibilidad de los cultivos (Keller et al., 2007; Lal & Shukla, 2004), ya que desde el punto de vista agrícola afecta las reacciones químicas, los procesos físicos y biológicos que ocurren dentro y fuera del suelo, los cuales influyen en la nutrición, crecimiento y desarrollo de las plantas (Hincapié, 2011).

La CAA se obtiene mediante cálculos matemáticos, entre ellos y el de mayor aplicación es la diferencia volumétrica entre el contenido de agua a capacidad de campo y el contenido a punto de marchitez permanente (Rawls et al., 1982). La capacidad de campo es la máxima capacidad de retención de agua del suelo después de que el agua superficial se haya drenado, es decir, el agua que puede retener el suelo en contra de la gravedad (Nobel, 2009) y es tomada como el límite superior de CAA. El punto de marchitez permanente corresponde a la condición de humedad del suelo que restringe completamente la absorción de agua por las plantas y, por ello, es tomado como el límite inferior en el cálculo de CAA (Kirkham, 2005).

Generalmente, la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente se determinan en el laboratorio y corresponden a la cantidad de agua en el suelo cuando se alcanza un equilibrio de humedad con tensiones de 0,033 y 1,5 MPa, respectivamente (Toth et al., 2015);

sin embargo, estos valores pueden variar según el interés específico, por ejemplo, la capacidad de campo puede pasar a 0,01 MPa y el punto de marchitez permanente a 1,58 MPa, por ser los valores que mejor se ajusta entre la curva de retención de humedad y los contenidos *in situ* para suelos de varias texturas (Al Majou et al., 2008).

Los valores de referencia para el contenido de agua a capacidad de campo-CC y punto de marchitez permanente-PMP, generalmente están dados a partir de las clases texturales (Costa et al., 2013), en los que los suelos arenosos presentan los contenidos más bajos, alrededor de 12% y 5%, relación volumen-volumen, para CC y PMP, respectivamente, y los suelos arcillosos los contenidos más altos, alrededor de 36% y 22%, relación volumen-volumen, para CC y PMP, respectivamente (Lambers et al., 2008; Or et al., 2011; Bartolini & Albuquerque, 2018).

En la actualidad, muchos estudios relacionados con la CAA se centran en la búsqueda de funciones de edafotransferencia y mapeo geoestadístico, con el fin de extrapolar la información existente a zonas en las que ésta es limitada y es necesaria para optimizar la producción agrícola (Dobarco et al., 2019), pues no es común encontrar evaluaciones de CAA para pequeños predios, ya que requieren de un alto consumo de tiempo, recursos económicos y humanos (Haghverdi et al., 2014; Padarian et al., 2014). Las predicciones de CAA pueden no ser útiles para ciertas aplicaciones, como el modelado del rendimiento de los cultivos, debido a que generalmente, presentan un error relativo muy alto (coeficiente de variación), lo que las hace poco fiables y, en consecuencia, con una gran incertidumbre (Folberth et al., 2016).

Las propiedades del suelo con las que se han logrado correlaciones son densidad



aparente, porosidad total, porosidad capilar (Shao et., 2019), distribución del tamaño de agregados (Lipiec et al., 2007), contenido de MO y distribución de arenas, limos y arcillas (Al Majjou et. al., 2008; Dobarco et al., 2019).

La CAA y las propiedades con las que se relaciona, han sido incluidas en numerosos estudios con diversos objetivos en la zona cafetera colombiana, entre ellos se destacan los de caracterización de las unidades cartográficas de suelos realizados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, entre los años 1972 y 1992, para las unidades cartográficas de suelo más representativas del país cafetero, que en cuyo caso, los análisis se realizaron por horizontes diagnóstico con fines de caracterización taxonómica; también se tienen, entre muchos otros, los de Suárez (1980), Suárez et al. (1986), Cardona y Sadeghian (2005), Salamanca y Sadeghian (2005), Sadeghian et al., (2004), Hincapié y Salazar (2011), Farfán e Hincapié (2011) y Lince y Sadeghian (2016), realizados en su mayoría a profundidad máxima de 30 cm, debido a que es allí donde se encuentran aproximadamente el 80% de las raicillas de la planta de café, que tienen como función captar el agua del suelo, enriquecida con nutrientes (Arcila et al., 2007). En algunos de estos estudios, como los de Cardona y Sadeghian (2005), Salamanca y Sadeghian (2005) y los de Medina y Salazar (2009), se tuvieron en cuenta el tipo de horizonte para fundamentar sus hallazgos, los dos primeros con un enfoque de explicación de resultados relacionados con el horizonte A y los segundos con un estudio dirigido al horizonte B.

Pese a que se tiene numerosa información publicada en la que se incluye la CAA de los suelos de la zona cafetera colombiana y demás propiedades con las que se relaciona, estas no se han tomado como eje central para la discusión de su relación con la CAA, y la diferencia tanto en la profundidad del perfil de

mayor interés para el cultivo de café (0 y 30 cm), como entre unidades cartográficas de suelo. Por lo anterior, se realizó una investigación en la región cafetera colombiana, tendiente a estudiar la CAA y las propiedades del suelo con las que la relaciona, tanto a través del perfil del suelo como entre unidades cartográficas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se cuantificó la retención de agua a CC (0,033 MPa) y a PMP (1,5 MPa), contenido de MO, textura, densidad real-Dr, densidad aparente-Da, y se calcularon la CAA y la porosidad total-Pt, en las profundidades entre 0 y 5 cm, 5 y 10 cm, 10 y 20 cm, y 20 y 30 cm, en las unidades cartográficas Catarina, Doscientos, Guamal y Chinchiná, en el departamento de Risaralda, y unidad Quindío en el departamento de Quindío, las cuales, en su mayoría, son contrastantes en material parental y pedología (Tabla 1) y las tres primeras con incipiente formación del horizonte A.

Por cada una de las unidades de suelo se seleccionaron cuatro lotes, cuyo uso fuera para el cultivo de café por lo menos en los últimos 10 años, en ellos se tomaron tres muestras de suelo disturbadas (1 kg) y muestras sin disturbar, extraídas con cilindros de acero de 5 cm de diámetro por 5 cm de altura. La muestra disturbada se mezcló en el laboratorio y con ella se realizó el análisis de carbono orgánico, que en la investigación se expresó en términos de materia orgánica (MO), textura (T) y Dr. Los análisis de Dr se realizaron por triplicado, al igual que los de Da y las retenciones de humedad, que para los dos últimos se emplearon las muestras sin disturbar. Los métodos empleados para evaluar las propiedades se presentan en la Tabla 2.

El análisis de la información se dividió en tres pasos: i) se determinó la diferencia estadística de las propiedades entre

profundidades, para cada una de las cinco unidades de suelos, por medio de análisis de varianza al 5%. Cuando los análisis indicaron efecto de las profundidades, se realizó prueba de comparación de medias de Duncan al 95% y análisis de tendencia mediante modelos matemáticos presentes en la librería del software SigmaPlot®; iii) se determinó la diferencia estadística de las propiedades entre unidades, para ello se tomaron los 16 datos de cada una de las propiedades por unidad (cuatro lotes y cuatro profundidades), y se realizó un análisis de varianza al 5%. También se evaluaron las interacciones entre profundidad y unidad para las propiedades, y en los casos en que se obtuvo efecto entre unidades se realizó prueba de comparación de medias de Duncan al 95%. Además, los contenidos CC, PMP y CAA, para las diferentes unidades de suelo, se clasificaron según los valores máximos y mínimos para dichas propiedades reportados por Or et al.

(2011), como se presenta en la Tabla 3; y iii) se determinó la relación entre las propiedades por medio de pruebas de correlación y se buscó explicar las propiedades CC y PMP (empleadas para el cálculo de CAA), con las otras propiedades evaluadas por medio de análisis de regresión lineal múltiple con una confianza del 95%; en estos análisis se utilizaron 80 datos por variable (cinco unidades, cuatro lotes, cuatro profundidades), y a diferencia de los pasos anteriores, se emplearon los valores de porcentaje de humedad gravimétrica de CC y PMP, debido a que el contenido volumétrico genera interacciones porque su cálculo incluye Da; también se excluyó la relación de Pt con Da y Dr por ser una variable derivada y no se realizó dicho procedimiento para CAA, para evitar autocorrelaciones, ya que es una variable calculada a partir de las variables evaluadas CC, PMP y Da. En los tres pasos se emplearon *software* Statgraphics® y Excel®.

**Tabla 1.** Unidades cartográficas de suelo seleccionadas en el estudio, ubicación de muestreo, material parental, clasificación taxonómica según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia FNC (1996 y 1998).

Característica	Unidad cartográfica de suelo				
	Catarina	Chinchiná	Doscientos	Guamal	Quindío
Ubicación del muestreo					
Departamento	Risaralda	Risaralda	Risaralda	Risaralda	Quindío
Municipio	Santuario	Pereira	Marsella	Quinchía	Buenavista
Vereda	La María	El Retiro	La Linda	Los Medios	Paraguay
Material parental	Esquisto talcoso biotítico	Ceniza volcánica	Basalto hornbléndico biotítico	Arenisca olivínica	Ceniza volcánica
Clase taxonómica	Paralithic Udorthents 40%; Typic Eutrudepts 35%; Andic Eutrudepts 10%; otros 15%.	Typic Hapludands 80%; Andic Dystudepts 10%; otros 10%.	Typic Eutrudepts 75%; Paralithic Eutrudepts 15%; otros 10%.	Typic Eutrudepts 75%; Typic Hapludands 10%; Lithic Udorthents 8%; Typic Udorthents 5%.	Typic Melanudands 80%; Entic Hapludands 20%.

**Tabla 2.** Propiedades evaluadas en la etapa de ajuste metodológico.

Variable	Método de análisis
Carbono orgánico	Walkley – Black – colorimetría
Arena (A), arcillas (Ar), limo (L)	Pipeta (IGAC, 1990)
Densidad aparente (Da)	Cilindro de Coile. (IGAC, 1990)
Densidad real (Dr)	Picnómetro (IGAC, 1990)
Retención de agua (gravimétrica) a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)	Ollas y membrana de presión - tensiones entre 0,033 y 1,5 MPa (IGAC, 1990)
Retención de agua (volumétrica) a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)	Calculado a partir de: porcentaje retención de humedad gravimétrica X Da (IGAC, 1990)
Capacidad de almacenamiento de agua (CAA)	Calculado a partir de: porcentaje volumen de agua retenido a 0,033 MPa – porcentaje volumen de agua retenido a 1,5 MPa (IGAC, 1990)
Porosidad total (Pt)	Calculado a partir de: $100 \times (Dr - Da)/Dr$ (IGAC, 1990)

**Tabla 3.** Categorías para la clasificación de retención de humedad a capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de almacenamiento de agua (CAA). Límites establecidos según Or et al. (2011).

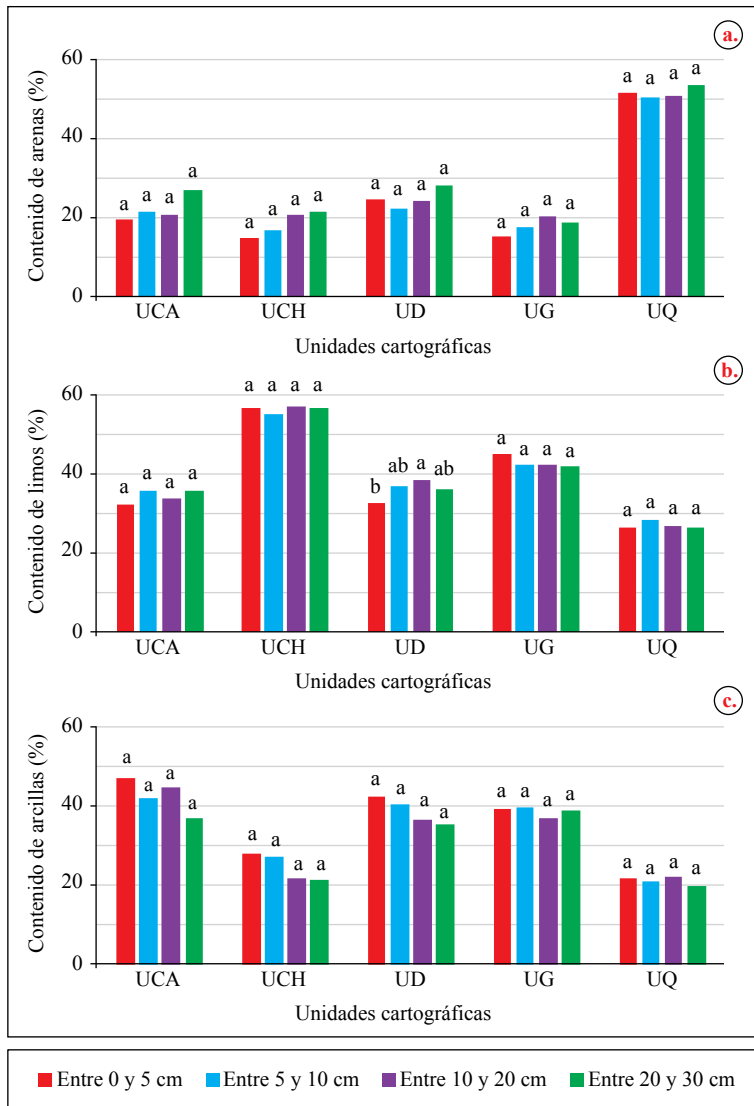
Clase	CC (% volumen)	PMP (% volumen)	CAA (%)
<b>Baja</b>	< 20	< 8	< 12
<b>Media</b>	$\geq 20 < 33$	$\geq 8 < 18$	$\geq 12 < 15$
<b>Alta</b>	$\geq 33$	$\geq 18$	$\geq 15$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Diferencia estadística de las propiedades por profundidad en el perfil

En cuanto al análisis de las propiedades por profundidad y unidad de suelo, las relacionadas con la textura (A, L y Ar) en la mayoría de las unidades no presentaron diferencia estadística,

a excepción de la unidad Doscientos, en la que el contenido de L fue diferente en las profundidades entre 0 y 5 cm y de 10 y 20 cm, con menor valor en la primera profundidad (Figura 1), la cual se explicó mediante un modelo tipo Gaussiano (Tabla 4). En los estudios realizados por Hincapié y Salazar (2011) tampoco se encontró diferencia en el tamaño de partículas por profundidad.



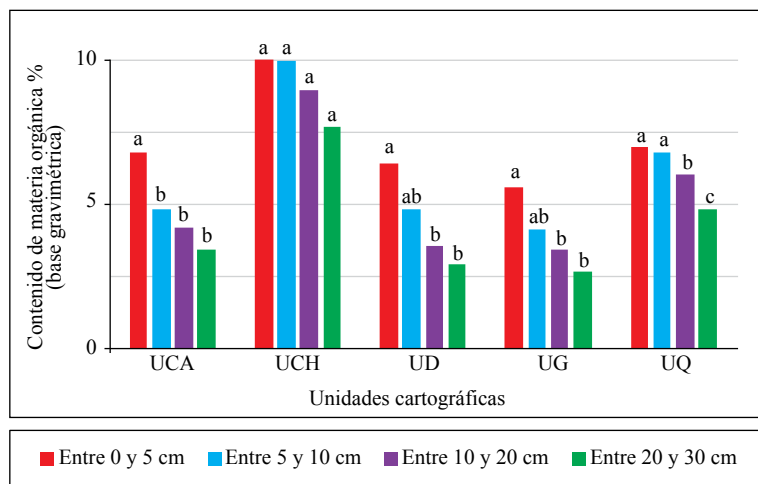
**Figura 1.** Valores promedio (n=4) de: a) Porcentaje de contenido de arenas-A; b) Porcentaje de contenido de limos- L; c) Porcentaje de contenido de arcillas- Ar, para las unidades cartográficas Catarina-UCA, Chinchiná-UCH, Doscientos-UD, Guamal-UG y Quindío-UQ, en las profundidades de muestreo de entre 0 y 5 cm, 5 y 10 cm, 10 y 20 cm y 20 y 30 cm. La letra corresponde a la diferencia de medias entre profundidades por unidad de suelos, por análisis de Duncan al 95%.

Los contenidos de MO presentaron diferencia de medias en profundidad, en cuatro de las cinco unidades. En las unidades Catarina, Guamal y Doscientos, la diferencia se dio entre 0 y 5 cm (mayores contenidos en todas las unidades) y las profundidades entre 5 y 30 cm. En la unidad Quindío la diferencia se dio entre los 10 y 20 cm y 20 y 30 cm. En la unidad Chinchiná la MO no presentó diferencia en las profundidades analizadas (Figura 2). En las unidades Catarina, Doscientos, Guamal y Quindío, se explicaron con modelos tipo exponencial simple y en la unidad Chinchiná con un modelo tipo Lineal (Tabla 4). Estos resultados coinciden con lo reportado en otras investigaciones en suelos de la zona cafetera colombiana (Salamanca & Sadeghian, 2005), estudio en el que identificaron disminución de los contenidos de MO a la vez que aumentó la profundidad de muestreo hasta 40 cm. Lo anterior puede ser explicado con base en lo descrito por González et al. (2009) y Zecch et al. (1997), quiénes exponen que debido a que en la parte superior del suelo es donde se alojan los residuos de los materiales orgánicos provenientes de las plantaciones, es allí donde se inicia la transformación de la MO, proceso que se ve favorecido por la radiación solar

al reducir el contenido de agua y aumentar la temperatura y, por consiguiente, facilitar la actividad biológica.

La Da presentó diferencia de medias en la unidad Quindío, en las profundidades entre 10 y 20 cm, y 20 y 30 cm, con valores mayores en la segunda, y en las otras cuatro unidades no se presentó diferencia estadística, pese a que en la Figura 3 para la unidad Doscientos se aprecia que el valor de Da en la profundidad entre 0 y 5 cm es mayor ( $1,04 \pm 0,05 \text{ g cm}^{-3}$ ) que el de las demás profundidades (entre 5 y 10 cm =  $0,93 \pm 0,7 \text{ g cm}^{-3}$ ; entre 10 y 20 =  $0,93 \pm 0,13 \text{ g cm}^{-3}$  y entre 20 y 20 cm =  $0,91 \pm 0,13 \text{ g cm}^{-3}$ ).

Dr y Pt presentaron variación en la unidad Catarina, entre 5 y 10 cm y 10 y 20 cm de profundidad, con mayores valores entre 5 y 10 cm. La variación de estas propiedades no fue posible explicarla por medio de modelos matemáticos preexistentes. Los resultados encontrados difieren con lo presentado por Cardona & Sadeghian (2005) y Salamanca y Sadeghian (2005) para suelos contrastantes en la zona cafetera, en cuyos casos presentaron aumento con la profundidad, específicamente

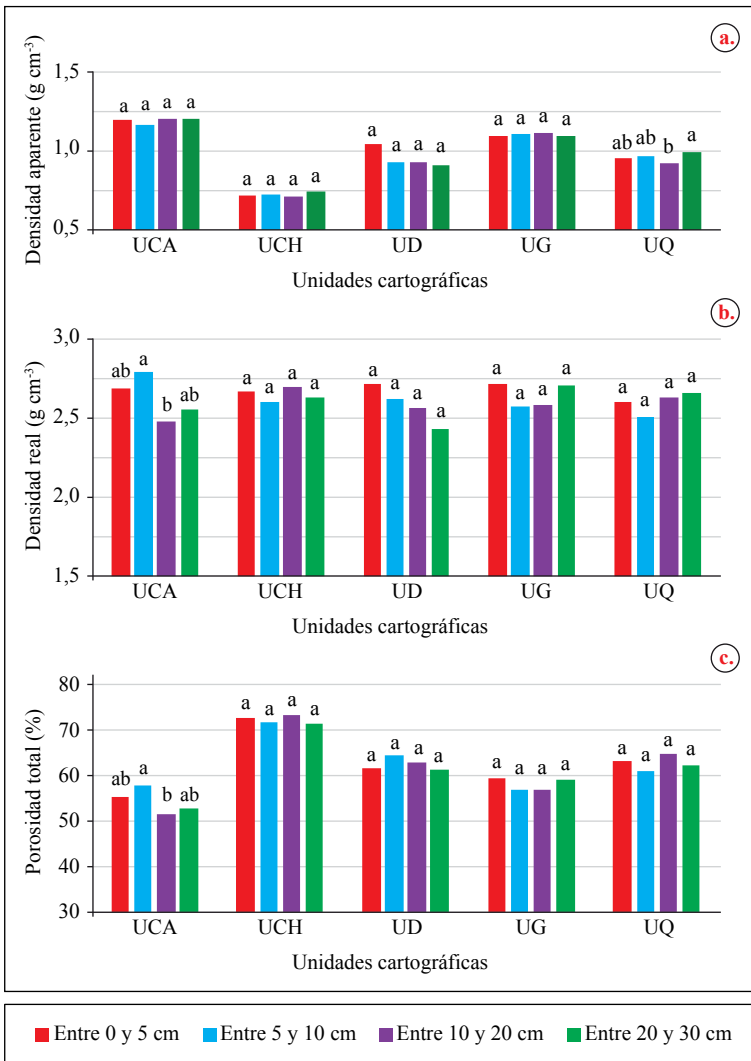


**Figura 2.** Valores promedio (n=4) de los contenidos de materia orgánica-MO (gravimétricos) para las unidades cartográficas Catarina-UCA, Chinchiná-UCH, Doscientos-UD, Guamal-UG y Quindío-UQ, en las profundidades de muestreo entre 0 y 5 cm, 5 y 10 cm, 10 y 20 cm y 20 y 30 cm. La letra corresponde a la diferencia de medias entre profundidades por unidad de suelos por análisis de Duncan al 95%.

para Da y Pt, lo cual puede atribuirse a que los suelos estudiados por estos autores presentaron horizontes productivos de menor espesor que los acá trabajados, sin embargo, no es algo que pueda asegurarse debido a que dichas publicaciones, al igual que esta, no incluyen descripción de perfil.

La CC –porcentaje gravimétrico– y CAA no presentaron diferencia estadística entre las profundidades analizadas en las unidades

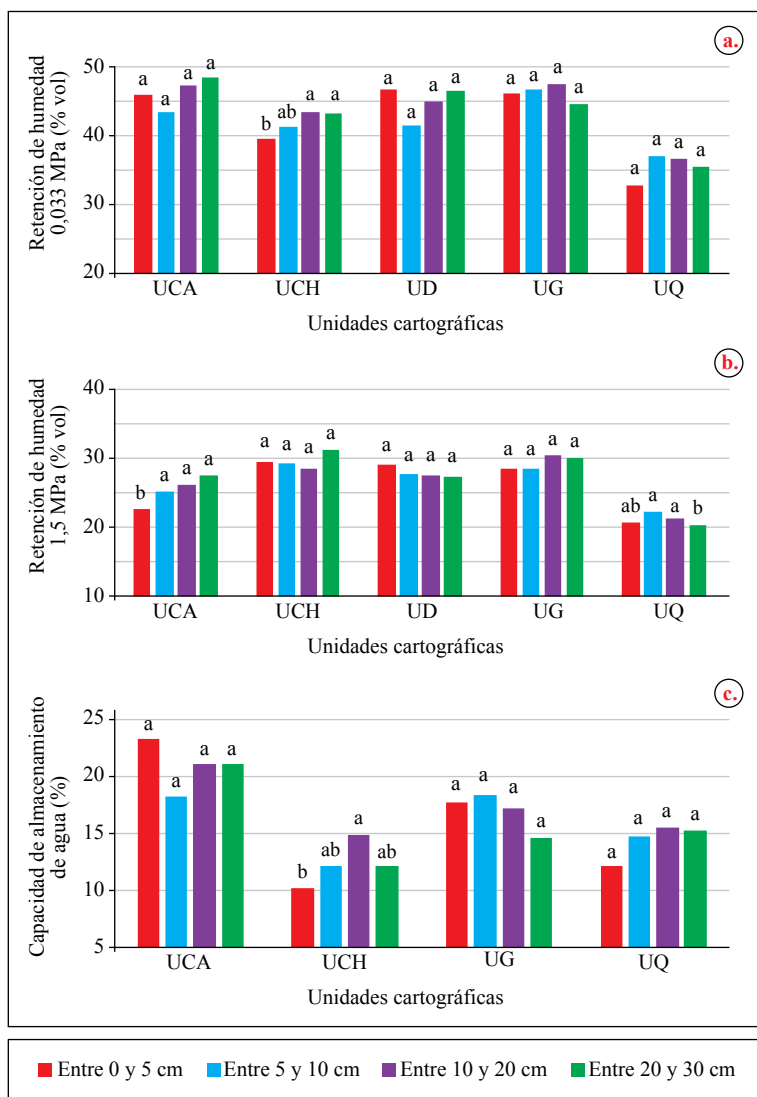
Catarina, Doscientos, Guamal y Quindío; mientras que en la unidad Chinchiná se presentó diferencia entre las profundidades de 0–5 cm y 10–20 cm, la primera con menor valor; en este caso tanto la dinámica de CAA y CC en la unidad Chinchiná fueron explicadas por un modelo tipo exponencial simple. El PMP –porcentaje gravimétrico– no presentó diferencia estadística entre las profundidades analizadas en las unidades Chinchiná, Doscientos y Guamal, a diferencia



**Figura 3.** Valores promedio (n=4) de: a) Densidad aparente–Da; b) Densidad real–Dr; c) Porosidad total–Pt, para las unidades cartográficas Catarina–UCA, Chinchiná–UCH, Doscientos–UD, Guamal–UG y Quindío–UQ, en las profundidades de muestreo entre 0 y 5 cm, 5 y 10 cm, 10 y 20 cm y 20 y 30 cm. La letra corresponde a la diferencia de medias entre profundidades por unidad de suelos por análisis de Duncan al 95%.

de las unidades Catarina y Quindío, que en la primera la diferencia se dio entre la profundidad entre 0 y 5 cm (menor valor) con las otras tres profundidades y en la segunda entre las profundidades entre 5 y 20 cm (mayor valor) y entre 20 y 30 cm (Figura 4). Estas variables se ajustaron al modelo exponencial simple (Tabla 4). En estudios realizados en suelos de la zona cafetera colombiana (Cardona & Sadeghian, 2005; Salamanca & Sadeghian,

2005), en los que se conservaron los protocolos de muestreo para el análisis de variación, no se reportan diferencias de la humedad gravimétrica a través del perfil (entre 0 y 40 cm), lo cual indica que en la profundidad de desarrollo de las raíces efectivas de la planta de café, los contenidos de humedad no presentan diferencia una vez el suelo alcanza la estabilidad hídrica, con lo que se corrobora lo encontrado en esta investigación.



**Figura 4.** Valores promedio (n=4) de: a) Retención de humedad a 0,033 MPa (capacidad de campo-CC); b) Retención de humedad a 1,5 MPa (punto de marchitez permanente-PMP); c) Capacidad de almacenamiento de agua para las unidades cartográficas Catarina-UCA, Chinchiná-UCH, Doscientos-UD, Guamal-UG y Quindío-UQ, en las profundidades de muestreo entre 0 y 5 cm, 5 y 10 cm, 10 y 20 cm y 20 y 30 cm. La letra corresponde a la diferencia de medias entre profundidades por unidad de suelos por análisis de Duncan al 95%.

**Tabla 4.** Modelos de regresión para las propiedades analizadas en las unidades cartográficas de interés.

Modelo	R <sup>2</sup>
$L-UD = 38,83^{**} \exp(-,5((\text{prof}-2,87^{**})/3,1980^{*})^2)$	0,99
$CC-UCH = 38,71^{***}(1,03^{***\wedge}\text{Prof})$	0,87
$PMP-UQ = 21,70^{**}(0,99^{***\wedge}\text{Prof})$	0,15
$CAA-UCH = 10,49^{***}(1,07^{***\wedge}\text{Prof})$	0,12
$MO-UCA = 8,46^{**} \exp(-0,24^{*} \text{Prof})$	0,97
$MO-UD = 8,51^{**} \exp(-0,28^{**} \text{Prof})$	0,99
$MO-UG = 7,11^{**} \exp(-0,24^{*} \text{Prof})$	0,99
$MO-UQ = 8,07^{**} \exp(-0,11^{*} \text{Prof})$	0,89
$MO-UCH = 11,73^{***} - (0,95^{*} \text{Prof})$	0,98

L-UD: contenido de limos en la unidad Doscientos; CC-UCH: retención de humedad a capacidad de campo en la unidad Chinchiná; PMP-UQ: retención de humedad a punto de marchitez permanente en la unidad Quindío; CAA-UCH: capacidad de almacenamiento de agua en la unidad Chinchiná; MO-UCA, UD, UG, UQ, UCH: contenidos de materia orgánica en las unidades Catarina, Doscientos, Guamal, Quindío y Chinchiná, respectivamente; Prof: profundidad; \* = valor  $p < 0,05 \geq 0,01$ ; \*\* = valor  $p < 0,01 \geq 0,001$ ; \*\*\* = valor  $p < 0,001$ .

### Diferencia estadística de las propiedades por unidades cartográficas de suelo

El análisis de varianza entre unidades indicó diferencia estadística entre unidades cartográficas, para siete de las ocho propiedades evaluadas (A, L, Ar, MO, Da, CC<sub>grav</sub>, PMP<sub>grav</sub>) y para las dos calculadas (Pt y CAA), en ninguno de los casos hubo interacción entre unidades y profundidades. Las propiedades que presentaron mayor diferencia de medias fueron L, Da y PMP, cada una con cuatro grupos (A a D), seguidas por MO, Pt y CC, cada una con tres grupos (A a C). Las que menos diferencia de medias tuvieron fueron A, Ar y CAA cada una con dos grupos (A a B), y Dr no presentó diferencia de medias (Tabla 5).

Se encontró que las Unidades provenientes de materiales parentales de composición básica y ultrabásica, conservaron una proporción similar en la distribución del tamaño de partículas, con un marcado predominio de los materiales finos (L y Ar) sobre los gruesos (A), y las unidades provenientes de cenizas volcánicas presentaron menores proporciones de Ar en comparación con las ya mencionadas; sin embargo, dicha relación no se conservó en la proporción de A y L, ya que el valor mayor de A lo presentó la unidad Quindío (53,4±6,3% entre los 20 y 30 cm), mientras que la unidad Chinchiná presentó los menores (14,9±7,9% entre 0 y 5 cm de profundidad) y a su vez fue la que presentó mayor contenido de L (57,6±10,6% entre 10 y 20 cm) y la unidad Quindío la de menor (26,6±3,4% entre 0 y 5



cm). Lo anterior, si se mira desde el análisis de laboratorio y la clasificación por tamaño, no es contradictorio y tampoco se aleja de las consideraciones generales para este tipo de suelos, ya que las A van desde 2.000  $\mu\text{m}$  hasta 50  $\mu\text{m}$  y los L desde 50  $\mu\text{m}$  hasta 2  $\mu\text{m}$ , lo que genera que partículas que se encuentren en el límite de la división (cercasas a 50  $\mu\text{m}$ ) se puedan contabilizar bien sea como A o L, por mínimas variaciones en algunos factores como la acción del dispersante, el volumen de aforo, pequeños cambios en la temperatura o el desgaste físico de partículas en los procesos de pretratamiento (Kilmer & Alexander, 1949).

Estos resultados, presentan similitud con los expuestos por Medina y Salazar (2009), en los que los suelos provenientes de cenizas volcánicas (en este caso relacionados con las unidades Quindío y Chinchiná) presentan menor contenido de materiales finos (Ar) que gruesos y medios (A y L), en comparación con unidades de material parental ultrabásico (unidad Guamal). Dicha relación se atribuye en la respuesta a la meteorización de los minerales que conforman los materiales parentales de los cuales provienen dichas unidades, que son contrastantes en la serie de cristalización de Bowen y, por ende, en su meteorización.

En cuanto a MO, resultados similares fueron reportados por Salamanca y Sadeghian (2005) para la unidad Chinchiná, que en este caso presentó el valor máximo (10,6% $\pm$ 4,3% entre 0 y 5 cm de profundidad) y por Medina y Salazar (2009) para las unidades Doscientos y Guamal, que en este trabajo presentaron los valores más bajos (UG 2,7% $\pm$ 1,0% entre 20 y 30 cm). Pese a que este último estudio tuvo interés en el horizonte B del suelo, presentó similitud con lo reportado en esta investigación para las unidades Guamal y Doscientos, las cuales, en los sitios muestreados, no presentaron horizonte A o este fue incipiente.

Para Da y Dr los mayores valores se presentaron en la unidad Catarina (1,2 $\pm$ 0,1 g cm<sup>-3</sup>, entre 10 y 20 cm y 2,8 $\pm$ 0,1 g cm<sup>-3</sup>, entre 5 y 10 cm, respectivamente), razón por la cual, dicha unidad también fue la de menor Pt (51,7% $\pm$ 2,4%, entre 10 y 20 cm de profundidad). Estos resultados se encuentran en el mismo rango de otros ya reportados para suelos de la zona cafetera (Cardona & Sadeghian, 2005; Hincapié & Salazar, 2011). Tales estudios coinciden en que el manejo del suelo influye en la variabilidad de alguna de estas propiedades, al indicar que los suelos con mayor contenido de Ar (Salamanca & Sadeghian, 2005), menor contenido de MO (Cardona & Sadeghian, 2005) y/o mayor grado de erosión (Hincapié & Salazar, 2011), tienden a presentar mayor Da, lo que genera una menor Pt. Este comportamiento se ajusta a las condiciones de las unidades Catarina y Guamal, que presentaron los menores valores de Pt.

En CC y PMP, los menores valores se presentaron en la unidad Quindío (32,8% $\pm$ 6,2%, entre 0 y 5 cm y 20,2% $\pm$ 1,1%, entre 20 y 30 cm, respectivamente) y, por ende, los de CAA, lo cual se atribuye a que fue la unidad de mayor contenido de A y dicha condición hace que la CAA sea más limitada en comparación con los suelos que presentan mayor contenido de Ar (Lambers et al., 2008; Or et al., 2011). Los valores encontrados para CC y PMP, se encuentran en el mismo rango que los reportados por Cardona y Sadeghian (2005) para suelos de la zona cafetera colombiana.

Según la clasificación propuesta en esta investigación para CC, PMP y CAA, las cinco unidades presentaron CC y PMP alta (CC  $\geq$  33 y PMP  $\geq$  18), y CAA alta ( $\geq$  15) en las unidades Catarina, Doscientos y Guamal, y CAA media ( $\geq$  12 < 15) en las unidades Chinchiná y Quindío.

## Correlación entre las propiedades analizadas

En el análisis de correlación que se presenta en la Tabla 6, se observa como en la mayoría de los casos las propiedades incluidas en esta investigación se relacionan entre ellas. CAA (variable calculada) no presentó correlación directa con MO, A, L y Pt, lo que lleva a que el interés se centre en las variables que se utilizan para su cálculo como son  $CC_{grav}$ ,  $PMP_{grav}$  y Da, y las propiedades que con ellas se correlacionan.

De lo anterior, por medio de un análisis de regresión lineal se encontró que la A y Da explican en 47% la  $CC_{grav}$  y todo el grupo textural con Da, explican en 81% la  $PMP_{grav}$  (Tabla 7). La relación de Da con los contenidos de humedad coincide con lo expuesto por Al Majou et al. (2008), Dobarco et al. (2019) y Shao et al. (2019) y, por Salamanca y Sadeghian (2005), para suelos de la zona cafetera colombiana.

La MO se correlaciona de forma positiva con las variables CC y PMP, y de forma negativa con Da, y si bien esta propiedad no hace parte directa de los modelos de edafotransferencia (Tabla 7), se relaciona en un 72% con Da (Figura 5), propiedad que sí hace parte de dichos modelos, lo que deja en manifiesto los hallazgos de otras investigaciones relacionadas con el cultivo del café, en las que indican que la Da es significativa para determinar la productividad de los cultivos de café (Suárez, 2000; Valencia, 1999), al igual que MO (Salamanca & Sadeghian, 2005).

La Pt no se correlaciona con la CAA. Esto se debe a que la primera propiedad incluye todos los tamaños de los poros y la segunda únicamente incluye los mesoporos, de esta forma, la segunda propiedad se ve favorecida en suelos con predominio de tamaño de partículas finas en comparación con los de partículas gruesas (Or et al., 2011), como se aprecia en los resultados

de esta investigación, donde la unidad Chinchiná presentó la mayor Pt y la menor CAA y, por el contrario, la unidad Catarina presentó la menor Pt y la mayor CCA (Figura 6).

Los resultados obtenidos permiten concluir que en la mayoría de los casos, y solo con algunas excepciones, la CAA y las propiedades con las que se relaciona, no presentan diferencia estadística entre 0 – 30 cm del perfil del suelo, pero sí presentan variación entre unidades, por lo que se sugiere que los muestreos de suelos para el cálculo de CAA, A, L, Ar, Da, Dr, Pt, CC y PMP, tendientes a ser utilizados para generar recomendaciones de manejo en el cultivo de café en Colombia, se realicen entre los 10 – 20 cm de profundidad, dado que las excepciones se presentaron con la profundidad de 0-5 cm, específicamente en la unidad Chinchiná para CC, MPM y CAA y en las unidades Catarina y Quindío para PMP. Además, para minimizar la variabilidad deben realizarse muestreos por cada unidad cartográfica de suelo y en caso de realizar estudios detallados en suelos de origen volcánico a nivel de lote, es importante tener en cuenta los cambios geomorfológicos del lote como lo indica Hincapié (2011).

Para las unidades cartográficas de la zona cafetera colombiana, el tamaño de partículas desempeña un papel importante en la capacidad de almacenamiento de agua, tal como lo muestran las correlaciones directas entre CAA y Ar, y CC y PMP con L, e indirectas entre CC y PMP con A. Sumado a que los modelos de edafotransferencia para CC y PMP, determinados en esta investigación se fundamentan en A, L, Ar y Da.

En las condiciones del estudio la CAA no está determinada por la Pt, ya que como se muestra con los resultados, unidades de mayor porosidad no siempre presentan la mayor CAA, a pesar de que Pt se relaciona directamente con CC y PMP.

**Tabla 5.** Prueba de comparación de medias por la prueba de Duncan 95%, para las variables de interés entre unidades cartográficas (cada unidad con 16 observaciones).

Unidad de suelo	%																			
	A	L	Ar	MO	Da	Dr	Pt	CC <sub>grav</sub>	PMP <sub>grav</sub>	CAA										
Catarina	22,3	b	34,8	c	42,9	a	4,9	c	1,2	a	2,6	a	54,6	c	39,0	c	21,2	d	21,0	a
Chinchiná	18,6	b	56,8	a	24,6	b	9,4	a	0,7	d	2,7	a	72,6	a	57,9	a	40,7	a	12,3	b
Doscientos	24,8	b	36,4	c	38,8	a	4,5	c	1,0	c	2,6	a	62,8	b	47,6	b	29,7	b	17,9	ab
Guamal	18,0	b	43,2	b	38,8	a	4,0	c	1,1	b	2,7	a	58,3	c	42,4	bc	26,7	c	17,0	ab
Quindío	51,0	a	27,5	d	21,5	b	6,2	b	1,0	c	2,6	a	63,0	b	37,1	c	22,0	d	14,4	ab

A: arena; L: limo; Ar: arcilla; MO: materia orgánica; Da: densidad aparente; Dr: porosidad real; Pt: porosidad total; CC<sub>grav</sub>: retención de humedad a capacidad de campo; PMP<sub>grav</sub>: retención de humedad a punto de marchitez permanente; CAA: capacidad de almacenamiento de agua.

**Tabla 6.** Correlaciones de Pearson entre las propiedades analizadas (n=80), en las unidades cartográficas de interés.

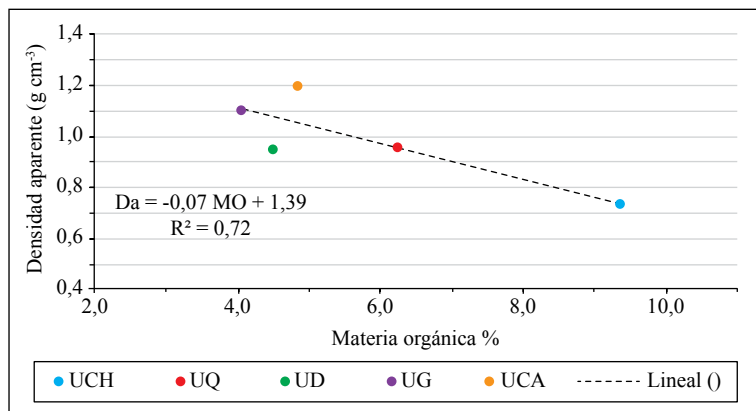
Propiedad	Da	CC <sub>grav</sub>	PMP <sub>grav</sub>	MO	CAA	Pt
Da						
CC <sub>grav</sub>	-0,55***					
PMP <sub>grav</sub>	-0,77***	0,63***				
MO	-0,57***	0,32**	0,46***			
CAA	PD	PD	PD	SC		
Pt	PD	0,53***	0,68***	0,57***	SC	
A	SC	-0,33**	-0,31**	SC	SC	SC
L	-0,41***	0,49***	0,70***	0,35**	SC	0,37***
Ar	0,61***	SC	-0,30**	-0,39***	0,36**	-0,55***

C. Corr: coeficiente de correlación; \* = valor  $p < 0,05 \geq 0,01$ ; \*\* = valor  $p < 0,01 \geq 0,001$ ; \*\*\* = valor  $p < 0,001$ ; Da: densidad aparente; CC<sub>grav</sub>: retención de humedad a capacidad de campo en % gravimétrico; PMP<sub>grav</sub>: retención de humedad a punto de marchitez permanente en % gravimétrico; MO: materia orgánica; CAA: capacidad de almacenamiento de agua; Pt: porosidad total; A: arenas; L: limos; Ar: arcillas; PD: no se presenta el valor porque es propiedad derivada; SC: sin correlación.

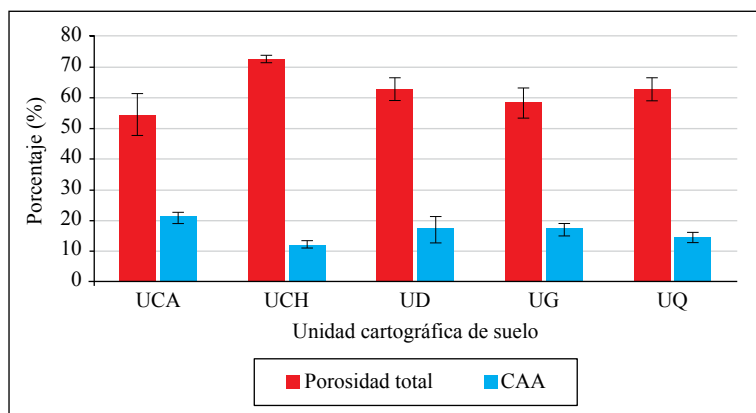
**Tabla 7.** Modelos de regresión lineal para  $CC_{grav}$  y  $PMP_{grav}$ , en las unidades cartográficas estudiadas.

Modelo (n = 80)	R <sup>2</sup>
$CC_{grav} = 89,63^{***} - 37,35^{***} Da - 0,30^{***} A$	0,47
$PMP_{grav} = -176,17 - 29,87^{***} Da + 2,18^* A + 2,45^* L + 2,33^* Ar$	0,81

$CC_{grav}$ : retención de humedad a capacidad de campo % gravimétrico;  $PMP_{grav}$ : retención de humedad a punto de marchitez permanente % gravimétrico; \* = valor  $p < 0,05 \geq 0,01$ ; \*\* = valor  $p < 0,01 \geq 0,001$ ; \*\*\* = valor  $p < 0,001$ .



**Figura 5.** Relación entre MO y  $Da$  para las unidades de suelo de interés (promedio de cada unidad con 16 datos).



**Figura 6.** Porosidad total y capacidad de almacenamiento de agua para las unidades de suelo Catarina–UCA, Chinchiná–UCH, Doscientos–UD, Guamal–UG y Quindío–UQ (n=16). Las barras corresponden al error estándar.

## AGRADECIMIENTOS

El autor presenta sus agradecimientos a la FNC, financiadora de la investigación, a los integrantes de la Disciplinas de Suelos de Cenicafé, a los

Ingenieros Agrónomos Andrés Felipe Castro y Wadi Andrey Castaño, y al Comité Departamental de Cafeteros de Risaralda, principalmente a los ingenieros Daniel Mauricio Gómez, Norberto Rincón y Sandra Milena García.

## LITERATURA CITADA

- Al Majou, H., Bruand, A., & Duval, O. (2008). The use of in situ volumetric water content at field capacity to improve the prediction of soil water retention properties. *Canadian Journal of Soil Science*, 88(4), 533–541. <https://doi.org/10.4141/CJSS07065>
- Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A. M., Salazar, L. F., & Hincapié, E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/720>
- Bortolini, D., & Albuquerque, J. A. (2018). Estimation of the Retention and Availability of Water in Soils of the State of Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42, e170250 <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170250>
- Cardona, D. A., & Sadeghian, S. (2005). Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Revista Cenicafé*, 56(4), 348–364. <http://hdl.handle.net/10778/197>
- Costa, A., Albuquerque, J. A., Costa, A., Pértile, P., & Silva, F. (2013). Water retention and availability in soils of the State of Santa Catarina-Brazil: Effect of textural classes, soil classes and lithology. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(6), 1535–1548. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600010>
- Dobarco, M. R., Bourennane, H., Arrouays, D., Saby, N. P., Cousin, I., & Martin, M. P. (2019). Uncertainty assessment of *GlobalSoilMap* soil available water capacity products: A French case study. *Geoderma*, 344, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.036>
- Dobarco, M. R., Cousin, I., Le Bas, C., & Martin, M. P. (2019). Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma*, 336, 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022>
- Farfán, F., & Hincapié, E. (2011). Valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en sistemas de producción de café en Colombia. *Revista Cenicafé*, 62(1), 100–118. <http://hdl.handle.net/10778/476>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1986). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Quindío*.
- Folberth, C., Skalský, R., Moltchanova, E., Balkovič, J., Azevedo, L. B., Obersteiner, M., & van der Velde, M. (2016). Uncertainty in soil data can outweigh climate impact signals in global crop yield simulations. *Nature Communications*, 7(1), 11872. <https://doi.org/10.1038/ncomms11872>
- González, H., Zapata, R., & Sadeghian, S. (2009). Caracterización de los ácidos húmicos en suelos de la zona cafetera de Caldas. *Revista Cenicafé*, 60(1), 25–40. <http://hdl.handle.net/10778/156>
- Haghverdi, A., Öztürk, H. S., & Cornelis, W. M. (2014). Revisiting the pseudo continuous pedotransfer function concept: Impact of data quality and data mining method. *Geoderma*, 226–227, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.02.026>
- Hincapié, E. (2011). *Estudio y modelación del movimiento del agua en suelos volcánicos de ladera* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9296>
- Hincapié, E., & Salazar, L. F. (2011). Impacto de la erosión sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y la producción de café. *Revista Cenicafé*, 62(2), 79–89. <http://hdl.handle.net/10778/490>
- Huang, P. M., Li, Y., & Sumner, M. E. (Eds.). (2011). *Handbook of Soil Sciences, Properties and processes* (2. ed. [compl. rev. and rewritten]). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11267>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1990). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos* (5ta ed.). IGAC.
- Keller, T., Arvidsson, J., & Dexter, A. R. (2007). Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil and Tillage Research*, 92(1), 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.001>
- Kilmer, V. J., & Alexander, L. T. (1949). Methods of making mechanical analyses of soils. *Soil Science*, 68(1), 15–24. [https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1949/07000/METHODS\\_OF\\_MAKING\\_MECHANICAL\\_ANALYSES\\_OF\\_SOILS.3.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1949/07000/METHODS_OF_MAKING_MECHANICAL_ANALYSES_OF_SOILS.3.aspx)
- Kirkham, M. B. (2005). Field Capacity, Wilting Point, Available Water, and the Non-Limiting Water Range. En *Principles of Soil and Plant Water Relations* (pp. 101–115). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012409751-3/50008-6>
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of soil physics*. CRC Press.
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology* (2nd ed.). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3>

- Lince, L. A., & Sadeghian, S. (2016). Producción de café (*Coffea arabica* L.) en función de las propiedades del suelo, en dos localidades de Quindío, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(1), 71–82. <https://doi.org/10.22490/21456453.1547>
- Lipiec, J., Walczak, R., Witkowska-Walczak, B., Nosalewicz, A., Słowińska-Jurkiewicz, A., & Sławiński, C. (2007). The effect of aggregate size on water retention and pore structure of two silt loam soils of different genesis. *Soil and Tillage Research*, 97(2), 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.001>
- Medina, S. B., & Salazar, L. F. (2009). Relación entre la resistencia al corte directo y propiedades físicas y químicas en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 60(3), 253–268. <http://hdl.handle.net/10778/155>
- Nobel, P. S. (2009). Chapter 9—Plants and Fluxes. En P. S. Nobel (Ed.), *Physicochemical and Environmental Plant Physiology* (4th ed., pp. 438–505). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374143-1.00009-0>
- Or, D., Wraith, J. M., Robinson, D. A., & Jones, S. B. (2011). Soil water content and water potential relationships. En P. M. Huang, Y. Li & M. E. Sumner (Eds.), *Handbook of soil sciences: Properties and processes* (2nd ed. pp. 41–69). CRC Press.
- Padarian, J., Minasny, B., McBratney, A. B., & Dalglish, N. (2014). Predicting and mapping the soil available water capacity of Australian wheatbelt. *Geoderma Regional*, 2–3, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.09.005>
- Rawles, W. J., & Brakensiek, D. L. (1982). Estimating soil water retention from soil properties. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(2), 166–171. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0034246>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Sadeghian, S. (2010). *La materia orgánica: Componente esencial en la sostenibilidad de los agroecosistemas cafeteros*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/1113>
- Sadeghian, S., Salamanca, A., & Cardona, D. (2004, octubre 20–22). Indicadores de la calidad del suelo en algunos agroecosistemas de la zona cafetera colombiana. I Taller Nacional sobre Indicadores de Calidad del Suelo: Conceptos y Principios Aplicados a la Evaluación de la Degradación de las Tierras CIAT. Palmira, Colombia.
- Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 56(4), 381–397. <http://hdl.handle.net/10778/163>
- Shao, X., Wang, Y., Bi, L., Yuan, Y., Su, X., & Mo, J. (2009). Study on soil water characteristics of tobacco fields based on canonical correlation analysis. *Water Science and Engineering*, 2(2), 79–86. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2009.02.009>
- Suárez, S., Caballero, R., Chavarriaga, G., & Quevedo, P. (1986). Caracterización física, uso, manejo y conservación de algunos suelos de origen ígneo, metamórfico y sedimentario de la zona cafetera del departamento del Huila. *Revista Cenicafé*, 37(2), 41–60. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc037%2802%29041-060.pdf>
- Suárez, S. (1980). Caracterización física de algunos suelos de origen ígneo, metamórfico y sedimentario del Tolima. *Revista Cenicafé*, 31(3), 105–124. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc031%2803%29105-124.pdf>
- Suárez, S. (2000, julio 24–28). Características físicas de los suelos de la zona cafetera colombiana relacionadas con el uso, manejo y conservación. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Organizador), *Simposio sobre suelos de la zona cafetera colombiana*. Manizales, Caldas, Colombia.
- Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G., & Tóth, G. (2015). New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*, 66(1), 226–238. <https://doi.org/10.1111/ejss.12192>
- Valencia, G. (1999). *Fisiología, nutrición y fertilización del café*. Cenicafé.
- Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1927). The relation of soil moisture to cultivation and plant growth. *Soil Science*, 3, 498–513.
- Warrick, A. W., & Nielsen, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. En D. Hillel (Ed.), *Applications of soil physics* (pp. 319–344). Academic Press.
- Zech, W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T. M., Miltner, A., & Schroth, G. (1997). Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*, 79(1–4), 117–161. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00040-2)

# DINÁMICA POBLACIONAL, DISPERSIÓN Y COLONIZACIÓN DE LA BROCA DEL CAFÉ *Hypothenemus hampei* EN COLOMBIA

Luis Miguel Constantino Chuaire \*, José Raúl Rendón Sáenz \*\*, Giovanny Cuesta Giraldo \*\*\*, Rubén Darío Medina Rivera \*\*\*\*, Pablo Benavides Machado \*



Constantino, L. M., Rendón, J. R., Cuesta, G., Medina-Rivera, R., & Benavides Machado, P. (2021). Dinámica poblacional, dispersión y colonización de la broca del café *Hypothenemus hampei* en Colombia. *Revista Cenicafé*, 72(1), e72102. <https://doi.org/10.38141/10778/72102>

Con el fin de describir la dinámica poblacional de la broca, en la Estación Experimental Naranjal (Chinchiná, Caldas), se seleccionaron dos lotes de café *Coffea arabica* var. Castillo®, uno a libre exposición y otro bajo sombrío, cada uno de una hectárea. A partir de la formación de los primeros frutos, mensualmente en cada lote, en 30 árboles seleccionados aleatoriamente, se determinó la población de broca por árbol, los vuelos de los adultos mediante capturas en 70 trampas de alcohol y se mapeó el movimiento del insecto dentro del lote, durante cuatro años; los datos obtenidos se relacionaron con los eventos climáticos. Se encontró una mayor densidad poblacional de broca en cultivos de café con sombrío durante los eventos El Niño y Neutro, con promedios por árbol de  $2.674 \pm 213,9$  individuos y  $1.675 \pm 95$  individuos de broca, respectivamente, en contraste con  $1.326 \pm 105,2$  y  $516 \pm 23$  a libre exposición para los dos eventos climáticos; durante La Niña, no se observaron diferencias significativas entre los dos sistemas de producción, con bajos niveles de población. Los vuelos de la broca fueron mayores en el lote con sombrío en períodos El Niño, con capturas de  $23.645 \pm 1.352$  adultos en contraste con períodos La Niña, con  $997 \pm 92$  individuos. De acuerdo con los mapas, el movimiento de la broca dentro de los dos sistemas de producción se dio de manera agregada, según la Ley de poder de Taylor, siendo el coeficiente de regresión lineal ( $\beta$ ) mayor que 1, según el estadístico de prueba t, al 5%.

**Palabras clave:** Densidad poblacional, *Coffea arabica*, clima, temperatura, control cultural.

## POPULATION DYNAMICS, DISPERSAL AND COLONIZATION OF COFFEE BERRY BORER *Hypothenemus hampei* IN COLOMBIA

In order to describe the population dynamics of Coffee Berry Borer, two one-hectare plots of coffee *Coffea arabica* var. Castillo (sun vs. shade) were chosen at the Naranjal Central Station, Chinchiná, Caldas, Colombia. From the formation of the first fruits, the population of CBB per tree and the flights of the adults were determined through captures in 70 alcohol traps; also, the movements of the insect were mapped monthly in each plot, in 30 randomly selected trees during four years. The results obtained were related to climatic events. A higher population density of CBB was found in shade-grown coffee during El Niño and neutral events with averages of  $2,674 \pm 213.9$  and  $1,675 \pm 95$  individuals of CBB per tree respectively, in contrast to  $1,326 \pm 105.2$  and  $516 \pm 23$  exposed to full sunlight for both climatic events. During La Niña, no significant differences were observed between the two production systems and low population levels were obtained. The flights of the CBB were higher in shade-grown coffee during El Niño periods, with captures of  $23,645 \pm 1,352$  adults in contrast to La Niña periods with  $997 \pm 92$  individuals. According to the maps, the movement of CBB within the two production systems occurred in an aggregated pattern according to Taylor's Power Law, with a linear regression coefficient ( $\beta$ ) greater than 1, according to the t-test statistic, at 5%.

**Keywords:** Population dynamics, *Coffea arabica*, climate, temperature, cultural control.

\*Investigador Científico II e Investigador Científico III. Disciplina de Entomología, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0001-8117-5803> y <https://orcid.org/0000-0003-2227-4232>

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

\*\*\* I.A. MSc. Café Granja La Esperanza SA CI. <https://orcid.org/0000-0002-0573-7744>

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



La broca del café, *Hypothenemus hampei* Ferrari, 1867 (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), es la plaga más importante del cultivo del café en Colombia y en el mundo. Su importancia radica en el hecho de que el adulto barrena las almendras y se reproduce en el interior del endospermo, causando pérdida total o parcial del grano (Cárdenas, 1991 y Bustillo et al., 1998). A pesar de su importancia como plaga y los numerosos estudios en diferentes aspectos de la biología, manejo integrado del insecto y métodos de control, son pocos los trabajos de investigación acerca del efecto del sombrío en la dinámica poblacional y ecología del insecto en cultivos de café. Los estudios sobre el efecto del sombrío en la densidad poblacional de la broca del café, en diferentes sistemas agroforestales del mundo, son distintos y contradictorios. Por ejemplo, Jaramillo et al. (2013) reportan mayor infestación de broca en cultivos a libre exposición que bajo sombra; Atallah et al. (2018) sugieren que disminuyendo la temperatura puede mantener las poblaciones de broca en cultivos con sombra por debajo del nivel de aquellas encontradas en cultivos a libre exposición solar; Teodoro et al. (2008) indican que entre más complejos son los sistemas agroforestales del cultivo de café y mayor la diversidad de árboles de sombrío menor es la densidad poblacional de la broca.

Algunos autores reportan un incremento de las plagas y enfermedades con el incremento de la luz (Wrigley, 1988), mientras que otros reportan lo opuesto (Eskes, 1982). Parece que la luz es sólo uno de los factores que afectan la productividad de los sistemas de café, pero otros relacionados con la estructura física del sombrío y la diversidad de árboles ayudan a incrementar los enemigos naturales, afectando la dinámica poblacional de las plagas. Por ejemplo, la complejidad de la estructura física y la diversidad del dosel arbóreo en sistemas agroforestales de café puede reducir la abundancia de herbívoros y aumentar la

abundancia de los enemigos naturales (Altieri y Letorneau, 1982; Armbrrecht & Perfecto, 2001; Perfecto et al., 1996; Perfecto et al., 2005; Johnson et al., 2010). Por el contrario, Soto et al. (2002) en México, mencionan que no existe correlación entre los niveles de infestación de la broca y la densidad de luz-sombra en cultivos orgánicos, mientras que Alvarado (2018) indica que la distribución espacial de la broca del café está condicionada hacia los sectores de mayor vegetación y sombra, sin que se haya podido evidenciar una relación directa con la diversidad florística. Feliz-Matos et al. (2004) encontraron que el café bajo la sombra densa de pomarrosa *Eugenia jambos* L. (Alston) (Myrtaceae), presentó una mayor incidencia de la broca (17%-25% de infestación de frutos), pero entre la sombra de mataratón *Gliricidia sepium* (Jacq) (Fabaceae) y a pleno sol no hubo diferencias.

Otros estudios indican que la incidencia y los niveles de infestación y daño de la broca son mayores en cafetales con sombra que en cafetales expuestos al sol (Decazy, 1990; Feliz-Matos, 2003, 2004; Julca et al., 2016; Chinguel, 2017; Mariño et al., 2016). Una explicación de esto la plantea Feliz-Matos (2003) quien indica que la mayor incidencia de luz solar causa reducción de la humedad relativa del aire, por debajo de 70% en las horas de la tarde, en las calles de las plantaciones de café a pleno sol; esto se convierte en un factor limitante para las actividades de vuelo y oviposición de las hembras de la broca. Un ambiente de baja humedad causaría deshidratación y alta mortalidad a estas hembras, reduciendo así las poblaciones futuras; sin embargo, las altas humedades relativas en las calles con sombrío favorecen estas características, resultando en un aumento de las poblaciones en esta condición.

Otros autores reportan que, además del nivel de sombrío, la variabilidad climática es la que realmente muestra un marcado efecto en



la dinámica poblacional de la broca del café en el campo (Baker, 1986; Baker et al., 1992; Bustillo, 2002, 2006; Mendesil et al., 2004; Jaramillo, 2005), principalmente asociados a los eventos climáticos El Niño y La Niña (Constantino et al., 2011; Ramírez et al., 2014; Ramírez et al., 2015) y de acuerdo a la ubicación altitudinal (Constantino, 2010; Constantino et al., 2011). El desarrollo del insecto y el efecto sobre la acumulación de tiempo térmico, expresado en grados día, sirven para identificar épocas y regiones de crecimiento óptimo del insecto en el país (Ramírez et al., 2015; Giraldo et al., 2018). Mientras que Beer et al. (1997) y Atallaha et al. (2018) sugieren que los cafetales con árboles con sombrío pueden disminuir la temperatura alrededor de los frutos de café de 4 a 5°C.

Este planteamiento se fundamenta en estudios de laboratorio y modelación bajo condiciones ambientales controladas de temperatura, que ocasionan mayor incremento de la oviposición y mayor número de generaciones del insecto por año con el aumento de la temperatura, por lo tanto, los modelos climáticos, bioeconómicos y estadísticos en que se basan las predicciones futuras de incidencia de esta plaga sugieren un mayor incremento poblacional de la broca del café con las altas temperaturas relacionadas al cambio climático (Jaramillo et al., 2010; Agegnehu et al., 2015; Atallaha et al., 2018; Ziska et al., 2018). Sobre el particular, Jaramillo et al. (2009) predicen un índice intrínseco máximo de crecimiento de la población de la plaga del 8,5% por cada aumento de 1,0°C. Giraldo et al. (2018) estudiaron los requerimientos térmicos y el ciclo de vida de la broca en el laboratorio para determinar el número de generaciones por año, encontrando que el tiempo de desarrollo de *H. hampei* es afectado por la temperatura, completando su ciclo de vida más rápidamente, al aumentar las temperaturas hasta el umbral de 30°C y más lentamente por encima de esta temperatura. Sin

embargo, bajo condiciones naturales en el campo se conjugan muchos factores agroecológicos, biológicos, altitudinales y ambientales tales como las temperaturas máximas y mínimas que varían en el día y la noche, y el control de los enemigos naturales que influyen en el crecimiento o disminución de las poblaciones de la broca del café.

Por eso es importante entender el comportamiento reproductivo de la broca bajo diferentes condiciones ambientales y agroecológicas en el campo, tales como la lluvia, la humedad, la precipitación, la temperatura, la altitud y el nivel de luminosidad, ya que determina el número de generaciones por año. El número de generaciones que suceden en un medio natural es ante todo dependiente de las variaciones térmicas registradas durante el ciclo del fruto de café (Borbón-Martínez, 1991). Cuando hay disponibilidad de alimento durante todo el año, como sucede en la zona central cafetera de Colombia, la broca alcanza hasta ocho generaciones al año, con un tiempo generacional de 40 días a 22°C, y como estas se traslapan, en un momento dado pueden encontrarse todos los estados de desarrollo del insecto (Ruiz, 1996). Si se suma a esto el hecho de que la tasa reproductiva neta de una hembra puede ser de 25 a 150 individuos y que una hembra puede vivir hasta 150 días, el crecimiento poblacional del insecto es exponencial, llegando a incrementarse considerablemente si no se toman medidas de manejo y control oportunas (Bergamín, 1944; Cárdenas, 1991; Bustillo, 2008). Baker (1984) afirma que la temperatura y la humedad, generadas por la precipitación, juegan un papel importante en el inicio del ataque de la broca.

Se ha observado experimentalmente bajo condiciones de laboratorio, que al humedecer las cerezas secas caídas o dejadas de la cosecha anterior, un gran número de insectos emergen de las mismas (Baker, 1992). De hecho, las

lluvias están indirectamente relacionadas con el desarrollo del insecto, pues éste depende del fruto y este último a su vez, de las floraciones, las cuales están directamente relacionadas con los regímenes de lluvias.

Cuando los frutos sobremaduros y secos quedan en el suelo, la broca sigue reproduciéndose en ellos hasta alcanzar una descendencia numerosa (entre 30-150 adultos por fruto) (Bustillo, 2002). Los períodos prolongados de sequía favorecen el desarrollo del insecto en menor tiempo, beneficiando la reproducción dentro de los frutos (Ramírez et al., 2014). Si las condiciones ambientales son desfavorables, la broca permanece refugiada en los frutos secos en los sitios húmedos debajo de los árboles donde se crea un microambiente favorable para su supervivencia (Cárdenas, 1991). Con la llegada de las lluvias las brocas emergen entre los 45 y 60 días posteriores dispersándose por el cafetal y penetrando los frutos remanentes en el árbol (Baker, 1984; Castaño et al., 2005). Una de las razones que soportan esto es que la broca del café es susceptible a humedades bajas, por lo tanto, si sale del grano durante un período seco encontrará condiciones poco favorables y lo más probable es que muera deshidratada (Baker, 1986), mientras que si lo hace después de un aguacero, la humedad ambiental va a ser más alta y las condiciones más favorables para sobrevivir mientras encuentra un fruto para infestar. Si no encuentra condiciones favorables, su progenie puede permanecer dentro del fruto por varias generaciones; lo anterior convierte a esta población remanente en la principal fuente de infestación en la siguiente cosecha (Arcila et al., 1993).

Con estos antecedentes y entendiendo la relación de densidad poblacional que tiene el insecto con las diferentes variables ambientales y agroecosistemas, se podrían predecir y generar alertas tempranas para

orientar a los agricultores acerca de las medidas de manejo más apropiadas en una región y condición agroecológica específica, para el manejo oportuno de las poblaciones de esta plaga en la zona andina de nuestro país. El objetivo de esta investigación fue describir la dinámica poblacional de la broca del café en el campo bajo dos sistemas de producción (sol y sombra) a través del tiempo, en tres condiciones climáticas diferentes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en dos lotes de café, en la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé, ubicada en el municipio de Chinchiná (Caldas), a 1.380 m de altitud, con una temperatura promedio de 21,4°C, precipitación anual de 3.435 mm y brillo solar de 1.723 horas/año en promedio (Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé, 2018), donde nunca antes se había sembrado café. Ambos lotes con edades de un año, de 1,1 hectárea, con una densidad de siembra de 1,0 x 1,3 m, con 7.000 árboles cada uno.

El lote uno, fue un sistema de producción a libre exposición, tecnificado y sembrado con *Coffea arabica* L. var. Castillo<sup>®</sup>, rodeado de cultivos de café al Norte, áreas de protección en bosque en regeneración al Sur, un gradual en la parte Nororiental y cultivos de café en el Oriente. El lote dos, fue sembrado con *C. arabica* var. Castillo<sup>®</sup> orgánico, bajo un sistema de producción con sombrío estratificado intercalado, compuesto de arbustos de *Tephrosia juncea* Benth (Fabaceae) de 3 m de altura sembrados entre los surcos, durante el levante del cultivo en el primer año, y además árboles de guamo *Inga edulis* Marth (Fabaceae), guamo macheto *Inga densiflora* Benth (Fabaceae), nogal cafetero *Cordia alliodora* (Boraginaceae), cámbulo *Erythrina fusca* Lour (Fabaceae), carbonero *Albizia carbonaria* Britton (Fabaceae) y písamo

*Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F.Cook (Fabaceae) de tres años de edad, establecidos a una distancia de siembras de 12,0 x 12,0 m, con un total de 70 árboles de sombra por hectárea. Este lote estuvo rodeado de áreas protectoras en guaduales en la parte Nororiental y en el Sur, y con café orgánico en la parte Suroriental y Occidental, con la misma edad y densidad de siembra.

### **Densidad poblacional de la broca del café en frutos del árbol**

Para cada parcela, se seleccionaron 30 árboles de café (unidad de muestreo) de forma aleatoria cada mes, durante cuatro años. En cada uno de ellos se registró el número de ramas productivas; de ellas se tomaron al azar las dos ramas más productivas y se registró el número de frutos presentes y los que se encontraban perforados por broca. En las ramas seleccionadas para la estimación de la infestación, se recolectaron 100 frutos perforados por broca. A estos frutos se les hizo la disección para registrar el número de individuos de broca por estado de desarrollo (huevos, larvas, pupas y adultos). Con el registro del número promedio de ramas productivas de cada árbol, el promedio de frutos brocados por rama y el promedio de estados biológicos de broca en los frutos del árbol, se estimó la densidad de broca en cada fecha de evaluación a través del tiempo.

### **Densidad poblacional de la broca del café en frutos del suelo**

Igualmente, en el suelo se estimó el total poblacional relacionando el número de frutos brocados caídos en el plato de cada uno de los 30 árboles seleccionados aleatoriamente, en cada sistema de producción (sol y sombra), contabilizando el número promedio de estados biológicos de broca al interior de dichos frutos en cada fecha de evaluación.

### **Porcentaje de infestación por broca del café en dos sistemas de producción**

En cada uno de los sistemas de producción, en los mismos 30 árboles de café seleccionados aleatoriamente cada mes, para estimar la densidad poblacional, se tomaron las dos ramas más productivas y se registró el número de frutos presentes y los que se encontraban perforados por broca. Con esta información se estimó la infestación promedio de broca por árbol a través del tiempo.

### **Monitoreo de los vuelos y capturas de la broca del café con trampas de alcohol**

Con el fin de monitorear los vuelos de la broca para explicar el movimiento del insecto, en el lote 2 con sombra, cuando los frutos de la primera cosecha tenían 120 días, se colocaron 70 trampas de embudo múltiple, cebadas con una mezcla de metanol:etanol (3:1), cada 10 m (Cárdenas, 2000), rodeando completamente el lote experimental, a una distancia de 7 m de los primeros árboles. Posterior y mensualmente, se hizo la lectura del número de brocas capturadas, durante cuatro ciclos productivos (4 años), para conocer las épocas de vuelo de la broca en la localidad de Naranjal.

### **Determinación de los grados día**

Para la estimación de los grados día en el campo, se registraron las temperaturas extremas diarias (máximas y mínimas, en °C) de la estación meteorológica de Cenicafé ubicada en la Estación Experimental Naranjal (Chinchiná, Caldas), a 1.381 m donde se hizo el presente estudio. Para esto se calculó la relación lineal entre la temperatura y la tasa de desarrollo de la broca del café, tomando como referencia el estudio de Vargas (2009), realizado en el campo en la Estación Experimental Naranjal, donde determinó la constante térmica de desarrollo

del insecto, realizando infestaciones artificiales de broca con mangas entomológicas en ramas de café. El número de días que puede demorar en incubar un huevo, eclosionar una larva o emerger un adulto, se obtuvo mediante la acumulación de grados día, la cual se calculó restando a la temperatura media del día el valor de la temperatura del umbral inferior de la especie (Estay, 2009).

### **Efecto de las variables climáticas en la densidad poblacional de la broca**

Con el fin de relacionar los eventos climáticos El Niño, La Niña y Neutro con la densidad poblacional y la infestación de la broca del café, en los dos sistemas de producción (sol y sombra), se llevaron los registros diarios de temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), temperatura media (°C), brillo solar (h), humedad relativa (%HR) y precipitación (mm) provenientes de la estación meteorológica de Cenicafé ubicada en la Estación Experimental Naranjal.

### **Colonización y dispersión de la broca del café**

Para determinar la llegada de la broca a los lotes experimentales, como medida de colonización, una vez establecidas las parcelas y delimitadas las áreas, se levantó un mapa de cada lote. Cada árbol de café fue georeferenciado usando el *software* con el programa ArcGis 9.3 para tener el posicionamiento espacial bajo un sistema de coordenadas. La ubicación de los árboles en los mapas se demarcó con un punto. Cada mes, durante cuatro años, se registró en cada uno de los árboles de las parcelas, la presencia o ausencia de frutos infestados por broca, en las ramas de la zona productiva. La presencia de broca en las ramas productivas fue demarcada en los mapas con un punto rojo y su ausencia con un punto blanco.

### **Análisis estadísticos**

Para los análisis de infestación e incidencia de la broca del café para cada parcela de monitoreo y rango altitudinal, se obtuvieron los promedios y variación expresada en términos de error estándar (SE), por medio de un análisis de varianza (ANOVA), para cada uno de los parámetros de la dinámica de poblaciones: porcentaje de infestación de broca en los frutos del árbol y del suelo, densidad de broca por árbol y número de brocas capturadas en trampas de alcohol, para el modelo asociado al diseño experimental completamente aleatorio, al 5%, en cada fecha de evaluación, utilizando el programa estadístico SAS (SAS, 2014).

Posteriormente, se comparó la densidad de broca por árbol y por lote, entre los sistemas de producción de café: al sol y con sombrío. La comparación entre los dos sistemas de producción se realizó empleando pruebas de t-pareada o su equivalente no paramétrico, de acuerdo al comportamiento de los datos. Adicionalmente, se obtuvo el estimador de razón de la densidad poblacional de brocas en el lote y el número de brocas capturadas con trampas de alcohol, para lo cual se verificó previamente, la existencia de una relación lineal o no lineal, entre cada una de las variables de respuestas y con cada una de las variables de clima (temperatura máxima, media, mínima, precipitación y brillo solar).

Para el análisis estadístico con los mapas de dispersión de la broca del café, los datos de recuentos de insectos obtenidos en el campo se transformaron a  $\log_{10}(x + 1)$ . Para determinar si la broca presentaba agregación o no, se calculó el índice de dispersión del insecto por medio del método estadístico conocido como la ley de poder de Taylor o ley de la media, entendido como la relación entre la variancia muestral ( $S^2$ ) y la media muestral ( $m$ ) de

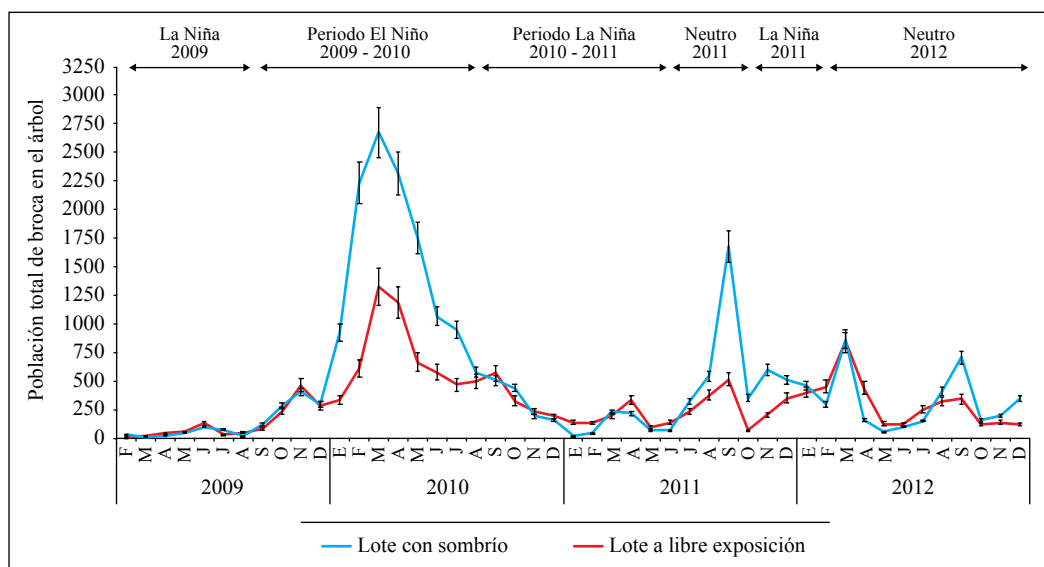
las densidades poblacionales, expresada por la siguiente fórmula:  $S^2 = a m^b$  de la cual se deduce la regresión:  $\log_{10}S^2 = \log_{10}a + b\log_{10}m$  que relaciona mediante una regresión, el logaritmo de la varianza y el logaritmo de la media. Se interpreta el valor de  $b$  como índice de agregación así: si  $b > 1$  el índice de dispersión es agregado, si  $b = 1$ , la dispersión es al azar, y si  $b < 1$  los datos se ajustan a un patrón de dispersión uniforme, según el estadístico de prueba  $t$ , al 5% (Taylor, 1984; Giraldo et al., 2002).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Densidad poblacional de la broca del café en frutos del árbol

Los resultados del estudio de dinámica poblacional de la broca del café en dos sistemas de cultivo, uno bajo sombrío y otro a libre exposición solar, se presentan en la Figura 1. La densidad poblacional de la broca del café

mostró un incremento mayor en cultivos de café con sombrío durante períodos climáticos El Niño ( $F=20,7$ ;  $df= 3$ ;  $P < 0,0001$ ), con promedios máximos de densidad por árbol de  $2.674 \pm 213,9$  individuos, en contraste con  $1.326 \pm 105,2$  a libre exposición. Igual comportamiento se registró durante períodos Neutro, pero en menor cantidad ( $F=33,8$ ;  $df=3$ ;  $P < 0,0001$ ), con promedios máximos de densidad por árbol de  $1.675 \pm 95$  individuos de broca bajo sombra y  $516 \pm 23$  a libre exposición; es decir, la densidad poblacional de la broca se duplicó en el lote con sombrío durante el período climático El Niño del año 2010 y en los períodos Neutros de los años 2011 y 2012. En períodos climáticos La Niña, con el incremento de las lluvias y la humedad del suelo, la densidad poblacional de la broca no mostró diferencias estadísticas significativas entre los dos sistemas de producción, con niveles bajos de población entre  $15,8 \pm 0,6$  y  $217 \pm 17,3$  individuos en promedio por árbol ( $F=3,46$ ;  $df=3$ ;  $P=0,068$ ).



**Figura 1.** Densidad de población de broca en el árbol en dos sistemas de producción, durante cuatro ciclos productivos, en la localidad de Naranjal (Chinchiná, Caldas), en tres eventos climáticos.

El beneficio que da la sombra sobre la densidad de la broca durante períodos climáticos El Niño puede obedecer al mismo metabolismo de los insectos que está influenciado por las condiciones externas que lo rodean, como la temperatura, la humedad y el clima. Los insectos como en el caso de la broca del café, son organismos ectotermos, es decir, que no pueden regular su temperatura corporal y dependen de la temperatura ambiente para obtener el calor exponiéndose a la radiación solar (Feliz-Matos et al., 2004); sin embargo, en condiciones extremas de alta temperatura como acontece durante períodos climáticos El Niño (con temperaturas máximas de hasta 29°C para la zona de estudio y humedad relativa del aire por debajo del 70%), la broca puede perder agua por desecación por las altas temperaturas que se encuentran por encima de los umbrales máximos de tolerancia térmica de desarrollo para el insecto, cuando tiene que volar para colonizar nuevos frutos que resultarían perjudiciales para su vida, particularmente crítico para un insecto pequeño de apenas 1,8 mm de longitud.

Para el caso de la broca del café, el umbral de tolerancia térmica de desarrollo está entre 15 y 32°C, con una temperatura óptima de desarrollo a 27°C (Jaramillo et al., 2009; Giraldo et al., 2018). Para evitar las altas temperaturas y la deshidratación, la broca se refugia en los frutos de las ramas bajas y en los frutos del suelo que quedan después de las cosechas. Igualmente los lotes de café con sombrío le ofrecen las condiciones ambientales favorables, como son mayor humedad del suelo y menor temperatura del aire, 4 o 5°C menos a la sombra (Feliz-Matos, 2003; Jaramillo, 2005). Durante el evento El Niño en la zona central cafetera de Colombia, la precipitación anual puede reducirse hasta en un 60% y presentarse déficit hídrico en el suelo. Los estudios de Cenicafé muestran que los cultivos de sombra con guamo (*Inga spp.*) retienen la

humedad del suelo hasta en un 20% más que en un cultivo a libre exposición solar (Farfán y Jaramillo, 2004).

La presencia de adultos de broca durante todo el año, en las dos parcelas experimentales, puede explicarse por las características climáticas de la zona central cafetera colombiana, la cual presenta dos cosechas al año, una de mitaca durante el primer semestre y una principal durante el segundo semestre. Esto inducen floraciones múltiples a través del tiempo, lo que favorece la disponibilidad de frutos en diferentes etapas de desarrollo fisiológico, que garantizan la disponibilidad de alimento y permanencia de la broca durante todo el año en el lote.

#### **Densidad poblacional de la broca del café en frutos del suelo**

Los análisis de densidad poblacional de broca en frutos del suelo se presentan en la Figura 2, para los dos sistemas de producción (sol y sombra). Los resultados muestran que la densidad de población de broca en los frutos del suelo es mayor en el lote con sombrío durante los períodos El Niño y Neutro. La mayor cantidad de frutos caídos en el suelo se presenta después de finalizadas las cosechas de mitaca y principal, observándose un incremento en la población de broca un mes posterior a la caída de los frutos, es decir, a mayor cantidad de frutos brocados caídos en el suelo, la densidad poblacional de la broca en esos frutos es mayor ( $F=31,2$ ;  $df=3$ ;  $P< 0,0001$ ) respecto al lote a libre exposición donde la densidad poblacional de broca es menor. Esto se debe a que con el incremento de la temperatura en períodos El Niño, el desarrollo de la broca en los frutos que quedan en el suelo es mayor y más rápido en comparación con temperaturas más bajas. Igualmente, en períodos lluviosos de La Niña, el aumento de la humedad del suelo

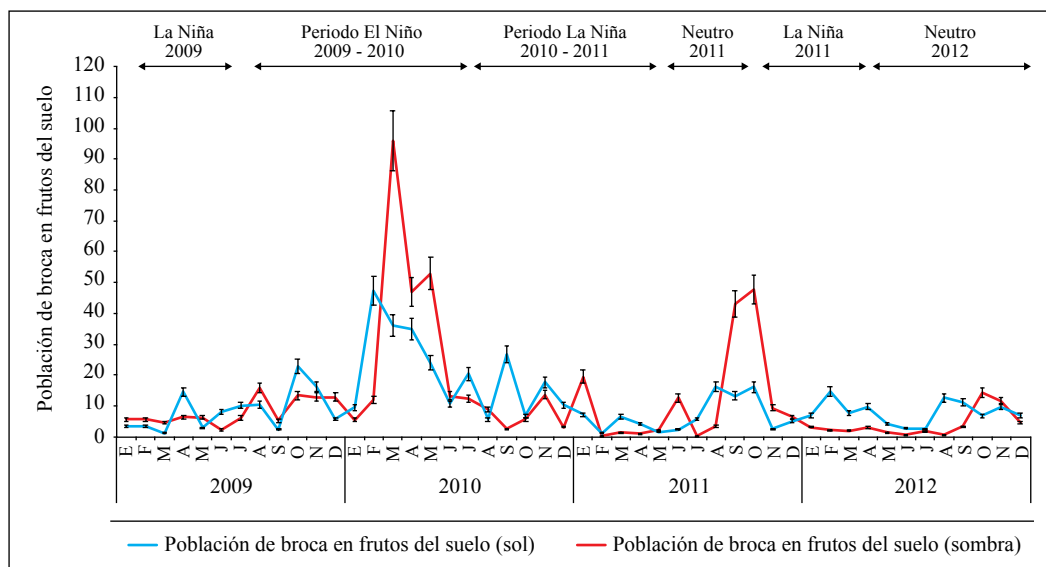
aceleraría los procesos de descomposición y germinación de las almendras que quedan en el suelo, ocasionando mayor mortalidad de estados biológicos de la broca, al no tener alimento para comer, lo cual se refleja en menor emergencia de adultos y en menor infestación y densidad de broca en los frutos del árbol (Constantino, 2010; Constantino et al., 2017). Se ha demostrado bajo condiciones controladas de alta humedad relativa (> 90%) que la broca presenta mayor mortalidad de los estados inmaduros en dieta artificial (Giraldo, 2018).

### Porcentaje de infestación por broca del café

Las altas temperaturas, por encima de 21°C, incrementaron significativamente los porcentajes de infestación de la broca del café hasta un 36,4% durante un período El Niño en el lote con sombrío y hasta 18,9% en el lote a libre exposición ( $F=32,5$ ;  $df=3$ ;  $P<0,0001$ ), mientras que a temperaturas bajas por

debajo de 21°C, durante los períodos La Niña, decrecieron los porcentajes de infestación de broca hasta un 2,9% y 2,5%, respectivamente; es decir, en períodos lluviosos no hubo diferencias estadísticas en el porcentaje de infestación entre el lote a libre exposición y el de sombra ( $F=15,2$ ;  $df=3$ ;  $P=0,079$ ), como se presenta en la Figura 3.

La medición del número de frutos brocados caídos en el suelo y la infestación por broca en el árbol se presenta en la Figura 2. En el lote con sombrío, el número de frutos brocados caídos en el plato de un árbol de café osciló entre uno y diez, siendo mayor durante los picos de cosecha principal y al final de la cosecha de mitaca. Así se tiene que, un fruto brocado en promedio en el suelo incrementó hasta un 4,3% el porcentaje de infestación en el árbol durante el mes de febrero, en un período La Niña en el año 2009, mientras que tres frutos brocados incrementaron hasta un 36,4% el nivel de infestación en el árbol,



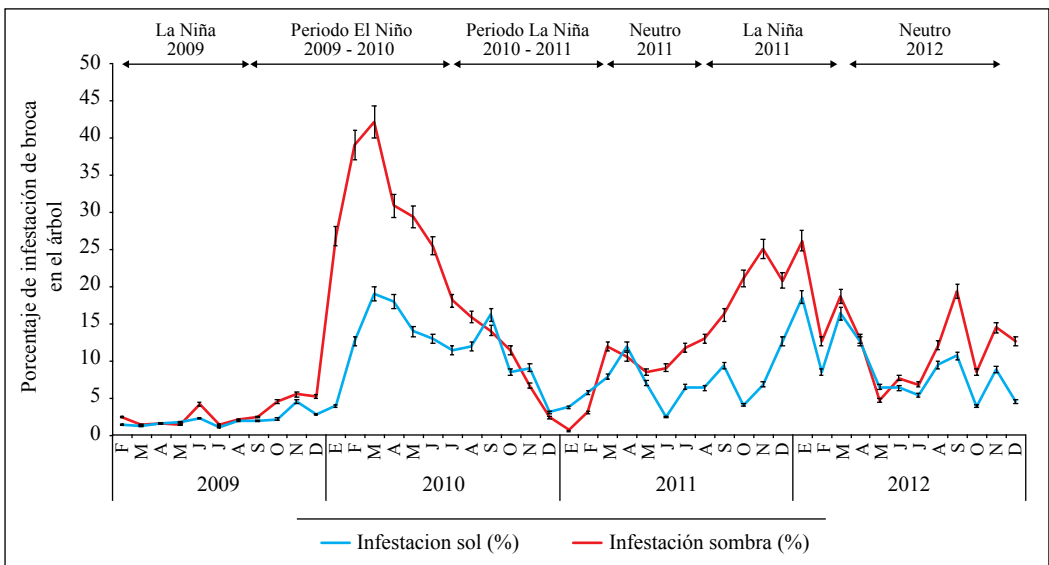
en el mismo mes, durante el período El Niño de 2010 (Figura 3).

Al año siguiente, en el mismo mes, el nivel de infestación de broca bajó hasta un 2,9% como consecuencia de las precipitaciones que se presentaron durante el período climático La Niña 2010. En el lote a libre exposición, un solo fruto brocado en el suelo incrementó hasta 2,3% el nivel de infestación en el árbol, durante el período climático La Niña 2009, y 3,6 frutos brocados incrementaron hasta un 18,9% el nivel de infestación en el árbol en el mes de marzo, durante el periodo climático El Niño 2010; al año siguiente, en el mismo mes, la infestación por broca bajó a 7,1%. En el mes de septiembre de 2011, como consecuencia de un verano corto de dos meses que se presentó en julio y en agosto durante un período Neutro, se propició el desarrollo de la broca en los frutos que quedaron en el árbol y en el suelo, mientras que con las primeras lluvias de septiembre se propició

la emergencia de gran número de adultos de broca, que incrementaron los niveles de infestación en el árbol hasta en un 36% en el lote con sombrío; sin embargo, el nivel de infestación en el lote a libre exposición solo se incrementó en un 8,8% (Figura 3).

Estos resultados muestran el efecto que tiene el clima en el desarrollo y reproducción de la broca en los frutos remanentes de café que se quedan después de la cosechas en los cultivos. Igualmente, se observa el efecto que tienen los frutos de café infestados por broca que se caen al suelo y que sirven de reservorio y refugio al insecto para reinfestaciones posteriores en el árbol, ya que continúa su desarrollo durante 140 días, produciendo nuevas generaciones de brocas que emergen de los frutos para iniciar nuevos ataques de frutos sanos del árbol o del suelo.

Los frutos brocados caídos son los que generan mayor impacto en la infestación en



**Figura 3.** Porcentaje de infestación de broca en frutos del árbol en dos sistemas de producción de café, a través del tiempo bajo tres condiciones climáticas.



el árbol y son el principal problema en el manejo de esta plaga. Desempeñan un papel importante en la dinámica de reinfestación en el árbol, por consiguiente, el repase y la recolección oportuna de estos frutos después de finalizada la cosecha principal son fundamentales para mantener las poblaciones de broca por debajo del nivel de daño económico (<5%) en la cosecha siguiente (Constantino et al., 2017).

### **Monitoreo de los vuelos y capturas de broca del café con trampas de alcohol**

El registro mensual del número de capturas de broca con trampas de alcohol en el lote con sombrío estuvo relacionado con el tamaño poblacional de la broca del café en el lote; es decir, a mayor densidad poblacional del insecto, mayor fue el número de vuelos y capturas de este escarabajo escolítido, a excepción del mes de noviembre de 2009, que correspondió a los vuelos de broca procedentes de un lote zoqueado cerca del lote experimental, el cual generó alta colonización de esta plaga.

El pico más importante de vuelos de broca durante el período El Niño se registró en el año 2010, relacionado con altas temperaturas de hasta 23,1 y 22,8°C, en los meses de febrero y marzo, respectivamente, que incrementaron el tamaño poblacional del insecto. Las capturas promedio oscilaron entre 18.356 y 23.645 adultos para estos dos meses. En períodos La Niña, por el contrario, los vuelos de broca fueron más bajos como consecuencia de las bajas temperaturas, las lluvias excesivas y la alta humedad del suelo que actúan como un factor de mortalidad natural, debido a que aceleran los procesos de descomposición que regulan las poblaciones del insecto al interior de dichos frutos del suelo. Durante el período La Niña de 2011 las capturas en febrero y marzo fueron de 1.118 y 2.034 adultos; es

decir, hubo una disminución del número de capturas del 93,9% y 91,3% con respecto a un período El Niño en los mismos meses (Figura 4).

Las trampas de embudos múltiples, cebadas con metanol:etanol, son útiles para monitorear las épocas de vuelo de la broca y para determinar el momento oportuno en que empiezan a emerger los adultos para colonizar nuevos frutos en el lote. Estos resultados del incremento de las infestaciones en el campo están relacionados con las capturas de adultos de la broca del café, tal como lo indican Mathieu et al. (1999). Aunque las trampas no sirven para el control de la broca del café, porque solo capturan un 10% de la población total de broca en el lote, debido a que su radio de acción es limitado (10 m aproximadamente), podrían dar una idea aproximada de la densidad poblacional del insecto en el lote en un momento determinado (Posada et al., 2003; Benavides et al., 2013). La broca responde a los estímulos del olfato y es atraída hacia los volátiles que se producen durante el proceso de maduración de los frutos de café (Ortiz et al., 2004), principalmente alcoholes, por eso las trampas sirven para monitorear y conocer las épocas de vuelo de la broca, por tal razón solo se hizo el monitoreo con trampas en el lote con sombrío, cercano al lote a libre exposición solar.

Lo anterior se corrobora con la construcción de un estimador de razón, el cual representa el número medio de unidades de Y por cada unidad de X, es decir, al estimar la proporción del promedio de brocas en el árbol (Y) respecto al total de brocas capturadas en las trampas ubicadas en el lote (X), se obtuvo un intervalo para la razón entre 0,074 y 0,106 con un coeficiente de confianza del 95%. Esto significa que, por cada 100 brocas capturadas en trampas, se esperan aproximadamente nueve brocas por árbol. En la Figura 5 se muestra que la relación

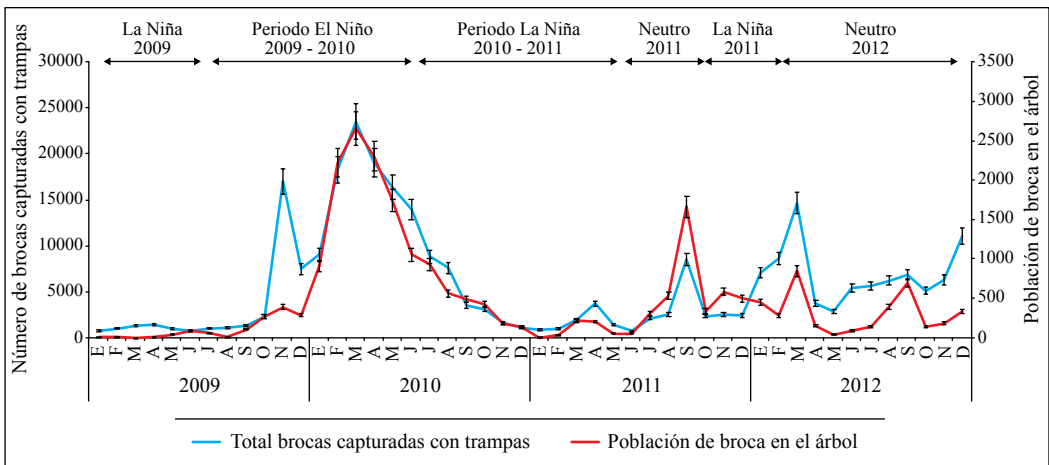
entre ambas variables, tienen una asociación lineal ( $r=0,8892$ ;  $p<0,0001$ ), lo cual permitió generar el estimador.

**Efecto de los factores climáticos en la densidad poblacional de la broca del café**

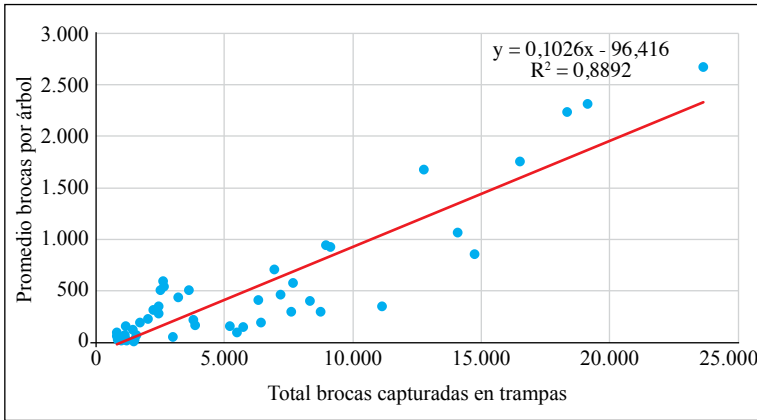
La dinámica de la densidad de población de la broca del café en el presente estudio estuvo influenciada por los factores climáticos El Niño y La Niña, en particular con las variables de temperatura, humedad relativa y precipitación, en el cual las temperaturas medias mensuales registraron valores de 2,0°C por encima del promedio histórico mensual en periodos El Niño y entre 1,0 y 2,0°C por debajo del promedio histórico mensual en periodos La Niña, con base en los registros climáticos proporcionados por la disciplina de Agroclimatología de Cenicafé, en la Estación Experimental Naranjal. El año 2010 se caracterizó por presentar los mayores niveles de precipitación de lluvias en toda la historia. La variabilidad climática estuvo asociada a tres periodos diferentes: un evento La Niña comprendido desde enero hasta junio de 2009, El Niño desde julio de 2009

hasta junio de 2010, seguido por un período La Niña intenso desde julio de 2010 hasta junio de 2011, finalizando con un tiempo Neutro con meses secos (julio-agosto) y un periodo La Niña moderado, que inició en el mes de septiembre de 2011. La densidad de población y los niveles de infestación más altos de broca en el árbol, para el lote con sombrío, se presentaron en los meses de enero, febrero y marzo de 2010, que coincidieron con los meses más calurosos en el período El Niño (con temperaturas medias de 22,1°C, 23,1°C y 22,8°C, respectivamente), esto es un incremento de 2,0°C en la temperatura media en comparación con un período La Niña. La temperatura máxima registrada para los mismos meses fue de 29,5°C, 29,3°C y 28,9°C (Figura 6).

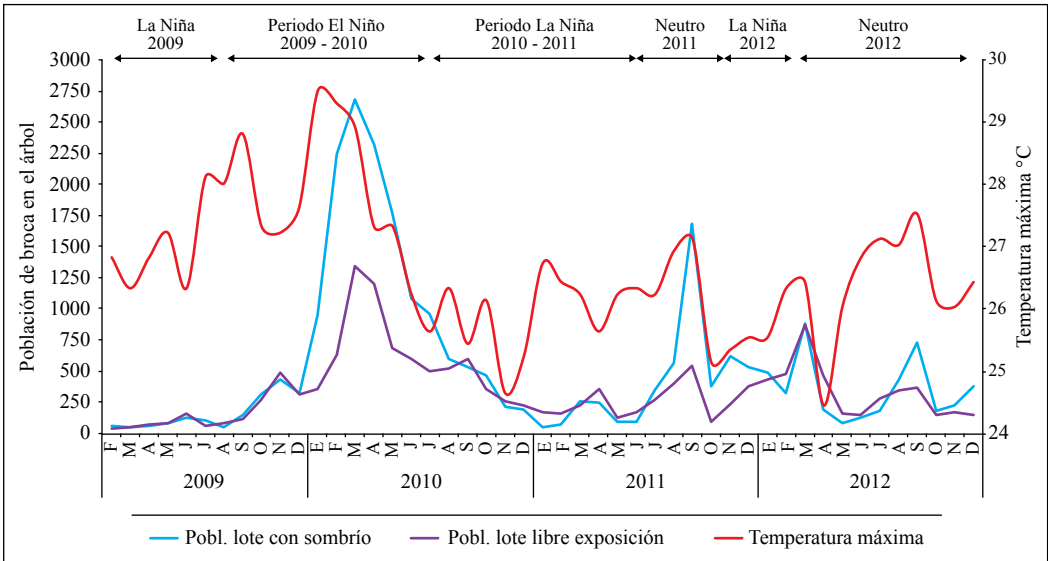
En estos tres meses con altas temperaturas a causa del fenómeno climático El Niño, el desarrollo de la broca fue mayor con altas densidades poblacionales de hasta 2.233, 2.674 y 2.310 brocas por árbol en el lote con sombrío y de 609, 1.326 y 1.187 brocas en el lote a libre exposición. Con



**Figura 4.** Registro mensual del número de capturas de broca con trampas de alcohol en el lote con sombrío, con relación al tamaño poblacional de la broca del café en el lote.



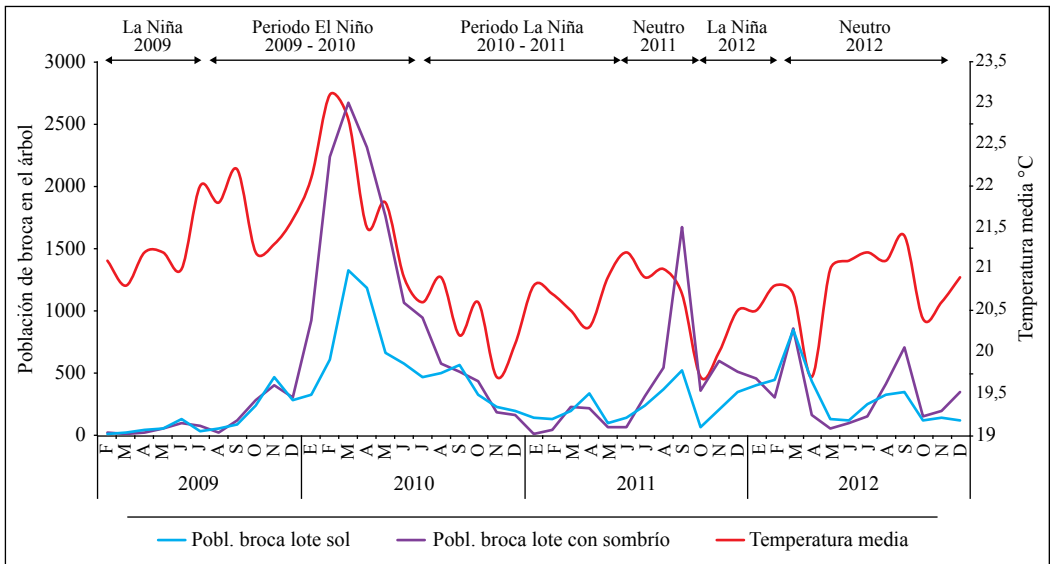
**Figura 5.** Número de brocas del café capturadas con trampas de alcohol y su relación con la densidad poblacional en el lote.



**Figura 6.** Registros de la temperatura máxima y la dinámica poblacional de la broca del café, en dos sistemas de producción a través del tiempo, bajo tres condiciones climáticas.

altas temperaturas, el desarrollo generacional del insecto se acelera, lo cual produce altas densidades de la población del insecto en corto tiempo. Las lluvias intermitentes y pequeñas que se produjeron durante estos períodos secos, estimularon la emergencia de las brocas que quedaron en los frutos del suelo de la cosecha principal del 2009, las cuales colonizaron y afectaron los frutos de

la cosecha de mitaca. Una vez la temperatura disminuyó en los meses de abril, mayo y junio, la población de broca también decreció (Figura 7). La temperatura máxima alcanzada durante el período El Niño 2009 y 2010 ha sido la más alta de los últimos 10 años, con temperaturas máximas de hasta 29,5°C, lo cual favoreció el desarrollo y crecimiento poblacional de la broca del café (Figura 6).

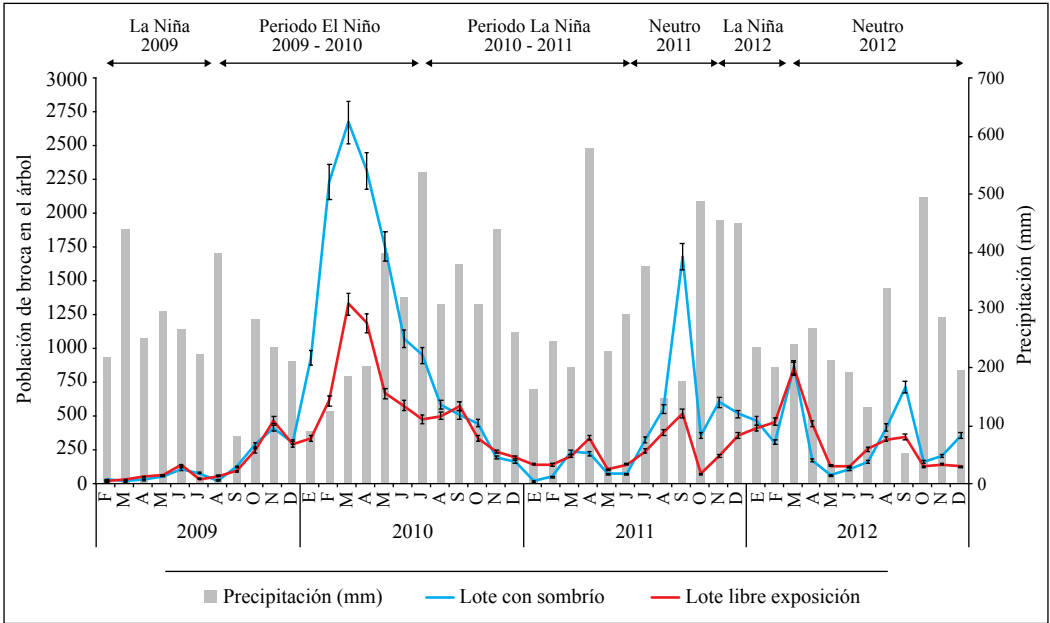


**Figura 7.** Registros de la temperatura media y la dinámica poblacional de la broca del café, en dos sistemas de producción a través del tiempo, bajo tres condiciones climáticas.

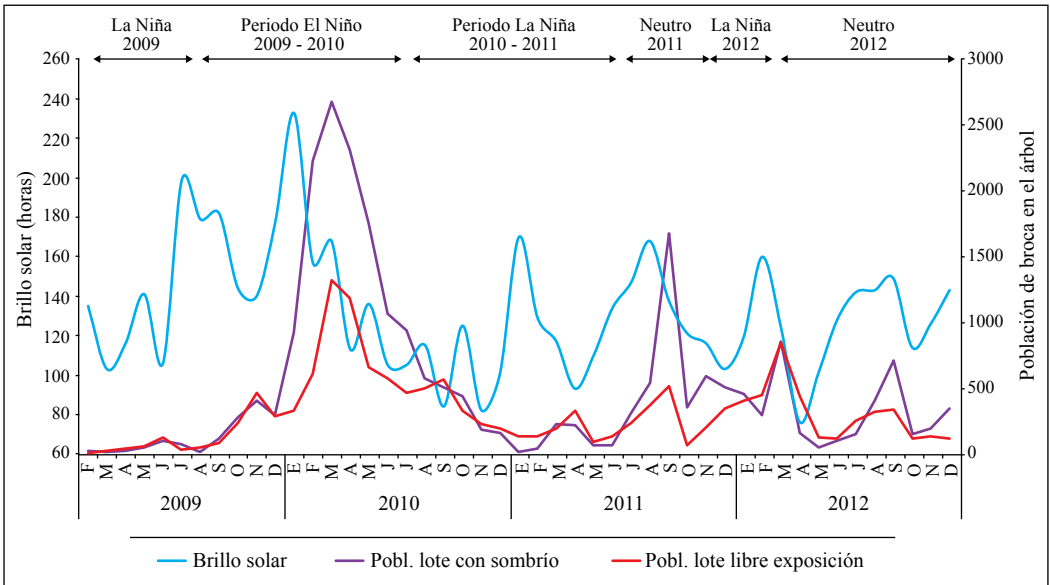
La condición climática La Niña, caracterizada con un incremento de las lluvias, tuvo un efecto sobre la densidad poblacional de la broca y el comportamiento de vuelo de los adultos. Las mayores poblaciones de broca se relacionaron con precipitaciones mensuales de menos de 200 mm, durante eventos El Niño con mayores temperaturas (Figura 8) y la llegada de las lluvias después de un período seco de dos meses estimuló los vuelos de broca.

La mayor actividad de vuelos de broca y la mayor infestación se presentaron en los períodos secos con mayor brillo solar. La broca del café es un organismo ectotermo y depende de la temperatura y la radiación solar para volar, en este caso existe una relación directa entre el brillo solar y las altas temperaturas producto de los períodos secos, donde la nubosidad es baja, con mayor cantidad de horas sol/día (Figura 9).

La mayoría de los insectos tienen una tasa de desarrollo gobernada principalmente por las temperaturas ambientales. Esto se mide por tiempo fisiológico, expresado en grados día, más que por tiempo calendario. Toda especie de insecto presenta una temperatura base o umbral inferior, bajo la cual no sigue desarrollándose. Así mismo, se da una temperatura base o umbral superior sobre la cual el desarrollo se frena. Para el caso de la broca del café se ha estimado en 16,6°C la temperatura base inferior y en 32°C la temperatura base superior (Ruiz, 1996; Jaramillo et al., 2011). Este rango térmico óptimo de temperatura tan amplio para la broca del café indica que este insecto puede adaptarse bien en todo el rango altitudinal favorable para el cultivo de café en Colombia. En los períodos de permanencia del fenómeno El Niño, las temperaturas medias mensuales, en la mayor parte de la zona Andina del país, registran aumentos entre 1,0 y 2,0°C por encima de los promedios históricos.



**Figura 8.** Registros de precipitación en (mm) con relación a la densidad poblacional de broca del café, en dos sistemas de producción a través del tiempo.



**Figura 9.** Registro del brillo solar y la dinámica poblacional de la broca en dos sistemas de producción de café.

El uso de grados días es una herramienta eficaz como modelo de predicción en la prevención de plagas y se ha aplicado en el campo para varias especies de insectos plaga, como la polilla de la manzana *Cydia pomonella* Linnaeus (Lepidoptera: Tortricidae), la polilla oriental de la fruta *Cydia molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae), la polilla del racimo de la uva *Lobesia botrana* (Den. & Schiff.) (Lepidoptera: Tortricidae), la mosca blanca de los invernaderos *Trialeurodes vaporariorum* Westwood (Hemiptera: Aleyrodidae), entre muchos otros (Estay, 2009). Hay varios métodos disponibles para la estimación de los grados día a temperaturas variables o de campo, a partir de las temperaturas extremas diarias (máximas y mínimas) y se basan en la relación lineal entre la temperatura y la tasa de desarrollo. El número de días que puede demorar en incubar un huevo, eclosionar una larva o emerger un adulto se obtiene mediante la acumulación de grados día, la cual se calcula restando a la temperatura media del día el valor de la temperatura del umbral inferior de la especie (Estay, 2009). Para el caso de la broca del café se tomó como referencia el estudio de Vargas (2006) realizado en el campo en la Estación Experimental Naranjal, a 1.381 m, donde determinó la constante térmica de desarrollo del insecto con una temperatura media de 21,4°C donde obtuvo un acumulado de 265°D y un ciclo de vida de 36 días de duración.

En el análisis realizado con los datos experimentales de la parcela de Variedad Castillo® orgánico las curvas de vuelo y desarrollo de la broca muestran una relación entre los grados-día calculados con un total de 262°D acumulados y la mayor población de broca capturada (23.645 adultos) con densidades de 2.674 brocas/árbol durante un período El Niño, en contraste con un período La Niña con 814 capturas y una densidad de 65,6 brocas

/árbol, en el lote con sombrío con un total de 182°D acumulados.

### **Colonización y dispersión de la broca del café en los lotes experimentales**

De acuerdo con los mapas de dispersión de la broca y la relación lineal entre la varianza y la media, para la variable porcentaje de frutos perforados por broca en cada lote, la dispersión del insecto se dio de manera agregada en los primeros seis meses del estudio, según la ley de poder de Taylor, mediante transformación de los datos el coeficiente de regresión lineal ( $\beta$ ) fue mayor que 1, según el estadístico de prueba t, al 5%.

Los mapas de cada parcela experimental muestran que el insecto coloniza primero los bordes de cada parcela, favorecida por las corrientes de aire. Una vez se establece la broca en el lote, de los árboles infestados se empieza a dispersar de árbol en árbol, formando pequeñas agregaciones en los bordes, para luego empezar a desplazarse gradualmente, formando agregaciones en el interior del lote durante los primeros cuatro meses. Después de la cuarta evaluación, los frutos perforados se distribuyeron en toda la superficie de la parcela, con ciertas áreas presentando agregaciones hasta finalmente colonizar más del 80% del lote (Figura 10).

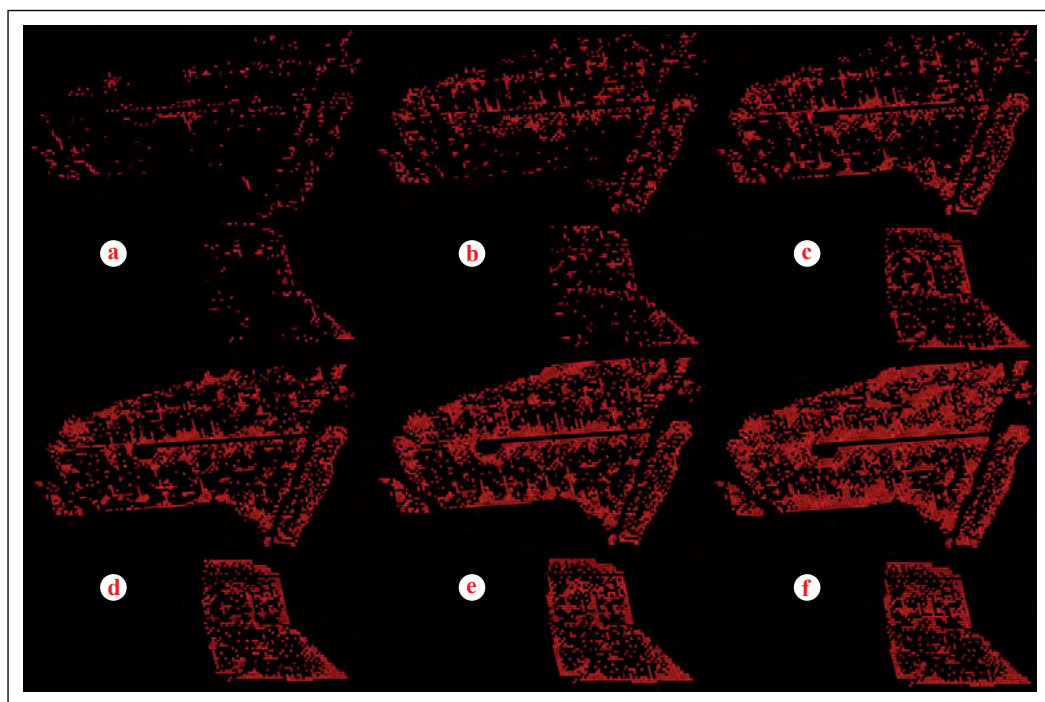
Para el manejo de la broca del café es necesario entender los modelos de dispersión del insecto, mirar la dinámica poblacional en su desarrollo en el tiempo y en el espacio, el cual está determinado por los factores que actúan en el organismo, en la población y en el medio ambiente. Estos factores incluyen: 1) la dinámica de dispersión o sea los movimientos dentro de la población y la migración; 2) la dinámica de densidad, entendida como la oscilación en la concentración de los individuos de

una población en el área; 3) la dinámica del crecimiento poblacional, es decir, la tasa de crecimiento o aumento de la población en el tiempo, descontando la mortalidad (Rabinovich, 1980; Southwood, 1978).

Los resultados de este estudio mostraron mayor densidad poblacional de la broca en cultivos de café con sombrero durante períodos climáticos El Niño y Neutro, casi el doble de lo obtenido en el lote a libre exposición solar. En contraste, con períodos climáticos La Niña, la broca del café no mostró diferencias significativas entre los dos sistemas de producción. Esto se debió al exceso de humedad en el suelo y a la descomposición rápida de los frutos sobremaduros y secos

en el árbol y en el suelo, que causan alta mortalidad de los estados biológicos de la broca. Es importante tener en cuenta que, aunque la broca es un insecto adaptado a las condiciones de sombra, según Bustillo (2006), no necesariamente es más abundante en estos ecosistemas, considerando que la producción de café bajo sombra es menor que a libre exposición solar. Además, a plena exposición solar el auto sombrero y la alta producción de las variedades comerciales a altas densidades de siembra, favorece el ataque por broca.

La dispersión de la broca del café se dio de manera agregada en los primeros seis meses del estudio según la ley de poder de Taylor y el estadístico de prueba t, al 5%.



**Figura 10.** Colonización y dispersión natural de la broca del café durante seis meses consecutivos. A. enero. B. febrero. C. marzo. D. abril. E. mayo. F. junio. La dispersión se inicia desde los bordes del lote y los caminos hacia el interior de la parcela de forma agregada.

El aumento poblacional de la broca del café en este estudio y para esta localidad estuvo relacionado con el evento climático El Niño caracterizado por temperaturas altas (> 21°C), baja humedad del suelo (< 30%), baja precipitación (< 200 mm), déficit hídrico de al menos dos meses continuos, alto brillo solar (230 h/mes) y un requerimiento de 260°C-día acumulados, comprobado con el conteo del número de estados biológicos de la broca dentro de los frutos de café infestados, el número de frutos brocados por rama y el número de ramas productivas por árbol.

Las capturas de adultos de broca en trampas de alcohol estuvieron fuertemente influenciadas por los fenómenos climáticos El Niño, con vuelos masivos posteriores a un aguacero fuerte después de un período seco prolongado de dos meses, con el mayor número de capturas (23.600 brocas) en el mes de abril, y muchas de esas capturas coincidieron en épocas donde

el número de frutos por árbol fue bajo en época de travesía.

Los resultados de este estudio mostraron que la broca del café es sensible a los cambios de temperatura ambiente y baja humedad, viéndose favorecida por temperaturas altas y por periodos prolongados de déficit hídrico durante periodos climáticos El Niño, aumentando su tasa de desarrollo en los frutos remanentes que quedan en el suelo y en el árbol después de las cosechas, lo que conlleva a mayores niveles de infestación y daño en los frutos de café de la siguiente cosecha.

Por consiguiente, los estudios de dinámica poblacional de una plaga en condiciones de campo son importantes para obtener la información necesaria acerca de los efectos del clima sobre el desarrollo de una especie clave o primaria como es el caso de la broca del café, para poder establecer sus riesgos, los métodos y el momento oportuno de su control.

## LITERATURA CITADA

- Agegehu, E., Thakur, A., & Muluaem, T. (2015). Potential Impact of Climate Change on Dynamics of Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei* Ferrari) in Ethiopia. *Open Access Library Journal*, 2(1), Article e1127. <https://doi.org/10.4236/oalib.1101127>
- Armbrecht, I., & Perfecto, I. (2001). Diversidad de artrópodos en los agroecosistemas cafeteros. *Revista Protección Vegetal*, 12 (2), 11–16.
- Atallah, S. S., Gómez, M. I., & Jaramillo, J. (2018). A Bioeconomic Model of Ecosystem Services Provision: Coffee Berry Borer and Shade-grown Coffee in Colombia. *Ecological Economics*, 144, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.002>
- Altieri, M. A., & Letourneau, D. K. (1982). Vegetation management and biological control in agroecosystems. *Crop Protection*, 1(4), 405–430. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(82\)90023-0](https://doi.org/10.1016/0261-2194(82)90023-0)
- Arcila, J., Jaramillo, A., Baldión, V., & Bustillo, A. E. (1993). La floración del café y su relación con el control de la broca. *Avances Técnicos Cenicafé*, 193, 1–6. <http://hdl.handle.net/10778/1044>
- Baker, P. S. (1984). Some aspects of the behavior of the coffee berry borer in relation to its control in southern Mexico (Coleoptera: Scolytidae). *Folia Entomológica Mexicana*, 61, 9–24.
- Baker, P. S. (1986, julio 21-26). Biología, ecología y hábitos de la broca. En N. Urbina (Ed.), *II Curso Regional sobre manejo integrado de plagas del café con énfasis en broca del fruto*. San Pedro Sula, Honduras. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A8541e/A8541e.pdf>
- Baker, P. S., Ley, C., Balbuena, R., & Barrera, J. F. (1992). Factors affecting the emergence of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) from coffee berries.







- Bulletin of Entomological Research*, 82(2), 145–150. <https://doi.org/10.1017/S000748530005166X>
- Bergamin, J. (1944). Sombreamiento e broca. *Revista do Departamento Nacional do Café*, 12(138), 1009–1014.
- Benavides Machado, P., Gil Palacio, Z. N., Constantino, 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 de Colombia (Ed.), *Manual del cafetero colombiano: investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 2, pp. 215–260). Cenicafe.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., & Somarriba, E. (1997). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*, 38(1-3), 139–164. <https://doi.org/10.1023/A:1005956528316>
- Borbón-Martínez, O. (1991). *La broca del fruto del café Hypothenemus hampei*, (Ferrari, 1867). Instituto del Café de Costa Rica.
- Bustillo, A. E., Cárdenas, R., Villalba, D. A., Benavides Machado, P., Orozco, J., Posada, F. J. (1998). *Manejo integrado de la broca del café Hypothenemus hampei (Ferrari) en Colombia*. Cenicafe. <http://hdl.handle.net/10778/848>
- Bustillo, A. E. (2002). El manejo de cafetales y su relación con el control de la broca del café en Colombia. *Boletín Técnico Cenicafe*, 24, 1–40. <http://hdl.handle.net/10778/579>
- Bustillo, A. E. (2006). Una revisión sobre la broca del café, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), en Colombia. *Revista Colombiana de Entomología*, 32(2), 101–116.
- Bustillo, A. E. (2008). Aspectos sobre la broca del café, *Hypothenemus hampei* en Colombia En A. E. Bustillo (Ed.), *Los insectos y su manejo en la caficultura colombiana* (pp. 388–418). Cenicafe.
- Cárdenas, R. (1988). *La broca del café Hypothenemus hampei* (Ferrari 1867). *Agronomía*, 2(2), 08–11.
- Cárdenas, R. (2000, octubre, 2-6). Trampas y atrayentes para monitoreo de poblaciones de broca del café. *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Col., Scolytidae). *XIX Simposio Latinoamericano de Caficultura*. San José, Costa Rica.
- Castaño, A., Benavides Machado, P., & Baker, P. S. (2005). Dispersión de *Hypothenemus hampei* en cafetales zoqueados. *Revista Cenicafe*, 56(2), 142–150. <http://hdl.handle.net/10778/147>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2019). *Anuario meteorológico cafetero 2018*. Cenicafe. <http://hdl.handle.net/10778/660>
- Chinguel, D. (2017). *Efecto de la sombra y variedad de café en la incidencia de la broca Hypothenemus hampei (Ferrari), en el distrito de Omia, Rodríguez de Mendoza – Amazonas*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. <http://repositorio.untrm.edu.pe/handle/UNTRM/1484>
- Constantino, L. M. (2010). La broca del café, un insecto que se desarrolla de acuerdo con la temperatura y la altitud. *Brocarta*, 39, 1–2. <https://www.cenicafe.org/es/publications/brc039.pdf>
- Constantino, L. M., Gil, Z., Jaramillo, A., Benavides, P., & Bustillo, A. (2011, julio 27–29). Efecto del cambio y la variabilidad climática en la dinámica de infestación de la broca del café, *Hypothenemus hampei* en la zona cafetera de Colombia. 38° Congreso Sociedad Colombiana de Entomología. Manizales, Colombia.
- Constantino, L. M., Oliveros, C., Benavides, P., Serna, C. A., Ramírez, C. A., Medina, R. & Arcila, A. (2017). Dispositivo recolector de frutos de café del suelo para el manejo integrado de la broca. *Revista Cenicafe*, 68(1), 22–37. <http://hdl.handle.net/10778/813>
- Decazy, B. (1990). Descripción, biología, ecología y control de la broca del fruto del cafeto, *Hypothenemus hampei* (Ferrari). En Federación Nacional de Cafeteros & Centro Nacional de Investigaciones de Café (Eds.), *50 años de Cenicafe 1938-1988. Conferencias conmemorativas* (pp. 133–139). Cenicafe.
- Estay, P. (2009). *Uso de grados día, eficaz herramienta en la prevención de plagas*. INIA.
- Eskes, A. B. (1982). The effect of light intensity on incomplete resistance of coffee to *Hemileia vastatrix*. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 88(5), 191–202. <https://doi.org/10.1007/BF02140882>
- Farfán, F., & Jaramillo, A. (2004). Efecto de la cobertura vegetal muerta y arbórea sobre la disponibilidad de agua en sistemas agroforestales con café. *Revista Cenicafe*, 59(1), 39–54. <http://hdl.handle.net/10778/162>
- Feliz-Matos, D. A. (2003). *Incidencia de la broca (Hypothenemus hampei Ferrari, 1867) y sus controladores naturales en plantas de café bajo diferentes tipos de sombra en San Marcos, Nicaragua*.

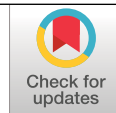
- [Tesis de Maestría, CATIE]. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0307e/A0307e.pdf>
- Feliz-Matos, D. A., Guharay, F., & Beer, J. (2004). Incidencia de la broca (*Hypothenemus hampei*) en plantas de café a pleno sol y bajo sombra de *Eugenia jambos* y *Gliricidia sepium* en San Marcos, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 41, 56–61. <http://hdl.handle.net/11554/6380>
- Giraldo, M. (2018). Efecto de la humedad relativa sobre la duración y sobrevivencia de *Hypothenemus hampei* en dieta artificial Cenibroca. *Revista Cenicafé*, 69(1), 32–39. <http://hdl.handle.net/10778/1090>
- Giraldo, M., García, A., & Parra, J.R. (2018). Biology, thermal requirements, and estimation of the number of generations of *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae) in the state of São Paulo, Brazil. *Journal of Economic Entomology*, 111(5), 2192–2200. <https://doi.org/10.1093/jee/toy162>
- Giraldo, A., Véliz, C., Arellano, G., & Sánchez, E. (2002). El uso de la Ley de Taylor en el establecimiento de patrones de variación espacio-temporal en poblaciones animales: dos ejemplos de aplicación. *Ecología Aplicada*, 1(1), 71–74. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v1i1-2.232>
- Jaramillo, A. (2005). La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica*). *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.*, 29(112), 371–382. [http://www.accefyn.com/revista/Vol\\_29/112/112\\_371\\_382.pdf](http://www.accefyn.com/revista/Vol_29/112/112_371_382.pdf)
- Jaramillo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/859>
- Jaramillo, J., Chabi-Olaye, A., Kamonjo, C., Jaramillo, A., Vega, F. E., Poehling, H.-M., & Borgemeister, C. (2009). Thermal Tolerance of the Coffee Berry Borer *Hypothenemus hampei*: Predictions of Climate Change Impact on a Tropical Insect Pest. *PLoS ONE*, 4(8), e6487. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006487>
- Jaramillo, J., Chabi-olay, A., & Borgemeister, C. (2010). Temperature-Dependent Development and Emergence Pattern of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) From Coffee Berries. *Journal of Economic Entomology*, 103(4), 1159–1165. <https://doi.org/10.1603/EC09408>
- Jaramillo, J., Muchugu, E., Vega, F. E., Davis, A., Borgemeister, C., & Chabi-Olaye, A. (2011). Some Like It Hot: The Influence and Implications of Climate Change on Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) and Coffee Production in East Africa. *PLoS ONE*, 6(9), e24528. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024528>
- Jaramillo, J., Setamou, M., Muchugu, E., Chabi-Olaye, A., Jaramillo, A., Mukabana, J., Maina, J., Gathara, S., & Borgemeister, C. (2013). Climate Change or Urbanization? Impacts on a Traditional Coffee Production System in East Africa over the Last 80 Years. *PLoS ONE*, 8(1), e51815. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051815>
- Johnson, M. D., Kellermann, J. L., & Stercho, A. M. (2010). Pest reduction services by birds in shade and sun coffee in Jamaica. *Animal Conservation*, 13(2), 140–147. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2009.00310.x>
- Julca, A., Carhuallanqui, R., Julca, N., Bello, S., Crespo, R., Echevarria, C., & Borjas, R. (2016). *Efecto de la sombra y la fertilización sobre las principales plagas del café var. "Catimor" en Villa Rica, Pasco, Perú*. Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/03/EfectoFencafe.pdf>
- Mariño, Y. A., Pérez, M., Gallardo, F., Trifilio, M., Cruz, M., & Bayman, P. (2016). Sun vs. Shade affects infestation, total population and sex ratio of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in Puerto Rico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 222, 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.12.031>
- Mathieu, F., Brun, L.O., Frerot, B., Suckling, M., & Frampton, C. (1999). Progression in field infestation is linked with trapping of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Entomology*, 123(9), 535–540. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0418.1999.00400.x>
- Mendesil, E., Jember, B., & Seyoum, E. (2004). Population dynamics and distribution of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Scolytidae) on *Coffea arabica* L. in Southwestern Ethiopia. *SINET: Ethiopian Journal of Science*, 27(2), 127–134. <https://doi.org/10.4314/sinet.v27i2.18240>
- Ortiz, A., Ortiz, A., Vega, F. E., & Posada, F. (2004). Volatile Composition of Coffee Berries at Different Stages of Ripeness and Their Possible Attraction to the Coffee Berry Borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(19), 5914–5918. <https://doi.org/10.1021/jf049537c>
- Perfecto, I., Rice, R. A., Greenberg, R., & Van der Voort, M. E. (1996). Shade Coffee: A Disappearing Refuge for Biodiversity: Shade coffee plantations can contain as much biodiversity as forest habitats. *BioScience*, 46(8), 598–608. <https://doi.org/10.2307/1312989>
- Perfecto, I., Vandermeer, J., Mas, A., & Pinto, L. S. (2005). Biodiversity, yield, and shade coffee certification.

- Ecological Economics*, 54(4), 435–446. <https://doi.org/10.1016/j.econ.2004.10.009>
- Posada, F. J., Bustillo, A. E., & Jiménez, M. (2003). Seguimiento y captura de brocas usando trampas en cafetales. *Cenicafé. Brocarta*, 35, 1–2. <https://www.cenicafe.org/es/publications/brc035.pdf>
- Rabinovich, J. (1980). *Introducción a la ecología de poblaciones animales*. Editorial continental.
- Ramírez, V. H., Gaitán, A., Benavides, P., Constantino, L. M., Gil, Z. N., Sadeghian, S., & González, H. (2014). Recomendaciones para la reducción del riesgo en la caficultura de Colombia ante un evento climático de El Niño. *Avances Técnicos Cenicafé*, 445, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/475>
- Ramírez, C., Daza, J., & Peña, A. (2015). Tendencia anual de los grados día café y los grados día broca en la región andina ecuatorial de Colombia. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 16(1), 51–63. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol16\\_num1\\_art:379](https://doi.org/10.21930/rcta.vol16_num1_art:379)
- Ruiz, R. (1996). *Efecto de la fenología del fruto del café sobre los parámetros de la tabla de vida de la broca del café; Hypothenemus hampei (Ferrari)*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Caldas].
- SAS Institute. (2014). *SAS® OnDemand for Academics: User's Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Soto, L., Perfecto, I., & Caballero-Nieto, J. (2002). Shade over coffee: Its effects on berry borer, leaf rust and spontaneous herbs in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 55(1), 37–45. <https://doi.org/10.1023/A:1020266709570>
- Southwood, T. R. (1978). *Ecological Methods: With Particular Reference to the Study of Insect Populations* (2a ed.). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1225-0>
- Teodoro, A., Klein, A.-M., & Tschardt, T. (2008). Environmentally mediated coffee pest densities in relation to agroforestry management, using hierarchical partitioning analyses. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 125(1), 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.12.004>
- Taylor, L. R. (1984). Assessing and Interpreting the Spatial Distributions of Insect Populations. *Annual Review of Entomology*, 29(1), 321–357. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.29.010184.001541>
- Vargas, B. I. (2006). *Evaluación de germoplasma de café etíope (Coffea arabica) por resistencia a Hypothenemus hampei (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) en campo en condiciones controladas*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Alvarado, V. (2018). Distribución espacial de Hypothenemus hampei Ferrari en agroecosistemas cafetaleros de la selva central del Perú. *Bosques Latitud Cero*, 8(1), 57–69. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/413>
- Wrigley, G. (1988). *Coffee*. Longman Scientific and Technical.
- Ziska, L. H., Bradley, B. A., Wallace, R. D., Barger, C. T., LaForest, J. H., Choudhury, R. A., Garrett, K. A., & Vega, F. E. (2018). Climate Change, Carbon Dioxide, and Pest Biology, Managing the Future: Coffee as a Case Study. *Agronomy*, 8(8), 152. <https://doi.org/10.3390/agronomy8080152>

# EFFECTO DE LAS TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE TUESTE EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CAFÉ

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

Osorio, V., Pabón, J., Gallego, C. P., & Echeverri, L. F. (2021). Efecto de las temperaturas y tiempos de tueste en la composición química del café. *Revista Cenicafé*, 72(1), e72103. <https://doi.org/10.38141/10778/72103>



En el proceso de tostación, el café es sometido a diferentes temperaturas y tiempos donde se producen diversos cambios químicos fundamentales en la constitución de los componentes responsables del aroma y el sabor característico del café. En esta investigación se evaluó el efecto de la interacción temperatura y tiempo de tueste en la calidad de seis variedades de *Coffea arabica* mejoradas. Se generaron cinco curvas de tueste, la curva base tuvo una temperatura inicial de 200°C, dos curvas con incrementos de temperatura a 215 y 230°C, y dos curvas con disminución de la temperatura a 185 y 170°C. Los tiempos finales de tueste se encontraron entre 8 y 12 minutos, definidos por el color del grano tostado 55-65 en la escala AGTRON/SCA. Empleando técnicas analíticas como la espectrofotometría de ultravioleta visible UV-VIS, cromatografía líquida de alta resolución – HPLC y cromatografía de gases CG, se determinó la composición química del café: lípidos, ácidos grasos, ácidos carboxílicos alifáticos, alcaloides, ácidos clorogénicos totales y azúcares. La interacción del tiempo de tueste y la variedad tuvo efecto en los lípidos, los ácidos acético, quínico, málico y cítrico, para los ácidos grasos oleico, palmítico y para la cafeína y trigonelina. Los ácidos clorogénicos totales no mostraron efecto de los tratamientos y se obtuvieron valores promedio entre 1,54% a 1,69%.

**Palabras clave:** Tostación, calidad, temperatura, HPLC, UV-VIS, cromatografía de gases.

## EFFECT OF ROASTING TEMPERATURES AND TIME ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF COFFEE

During the roasting process, coffee is subjected to different temperatures and times, which produces diverse fundamental chemical changes in the structure of the compounds responsible for the aroma and characteristic flavor of coffee. In this research, the effect of the interaction between roasting temperature and time on the quality of six varieties of improved *Coffea arabica* was evaluated. Five roasting curves were generated, the base curve had an initial temperature of 200°C, two curves had temperature increases at 215°C and 230°C, and two curves had temperature decreases at 185°C and 170°C. The final roasting times were found between 8 and 12 minutes and were defined by the roasted bean color 55-65 on the AGTRON/SCA scale. Analytical techniques such as UV-VIS spectrophotometry, high performance liquid chromatography - HPLC and GC gas chromatography were used to determine the chemical composition of coffee: lipids, fatty acids, aliphatic carboxylic acids, alkaloids, total chlorogenic acids and sugars. The interaction of roasting time and variety had an effect on lipids, acetic, quinic, malic and citric acids, oleic and palmitic fatty acids, caffeine and trigonelline. Total chlorogenic acids showed no effect of the treatments and average values between 1.54% and 1.69% were obtained.

**Keywords:** roasting, quality, temperature, HPLC, UV-VIS, gas chromatography.

\* Investigador Científico I. 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/0000-0002-9866-6147>, respectivamente.



La calidad de la bebida de café está relacionada con la composición química de los granos tostados, que a su vez está influenciada por los componentes del café almendra (Vitorino et al., 2001), la cual depende de la variedad, el origen, el clima y los procesos poscosecha. El café almendra no posee el olor característico del café y para generarlo debe someterse a temperaturas que varían entre 100 y 200°C. Durante este proceso, denominado tostación, los granos aumentan en volumen (50%-80%), se produce una pérdida de peso del 11% al 20%, su estructura se vuelve frágil y se desarrolla el color marrón (Belitz & Grosch, 2009).

Durante el tostado se distinguen cuatro fases principales: secado, desarrollo, descomposición y tostado completo. Los cambios iniciales se producen cercanos a 50°C cuando las proteínas se desnaturalizan y el agua se evapora. El tostado se produce por encima de 100°C debido a la pirólisis de los compuestos orgánicos; alrededor de los 150°C se produce una liberación de productos volátiles que generan un aumento del volumen. La fase de descomposición, comienza en 180-200°C, se reconoce por el estallido del grano o crepitación y la liberación del aroma del café. Por último, con una caramelización óptima, se logra la fase de tostado completo, durante la cual el contenido de humedad de los granos desciende entre 1,5% al 3,5% (Belitz & Grosch, 2009).

La tostación es una operación que genera cambios físicos, químicos y sensoriales (Nakilcioğlu-Taş & Ötleş, 2019). Las variables más comunes para su control son: el tiempo, la pérdida de peso y las diversas mediciones de color como la luminosidad y la escala Agtron (Dias & Benassi, 2015). El grado de tueste es un importante parámetro para evaluar la calidad del producto final, aunque aún no hay consenso sobre la relación entre los parámetros para controlar el proceso y los indicadores

de color, lo que hace difícil la comparación de datos (Dias & Benassi, 2015).

El tueste implica un cambio completo del contenido químico del café (De Luca et al., 2016), se desarrollan diversas reacciones entre los componentes del grano, los polisacáridos disminuyen, la sacarosa se degrada, las proteínas disminuyen, los lípidos y la cafeína permanecen cercanos a su proporción inicial, la trigonelina y los ácidos clorogénicos disminuyen, los ácidos y las cenizas aumentan y las melanoidinas se crean (Puerta, 2011). Las diferencias en las concentraciones de precursores de aromas como las proteínas, carbohidratos y ácidos clorogénicos en el café verde de la misma variedad, corresponde a diferentes calidades después del tostado (Franca et al., 2005).

La expresión de la calidad sensorial depende considerablemente del proceso de tostación, según las diferentes combinaciones de temperaturas y tiempos que se puedan dar, con una misma materia prima, la bebida de café resultante será diferente desde el punto de vista fisicoquímico y sensorial. Estos cambios normalmente están asociados al grado de tueste, que es una importante medida para evaluar la calidad del producto final, pero aún hoy no existe consenso sobre los parámetros para controlar durante el proceso: tiempo, temperatura, pérdida de peso y los parámetros de color, lo que hace difícil la generación de procedimientos estándar. Los estudios que muestran diferencias tanto en las características físicas como químicas de las muestras de café, están influenciados por el nivel de tueste.

La acidez del café ha sido reconocida como uno de los principales atributos de calidad y se genera en cierta medida por los ácidos carboxílicos alifáticos. El café verde de la especie arábica contiene el 0,5% de ácido cítrico, el 0,5% de ácido málico, el 0,2% de

ácido oxálico y el 0,4% de ácido tartárico (Clarke & Macrae, 1985). La formación de los ácidos alifáticos, pequeños en cantidad, del orden del 1,5%-2,5%, dependen del nivel de tueste (Clarke & Vitzthum, 2001). Gloess et al. (2014) reportan que el contenido total de los ácidos orgánicos permanece más o menos constante en los grados de tueste ligero a medio y cambia de un grado de tueste medio a un grado de tueste oscuro. El contenido de ácido quínico y láctico aumenta con un grado de tueste más oscuro, así como la disminución del ácido cítrico, málico y fórmico.

Con respecto a los ácidos clorogénicos (CGA), este proceso provoca una degradación asociada con la formación de nuevos antioxidantes como los productos de la reacción de Maillard (Budryn et al., 2015). El principal representante de los CGA es el ácido 5-cafeoilquínico (5-CQA), contribuye a la calidad, pero existe una amplia variación en el contenido para los cafés con un grado de tuestado similar (Zanin et al., 2016). El contenido total de CGA puede variar según la especie, el grado de maduración, las prácticas agrícolas, el clima y el suelo (Bauer et al., 2018). Según lo reportado por Budryn et al., 2015, la elevación de la temperatura de tueste por encima de 203°C da lugar a una mayor degradación de los CQA (37%-54%) incluso cuando se utilizan tiempos más cortos. La alta correlación entre la degradación del 5-O-CQA y la disminución de la coordenada de color L\*, sugiere que los productos de la degradación de este compuesto están fuertemente involucrados en la formación de pigmentos oscuros.

La cafeína es estable al tostarse, pero una pequeña parte se pierde por sublimación (Bauer et al., 2018). La trigonelina está presente en el café verde hasta un 0,6% y se descompone en un 50% durante la torrefacción (Belitz & Grosch, 2009), de acuerdo con Clarke y Macrae (1985) debe esperarse una degradación del 50%

al 80%, dependiendo tanto del tiempo como de la temperatura de tuestado. El contenido restante es de alrededor del 50% en un tuestado claro, con trazas en un tuestado muy oscuro (Illy & Viani, 2005).

Durante el tueste, una proporción de los polisacáridos se degrada en fragmentos que son solubles. La sacarosa presente en el café almendra se descompone hasta concentraciones de 0,4%-2,8% (Belitz & Grosch, 2009). De los monosacáridos y disacáridos, tras el tuestado sólo quedan trazas de azúcares libres. La sacarosa es parcialmente hidrolizada, el resto es caramelizado. A partir de los azúcares reductores se forman volátiles y no volátiles (melanoidinas) por la reacción de Maillard y, en menor medida, por caramelización (De Maria et al., 1996; Illy & Viani, 2005).

Las melanoidinas responsables del color oscuro en el café, que se originan de las reacciones de Maillard o de la caramelización de los carbohidratos, dependen no solo de la composición del café verde, sino también de la dinámica de la generación de nuevos compuestos en el proceso, razón por la cual los mecanismos de su formación aún no han sido dilucidados completamente. En este proceso se genera la destrucción de carbohidratos, ácidos clorogénicos, trigonelina y aminoácidos, y esos cambios son cada vez más evidentes al aumentar el punto final de tueste asociado a colores más oscuros del grano.

Dependiendo de las diferentes combinaciones de temperatura y tiempo del proceso e iniciando de una misma materia prima, la bebida de café resultante será diferente desde el punto de vista físico, químico y sensorial. Por lo anteriormente descrito se evaluó el efecto de la interacción temperatura y tiempo de tueste en la composición química final de diferentes variedades mejoradas de café determinando su comportamiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El efecto de las temperaturas y los tiempos de tueste se evaluaron en seis variedades de *C. arabica* mejoradas: Cenicafé 1, Castillo® General, Castillo® Naranjal, Castillo® Pueblo Bello, Castillo® El Tambo y Tabi. Para cada variedad, de manera individual y durante la cosecha principal, se hizo una recolección selectiva asegurando un porcentaje de frutos verdes inferior al 2,5%, despulpado en un tiempo inferior a 6 horas después de la recolección, fermentación espontánea con estimación del tiempo de lavado asociado al uso del Fermaestro™, con secado mecánico hasta alcanzar un porcentaje de humedad entre el 10% y el 11,5%. Se realizó la trilla de café y una selección de la almendra sana, eliminando los defectos físicos. El café utilizado para los tratamientos fue el retenido por encima de la malla número 16/64.

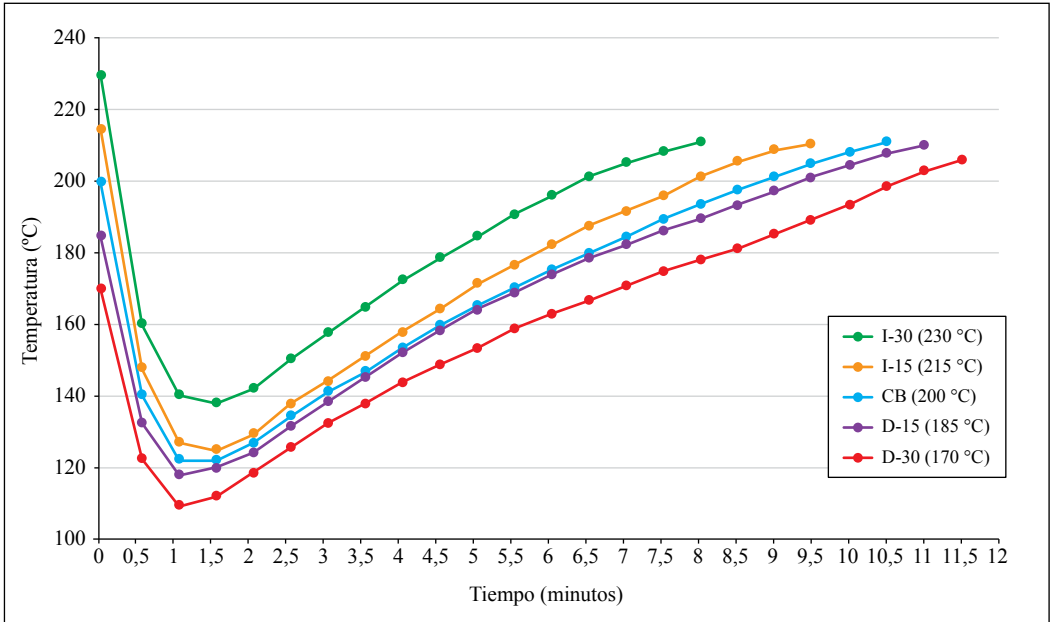
Se estableció un diseño completamente aleatorio en arreglo factorial. De cada variedad se tomaron cinco unidades experimentales de 25 kg, cada una dividida en cinco unidades de trabajo de 5 kg, a cada unidad se le aplicaron los tratamientos, variando la temperatura inicial de tueste.

Se generaron cinco curvas de tueste por variedad, la curva base tuvo como temperatura inicial 200°C (CB), dos curvas con incrementos de temperatura a 215°C (I-15) y 230°C (I-30), y dos curvas con disminución de la temperatura de la curva base de tostación a 185°C (D-15) y 170°C (D-30). El café fue procesado en una tostadora Probatone 5 (Probat, Alemania). Los tiempos de tueste se encontraron entre 8 y 12 minutos, y el tiempo final de tueste fue definido por el color del grano 55-65 en la escala AGTRON/SCA para tostado. En la Figura 1 se muestran las curvas tipo utilizadas para cada variedad.

Para el análisis sensorial de la calidad del café se utilizó el protocolo de la *Specialty Coffee Association* (SCA, 2000), con cinco catadores certificados Q-Grader por el CQI (*Coffee Quality Institute*), pertenecientes al panel sensorial del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) y a diferentes empresas del gremio, obteniendo un solo resultado promedio por cada muestra analizada.

Al café tostado se le determinaron las concentraciones de lípidos, ácidos grasos como son: araquídico, esteárico, linoleico, oleico y palmítico; la composición de ácidos alifáticos carboxílicos como los ácidos acético, cítrico, fórmico, láctico, málico, oxálico, quínico, succínico y/o glicólico; ácidos clorogénicos totales, cafeína, trigonelina, teobromina, fructosa y sacarosa. Se utilizaron metodologías estandarizadas de química analítica para cada uno de los componentes.

Los ácidos clorogénicos totales se determinaron cuantitativamente por medio de espectrofotometría de UV-VIS, mediante la absorción ultravioleta a longitudes de onda cercanas a 265, 328 y 380 nm (Beckman DU-650). Para la cuantificación de la fracción lipídica se utilizó la extracción por soxhlet según el método de análisis AOAC 945.16. Para los azúcares, alcaloides como la cafeína, trigonelina y teobromina, y los ácidos carboxílicos se utilizó cromatografía líquida de alta resolución-HPLC (Waters 600E); en el caso de los alcaloides y los ácidos alifáticos se utilizó un detector de arreglo de diodos (PDA 996, por sus siglas en inglés), para los azúcares se utilizó un cromatógrafo líquido de alta resolución - HPLC (Alliance 2690) acoplado a un detector de índice de refracción (IR-2410). Para los ácidos grasos, la fracción lipídica fue esterificada y analizada por cromatografía de gases con detector de masas (HP-6890 - MSD 5893) siguiendo el método de análisis AOAC 969.33.



**Figura 1.** Curvas de tueste.

Se estimaron los promedios y la desviación estándar de los compuestos químicos, se realizó el análisis de varianza para evaluar el efecto de las cinco curvas de tueste y la variedad en cada una de las variables de la composición química y se evaluó la correlación de estas con la calidad sensorial del café expresada como puntaje total SCA (*Specialty Coffee Association*).

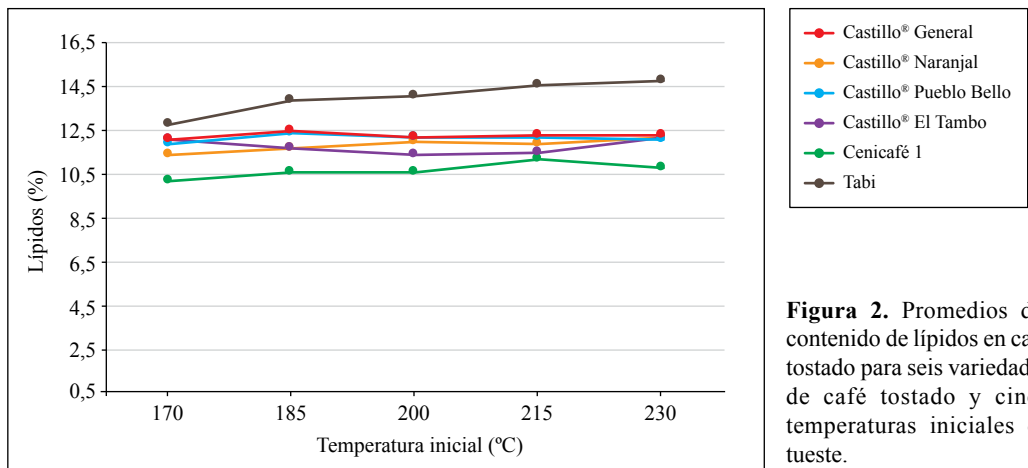
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta investigación se evaluó el efecto de diferentes curvas de tueste (combinación tiempo y temperatura) en la composición química y en la calidad sensorial del café. Aunque se generaron diferentes curvas, el grado de tueste final para todas las variedades y en todos los tratamientos fue uno solo y fue definido por el color del grano 55-65 en la escala AGTRON/SCA asegurando el desarrollo completo del grano.

**Lípidos.** El análisis de varianza del diseño completamente aleatorio en arreglo factorial presentó efecto significativo en la interacción variedad y temperatura inicial de tueste para el contenido de lípidos en el café tostado. El contenido de los lípidos en el café tiene un impacto importante en la calidad final del producto, por la formación de productos de oxidación a lo largo del tiempo (Ortolá et al., 1998). En la Figura 2 se presentan los valores promedios por variedad y temperatura. La variedad Tabi obtuvo mayores valores, presentando su máxima concentración en la temperatura de 230°C, lo anterior difiere de lo encontrado por Puerta y Echeverri (2019), donde al aumentar la temperatura inicial disminuyó la cantidad de lípidos con un valor de 11,4% en el tratamiento con temperatura de tueste inicial y final de 210-185°C.

Los valores mínimos para el contenido de lípidos para todas las variedades, a excepción





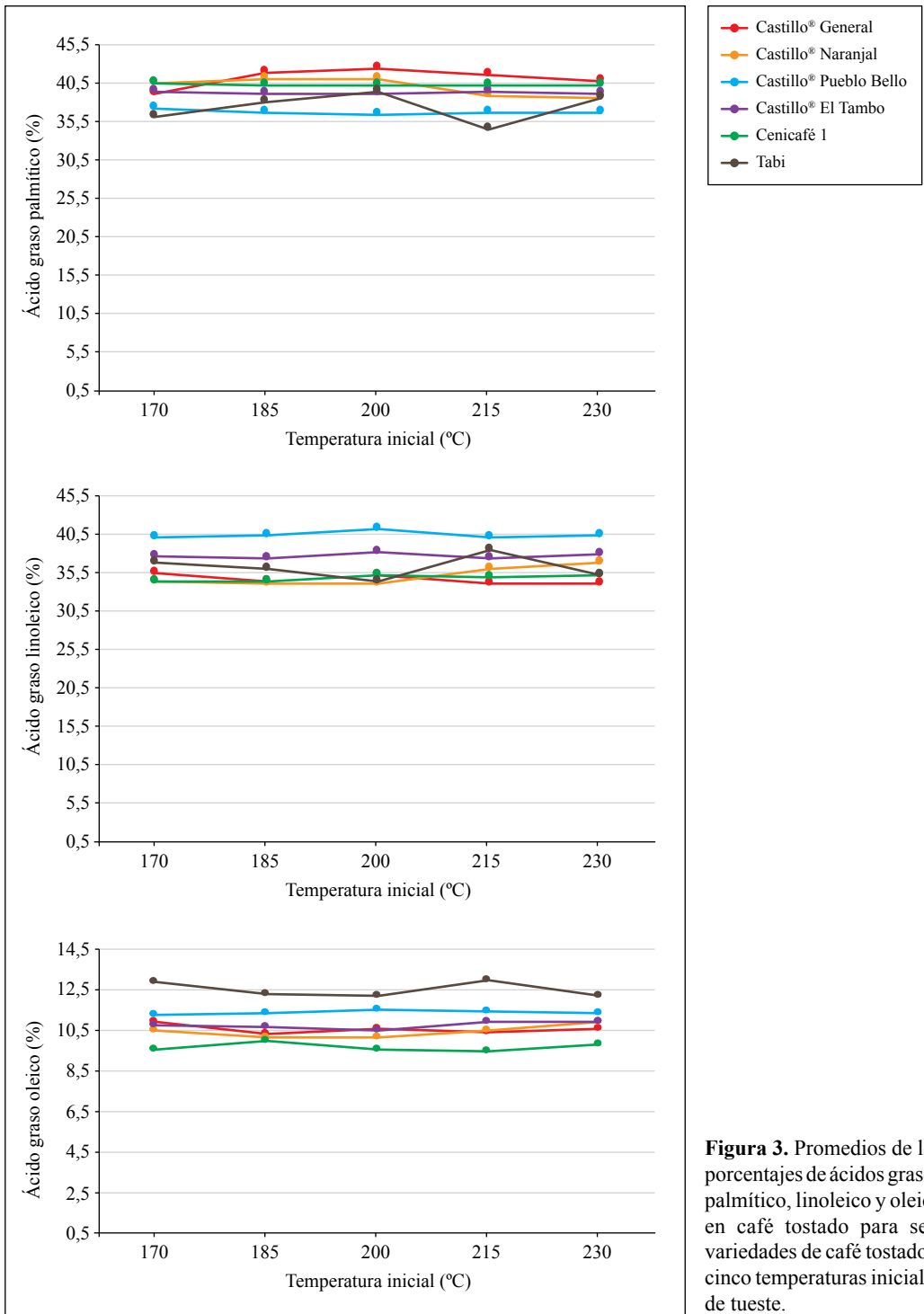
**Figura 2.** Promedios del contenido de lípidos en café tostado para seis variedades de café tostado y cinco temperaturas iniciales de tueste.

de Castillo® El Tambo, se encontraron en el tratamiento D-30, mientras que para esta variedad se encontró en la CB. Los valores máximos de lípidos de las variedades Castillo® Pueblo Bello y Castillo® General se observaron en el tratamiento D-15, para Cenicafé 1 en el tratamiento I-15 y en el tratamiento I-30 se encontraron los valores máximos de las variedades Castillo® Naranjal, Castillo® El Tambo y Tabi.

**Ácidos grasos.** Entre los ácidos grasos presentes en el café, el ácido linoleico es el ácido graso predominante, seguido por el ácido palmítico. Las ceras del café almendra, junto con los ésteres de hidroxitriptamida de diversos ácidos grasos (araquídico, behénico y lignocérico) se originan en el epicarpio del fruto y representan entre el 0,06% y el 0,10% del café normalmente tostado (Belitz & Grosch, 2009). Para los valores promedios de ácidos grasos por tratamiento, se encontró que el ácido palmítico fue el predominante seguido por los ácidos linoleico, oleico, esteárico y araquídico. El análisis de varianza presentó efecto significativo en la interacción variedad y temperatura inicial de tueste para la fracción de ácidos grasos palmítico, linoleico y oleico en el café tostado (Figura 3). La variedad Castillo® General presentó el mayor porcentaje de ácido

palmítico en el tratamiento denominado curva base (CB), con 42,61%. La mayor proporción de ácido graso linoleico se presentó en la variedad Castillo® Pueblo Bello en todos los tratamientos y el máximo de 41,13% se observó en la curva base CB. Para el ácido graso oleico los máximos se presentaron en la variedad Tabi en todos los tratamientos y el máximo de 12,94% se observó en el tratamiento I-15.

En muestras de café verde de 12 genotipos, recolectadas en cinco localidades de Colombia, en la cosecha principal del año 2006, Villarreal et al. (2012) encontraron la siguiente composición de ácidos grasos: linoleico 39,0%, palmítico 37,0%, oleico 8,7%, esteárico 8,1% y araquídico 3,2%. Por su parte, Puerta y Echeverri (2019) encontraron la siguiente composición en café tostado proveniente de fermentaciones sumergidas: palmítico 38,35%, linoleico 33,71%, oleico 10,66%, esteárico 8,86% y araquídico 4,40%. Clarke & Macrae (1985) reportan que no existen diferencias significativas en la composición total de ácidos grasos generados por el proceso de tostado. En este estudio, los ácidos grasos no mostraron efecto por los cambios en la temperatura inicial de tueste, pero sí por la variedad y por su



**Figura 3.** Promedios de los porcentajes de ácidos grasos palmítico, linoleico y oleico en café tostado para seis variedades de café tostado y cinco temperaturas iniciales de tueste.

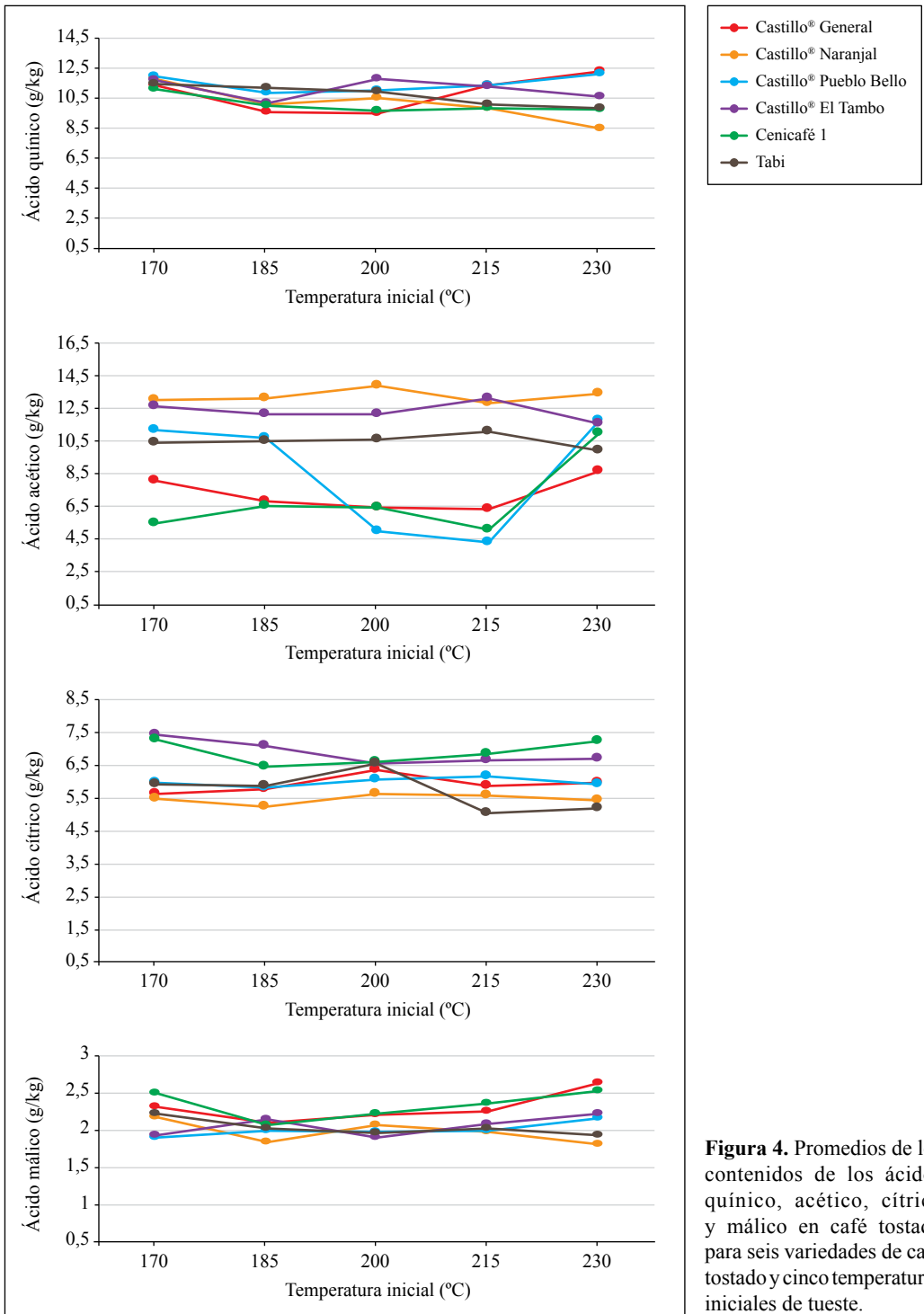
interacción con la temperatura. El ácido graso esteárico presentó efecto por la variedad, según prueba de Tukey al 5%. La variedad Cenicafé 1 presentó la máxima proporción de ácidos grasos con un valor de 9,69%.

**Ácidos carboxílicos alifáticos.** La acidez percibida de la bebida de café en el análisis sensorial es característica y buscada en los cafés suaves lavados, pues contribuye a la vivacidad del café, al dulzor y al carácter de la bebida. Los tipos de ácidos que se encuentran en el café son ácidos carboxílicos alifáticos junto con los ácidos clorogénicos. La mayoría de los ácidos carboxílicos alifáticos presentes en el café verde se comportan como los ácidos clorogénicos, se descomponen parcialmente durante el tueste, un ejemplo es el ácido cítrico que forma ácidos como el succínico (Scholz-Bottcher et al., 1991). Un gran número de ácidos se generan por la reacción de Maillard, los más destacados son los ácidos fórmico y acético, y su contenido alcanza un máximo en el tostado medio; en el tostado más oscuro la volatilización prevalece sobre la formación (Illy & Viani, 2005). El contenido de ácidos acético, fórmico, málico, cítrico y láctico en la bebida, junto con los ácidos quínico y clorogénicos son menores cuando se utiliza café tostado oscuro, en el que han desaparecido en gran medida (Clifford & Willson, 1985).

El análisis de varianza presentó efecto significativo en la interacción variedad y temperatura inicial de tueste para los ácidos quínico, acético, cítrico y málico en el café tostado (Figura 4). La variedad Castillo® General en el tratamiento I-30 tuvo la máxima concentración de ácido quínico con 12,31 g kg<sup>-1</sup>, contrario a la variedad Castillo® Naranjal que presentó un valor de 8,5 g kg<sup>-1</sup>, en este mismo tratamiento. La variedad Castillo® Naranjal tuvo el máximo contenido de ácido acético en la CB con 13,88 g kg<sup>-1</sup> y la Castillo® Pueblo Bello, en el tratamiento I-15, con un valor de 4,23 g kg<sup>-1</sup>. La variedad Cenicafé 1 presentó valores similares de ácido cítrico en los tratamientos D-30 e I-30 con contenidos de 7,24 y 7,23 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, la máxima concentración de este ácido se encontró en la variedad Castillo® El Tambo, en el tratamiento D-30, con 7,41 g kg<sup>-1</sup>. Para el ácido málico, la variedad Castillo® Naranjal presentó el contenido mínimo en el tratamiento I-30 y el máximo en el tratamiento D-30 con valores de 1,80 y 2,17 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente; en este ácido la variedad Cenicafé 1 desde el tratamiento D-15 hasta el tratamiento I-30 presenta incrementos de la concentración iniciando en 2,06 g kg<sup>-1</sup> hasta llegar a su máximo de 2,52 g kg<sup>-1</sup>.

**Tabla 2.** Valores promedio y desviación estándar (D.E.) del ácido graso esteárico para cada variedad.

Variedad	Promedio (%)		D.E.
Cenicafé 1	9,6927	A	0,1971
Castillo® Naranjal	9,4023	BA	0,2694
Castillo® General	9,0409	BC	0,9407
Tabi	8,9335	C	0,7702
Castillo® El Tambo	7,8816	D	0,3719
Castillo® Pueblo Bello	7,3441	E	0,2012



**Figura 4.** Promedios de los contenidos de los ácidos quínico, acético, cítrico y málico en café tostado para seis variedades de café tostado y cinco temperaturas iniciales de tueste.

Para los ácidos succínico y oxálico la interacción no es significativa, pero sí presentaron efecto por la variedad según la prueba de Tukey al 5% (Tablas 3 y 4). La variedad Castillo® Pueblo Bello presentó el valor máximo de ácido succínico y la variedad Cenicafé 1 de ácido oxálico.

El ácido oxálico presentó efecto por la temperatura, según una prueba de contraste al 5%; se evidenció una tendencia lineal negativa, alcanzando un valor mínimo de 0,043 g kg<sup>-1</sup> en el tratamiento I-30 (Figura 5).

Los ácidos cítrico, málico, acético, láctico y pirúvico son los más reportados por la mayoría de trabajos, puesto que

están presentes en cantidades significativas (Clarke & Vitzthum, 2001). La formación de los diferentes ácidos alifáticos depende del nivel de tueste y probablemente de la mezcla, y se asocia necesariamente con cambios de la composición. La sacarosa es el principal precursor en los granos verdes de los ácidos acético, fórmico, láctico, glicólico y otros derivados de los carbohidratos.

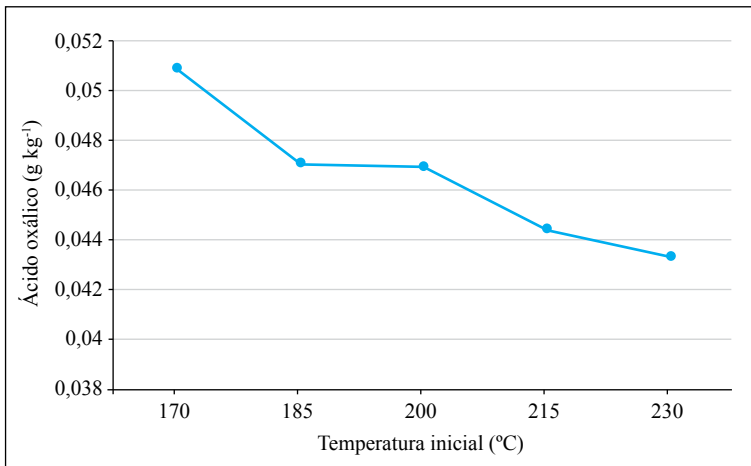
**Alcaloides.** Dentro de los alcaloides se encuentra la cafeína y su contenido en el café verde varía ampliamente, siendo las diferencias de especies el factor más importante. La cafeína es inolora, pero tiene un marcado sabor amargo. Se han realizado varios intentos para correlacionar las características sensoriales del

**Tabla 3.** Valores promedio y desviación estándar (D.E.) del ácido succínico por variedad.

Variedad	Promedio (g kg <sup>-1</sup> )		D.E.
Castillo® Pueblo Bello	14,03	A	1,64
Tabi	11,15	B	1,83
Castillo® El Tambo	9,86	C	1,02
Castillo® General	8,86	DC	1,05
Castillo® Naranjal	8,84	DC	0,52
Cenicafé 1	7,87	D	1,18

**Tabla 4.** Valores promedio y desviación estándar (D.E.) del ácido oxálico por variedad.

Variedad	Promedio (g kg <sup>-1</sup> )		D.E.
Cenicafé 1	0,0542	A	0,0053
Castillo® General	0,0515	BA	0,0062
Castillo® Naranjal	0,0467	BC	0,0068
Castillo® El Tambo	0,0455	C	0,0046
Castillo® Pueblo Bello	0,0440	C	0,0075
Tabi	0,0377	D	0,0059



**Figura 5.** Promedios de contenido del ácido oxálico por temperatura inicial de tueste

amargo del café con su contenido de cafeína, pero con poco éxito (Clarke & Macrae, 1985). De hecho, se ha demostrado que la cafeína contribuye sólo en una proporción relativamente pequeña (10%) del amargor percibido.

El análisis de varianza presentó efecto significativo en la interacción variedad y temperatura inicial de tueste para la cafeína y la trigonelina en el café tostado (Figura 6). La variedad Castillo® Pueblo Bello presentó las máximas concentraciones de cafeína en todos los tratamientos, pero el máximo contenido se observó en el tratamiento D-30, con un valor de 1,557%. Por el contrario, la variedad Cenicafé 1 evidenció los menores contenidos de todas las variedades evaluadas, con incrementos desde el tratamiento D-30 hasta I-30, con valores desde 1,258% hasta 1,318%, respectivamente.

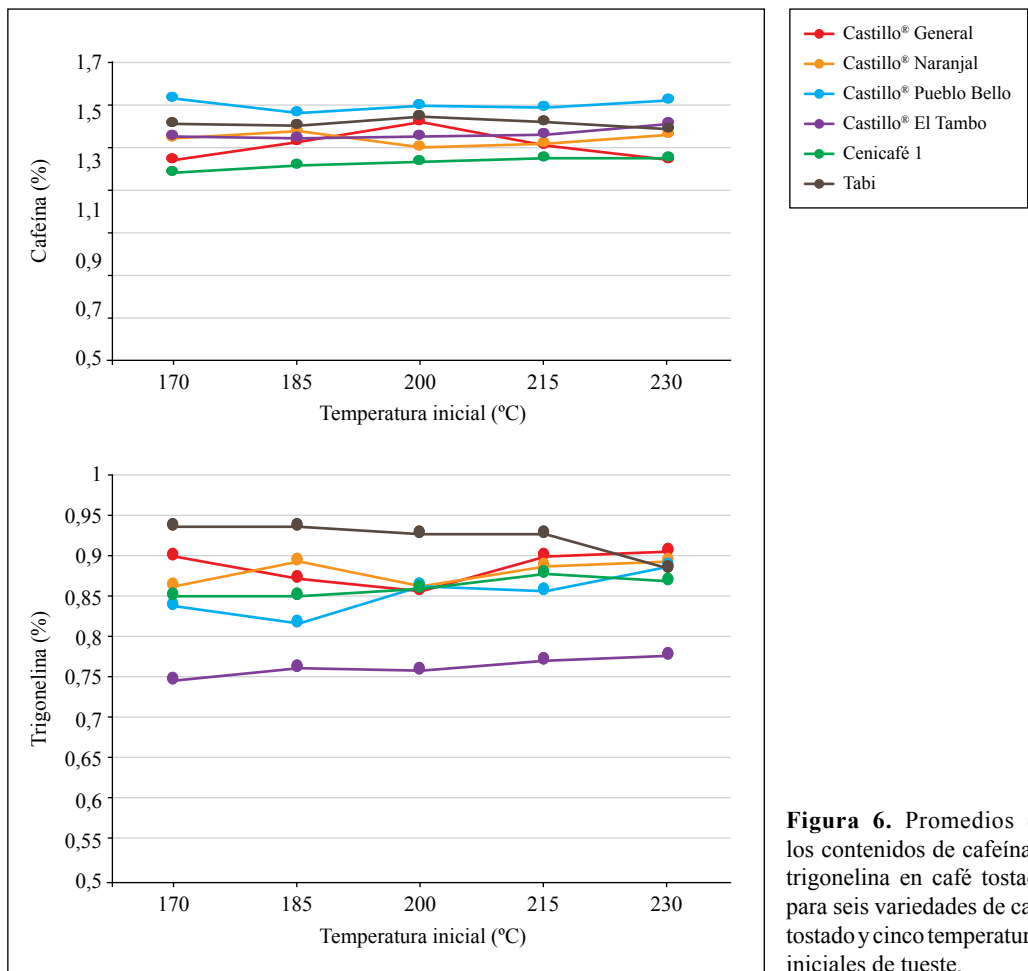
La variedad Tabi presentó las mayores concentraciones de trigonelina, exceptuando el tratamiento I-30, con un valor mínimo de 0,883%. De otro lado, la variedad Castillo® El Tambo presentó las menores concentraciones y el valor máximo de este alcaloide, en el tratamiento I-30 con 0,7761%. La trigonelina tiene poca influencia directa en la calidad de

la bebida de café, con un sabor amargo débil, aproximadamente una cuarta parte de la cafeína, sin embargo, en su degradación térmica hay productos que hacen que su presencia en el café sea importante.

Para la variable teobromina la interacción variedad y temperatura inicial de tueste no es significativa, pero sí hubo efecto por la variedad, según prueba de Tukey al 5% (Tabla 5).

Esta variable también presentó efecto por la temperatura, según una prueba de contraste al 5%; se evidenció una tendencia lineal positiva, alcanzando un valor máximo de 0,0629% en el tratamiento I-30 (Figura 7).

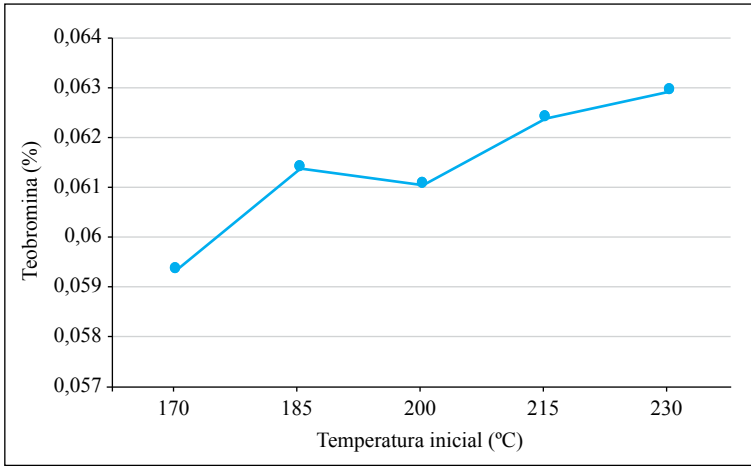
**Ácidos clorogénicos totales.** Se ha reportado que los granos de café poseen importantes cantidades de ácidos clorogénicos (CGA por sus siglas en inglés), los cuales tienen una marcada influencia en la calidad del café y contribuyen a su aroma y sabor (Chaves & Esquivel, 2019). Los CGA se destruyen en su mayor parte durante la torrefacción, aunque algunos ácidos clorogénicos intactos pueden estar unidos por melanoidinas. Se supone que la mayor parte de los ácidos clorogénicos se hidrolizan (Illy & Viani, 2005). El promedio



**Figura 6.** Promedios de los contenidos de cafeína y trigonelina en café tostado para seis variedades de café tostado y cinco temperaturas iniciales de tueste.

**Tabla 5.** Valores promedio y desviación estándar (D.E.) de la teobromina por variedad.

Variedad	Promedio (%)		D.E.
Tabi	0,0664	A	0,0045
Castillo® Pueblo Bello	0,0628	B	0,0027
Castillo® Naranjal	0,0610	CB	0,0036
Castillo® El Tambo	0,0609	CB	0,0038
Cenicafé 1	0,0598	CD	0,0030
Castillo® General	0,0575	D	0,0029



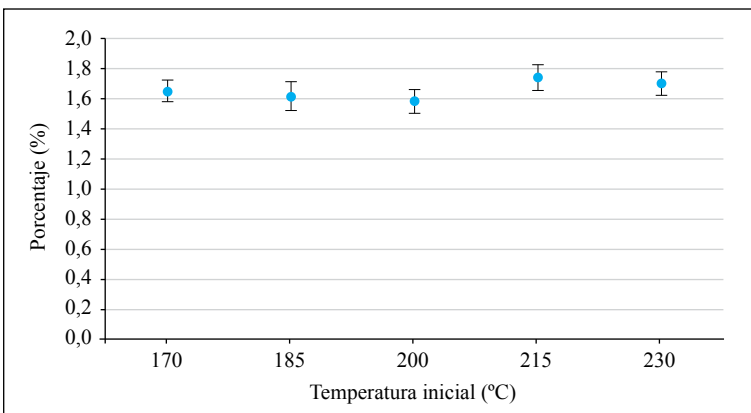
**Figura 7.** Promedios de contenido de teobromina por temperatura inicial de tueste.

del contenido de CGA de café tostado de las variedades Cenicafé 1, Castillo® General, Castillo® Naranjal, Castillo® Pueblo Bello, Castillo® El Tambo y Tabi fueron: 1,60%, 1,65%, 1,75%, 1,54%, 1,64% y 1,69%, respectivamente. En la Figura 8 se presentan los promedios por tratamientos.

Para los ácidos clorogénicos totales no se presentaron diferencias significativas entre las variedades ni en su interacción con las temperaturas iniciales del proceso de tostado. Zanin et al. (2016) compararon cafés arábigos tostados de diferentes regiones de Brasil,

encontrando una amplia variación en el contenido total de CGA y 5-CQA para los cafés de buena calidad en taza con un grado de tostado similar.

**Azúcares.** De los monosacáridos y disacáridos del café verde, tras el proceso de tostado sólo quedan restos de azúcares libres. La degradación de la sacarosa es explicada por su hidrólisis en azúcares reductores como la glucosa y la fructosa, que pueden fragmentarse aún más para formar ácidos alifáticos (Ginz et al., 2000). A partir de los azúcares reductores o de sus productos de fragmentación se forman



**Figura 8.** Valores promedio e intervalos de confianza para el contenido de ácidos clorogénicos totales de los cinco tratamientos (D-30 (170°C), D-15 (185°C), CB (200°C), I-15 (215°C), I-30 (230°C)).



muchos compuestos volátiles y no volátiles (melanoidinas y sus precursores ácidos) por la reacción de Maillard y, en menor medida, por caramelización. La reacción de Maillard tiene una energía de activación menor y, por lo tanto, se ve favorecida si están presentes compuestos de nitrógeno reactivos (aminoácidos, grupos amino libres en proteínas y péptidos) (Illy & Viani, 2005).

Para la variable fructosa la interacción variedad y temperatura inicial de tueste no es significativa, pero sí presentó efecto por la variedad, según prueba de Tukey al 5% (Tabla 6). La variedad Cenicafé 1 es diferente de las demás variedades evaluadas.

Con el fin de verificar las relaciones entre los compuestos químicos y el puntaje total SCA se realizó una matriz de coeficientes de correlación de Pearson mediante un heatmap de correlación (Figura 9), donde se observa que los compuestos químicos en café tostado que tienen correlación positiva con el puntaje total son: ácido cítrico y el ácido quínico, y correlación negativa, con el ácido esteárico y la trigonelina.

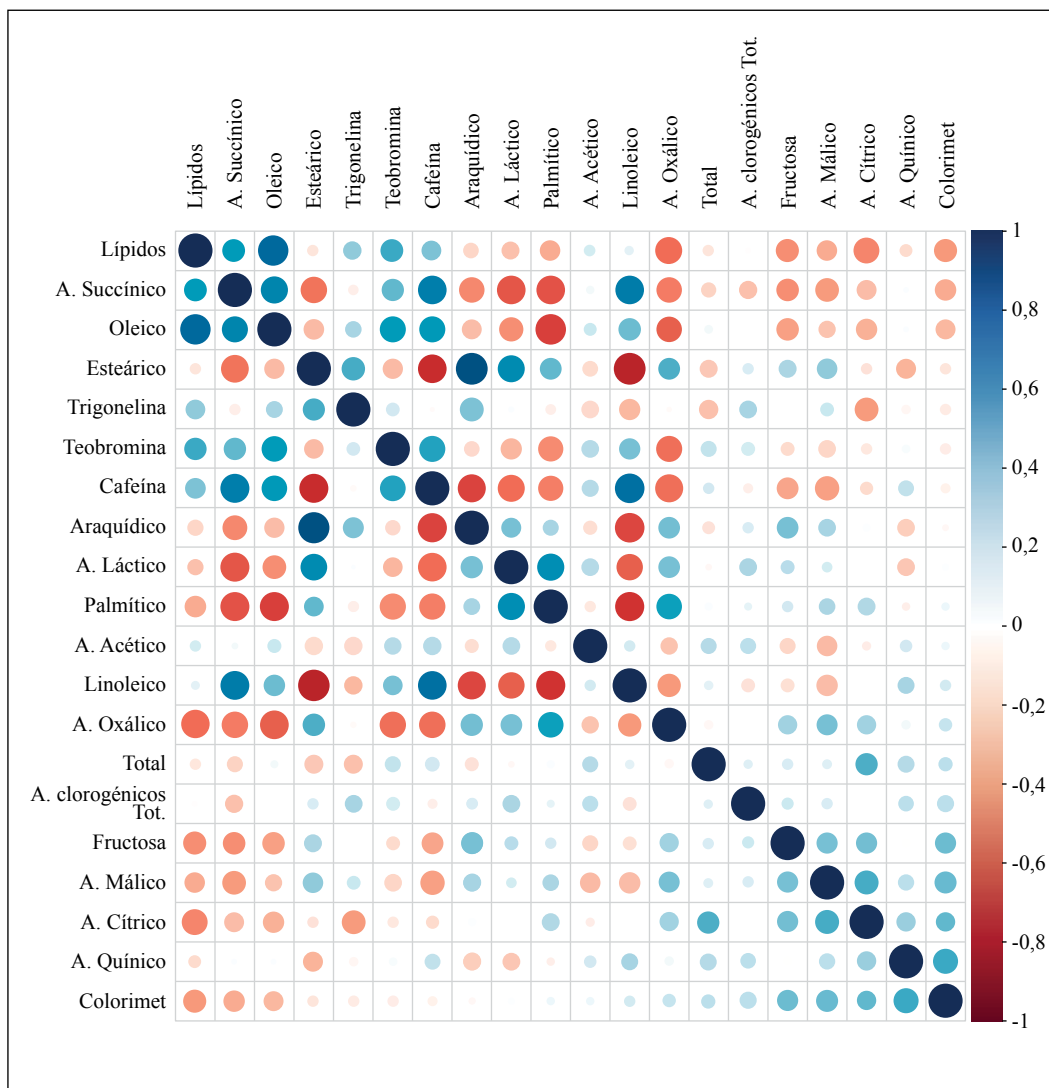
En este estudio puede concluirse que la interacción entre la temperatura inicial y la variedad de café tostado presentó efecto en los siguientes compuestos químicos: ácidos

carboxílicos alifático, acético, quínico, málico y cítrico; ácidos grasos oleico y palmítico; lípidos y los alcaloides: cafeína y trigonelina. Los ácidos carboxílicos oxálico y succínico, los ácidos grasos araquídico y esteárico, y la teobromina, presentaron efecto por la variedad de café. La modificación de la temperatura inicial de la curva de tueste presentó efecto en el ácido oxálico y la teobromina. Estos dos compuestos presentaron, según una prueba de contraste al 5%, una tendencia lineal con la temperatura inicial de tueste, positiva en el caso de la teobromina y negativa para el ácido oxálico.

El proceso realizado en intervalos de tiempo comprendidos entre 8 y 12 minutos, con color final del grano tostado en un rango medio medido en la escala 55-65 AGTRON/SCA, permite evidenciar que la calidad inicial del café almendra verde es el factor determinante para la calidad final del café tostado. La variedad y la interacción de la variedad con la temperatura inicial de tueste mostró efecto en varios de los compuestos químicos evaluados, donde el ácido cítrico presenta la mayor correlación positiva con el puntaje total SCA. Lo anterior está condicionado a un procedimiento realizado bajo parámetros óptimos que permiten la máxima expresión de la calidad.

**Tabla 6.** Valores promedio y desviación estándar (D.E.) de la fructosa por variedad.

Variedad	Promedio (%)		D.E.
Cenicafé 1	0,567	A	0,9731
Castillo® El Tambo	0,493	B	0,5793
Castillo® Naranjal	0,492	B	0,6673
Castillo® General	0,471	B	0,3172
Castillo® Pueblo Bello	0,463	B	0,3549
Tabi	0,461	B	0,4007



**Figura 9.** Heatmap de correlación entre las variables de composición química y puntaje total SCA.

### AGRADECIMIENTOS

En Cenicafé, al equipo de Biometría, doctores Rubén Medina, Esther C. Montoya y Luis Imbachí. A los catadores Claudia Gómez Ramos, David Molina, Jorge Andrés Duque,

Fernando Osorio y Cesar Osorio. En la Disciplina de Calidad a Paola Calderón y el personal de apoyo Wilson Vargas y Jonathan Martínez. Al equipo de Experimentación: Carlos Gonzalo Mejía, José Farid López y John Félix Trejos.

## LITERATURA CITADA

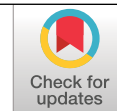
- Bauer, D., Abreu, J., Jordão, N., da Rosa, J. S., Freitas-Silva, O., & Teodoro, A. (2018). Effect of Roasting Levels and Drying Process of *Coffea canephora* on the Quality of Bioactive Compounds and Cytotoxicity. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(11), 3407. <https://doi.org/10.3390/ijms19113407>
- Belitz, H.-D., Grosch, W., & Schieberle, P. (Eds.). (2009). Coffee, Tea, Cocoa. En *Food Chemistry* (pp. 938–970). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69934-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69934-7_22)
- Budryn, G., Nebesny, E., & Oracz, J. (2015). Correlation Between the Stability of Chlorogenic Acids, Antioxidant Activity and Acrylamide Content in Coffee Beans Roasted in Different Conditions. *International Journal of Food Properties*, 18(2), 290–302. <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.805769>
- Chaves-Ulate, E., Esquivel-Rodríguez, P. (2019). Ácidos clorogénicos presentes en el café: capacidad antimicrobiana y antioxidante. *Agronomía Mesoamericana*, 30(1), 299–311. <https://doi.org/10.15517/am.v30i1.32974>
- Clarke, R. J., & Macrae, R. (Eds.). (1985). *Coffee (Volume 1: Chemistry)*. Elsevier Springer, Dordrecht, <https://doi.org/10.1007/978-94-009-4948-5>
- Clarke, R. J., & Vitzthum, O. G. (Eds.). (2001). *Coffee: Recent developments*. Wiley-Blackwell. <http://doi.org/10.1002/9780470690499>
- Clifford, M. N., & Willson, K. C. (Eds.). (1985). *Coffee: Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1>
- De Luca, S., De Filippis, M., Bucci, R., Magri, A. D., Magri, A. L., & Marini, F. (2016). Characterization of the effects of different roasting conditions on coffee samples of different geographical origins by HPLC-DAD, NIR and chemometrics. *Microchemical Journal*, 129, 348–361. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.07.021>
- De Maria, C. A. B., Trugo, L. C., Neto, F. R. A., Moreira, R. F. A., & Alviano, C. S. (1996). Composition of green coffee water-soluble fractions and identification of volatiles formed during roasting. *Food Chemistry*, 55(3), 203–207. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)00104-2](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)00104-2)
- Dias, R. C. E., & Benassi, M. D. T. (2015). Discrimination between Arabica and Robusta Coffees Using Hydrosoluble Compounds: Is the Efficiency of the Parameters Dependent on the Roast Degree? *Beverages*, 1(3), 127–139. <https://doi.org/10.3390/beverages1030127>
- Franca, A. S., Oliveira, L. S., Mendonça, J. C. F., & Silva, X. A. (2005). Physical and chemical attributes of defective crude and roasted coffee beans. *Food Chemistry*, 90(1–2), 89–94. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.03.028>
- Gloss, A. N., Vietri, A., Wieland, F., Smrke, S., Schönbacher, B., López, J. A. S., Petrozzi, S., Bongers, S., Kozirowski, T., & Yeretian, C. (2014). Evidence of different flavour formation dynamics by roasting coffee from different origins: On-line analysis with PTR-ToF-MS. *International Journal of Mass Spectrometry*, 365–366, 324–337. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2014.02.010>
- Illy, A., & Viani, R. (Eds.). (2005). *Espresso coffee: The science of quality* (2nd ed). Elsevier Academic. <https://www.elsevier.com/books/espresso-coffee/illy/978-0-12-370371-2>
- Nakilcioğlu-Taş, E., & Ötleş, S. (2019). Physical characterization of Arabica ground coffee with different roasting degrees. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 91(2), e20180191. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180191>
- Ortolá, M. D., Gutiérrez, C. L., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). Kinetic study of lipid oxidation in roasted coffee. *Food Science and Technology International*, 4(1), 67–73. <https://doi.org/10.1177/108201329800400109>
- Puerta, G. I. (2011). Composición química de una taza de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 414, 1–12. <http://hdl.handle.net/10778/340>
- Puerta, G. I., & Echeverri, L. F. (2019). Relaciones entre las concentraciones de compuestos químicos del café y las temperaturas de torrefacción. *Revista Cenicafé*, 70(2), 67–80. <http://hdl.handle.net/10778/4217>
- Specialty Coffee Association. (2003). *Cupping Protocols. Protocols & Best Practices*. <https://sca.coffee/research/protocols-best-practices>
- Scholz-Böttcher, B. M., Ernst, L., & Maier, H. G. (1991). New stereoisomers of quinic acid and their lactones. *Liebigs Annalen Der Chemie*, 1991(10), 1029–1036. <https://doi.org/10.1002/jlac.1991199101177>

- Villarreal-Peña, D., Baena-Clavijo, L. M., & Posada-Suarez, H. E. (2012). Análisis de lípidos y ácidos grasos en café verde de líneas avanzadas de *Coffea arabica* cultivadas en Colombia. *Revista Cenicafé*, 63(1), 19–40. <http://hdl.handle.net/10778/520>
- Vitorino, M. D., Franca, A. S., Oliveira, L. S., & Andrade, F. M. (2001, junio 16). Variação de características físicas e químicas de café arábica durante a torra parte II: Características Químicas. En Consórcio Pesquisa Café e Desenvolvimento do Café (Organizador), *II Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, Vitória, Espírito Santo, Brasil. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/1244>
- Zanin, R., Corso, M. P., Kitzberger, C. S. G., dos Santos Scholz, M. B., & Benassi, M. de T. (2016). Good cup quality roasted coffees show wide variation in chlorogenic acids content. *LWT-Food Science and Technology*, 74, 480–483. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.012>

# ESTRUCTURA Y DISTRIBUCIÓN LUMÍNICA EN EL DOSEL DE DOS PROGENIES DE CAFÉ CON ÁNGULOS FOLIARES DIFERENTES

Carlos Andrés Unigarro Muñoz \*, Jhon Félix Trejos Pinzón \*\*, José Ricardo Acuña Zornosa \*\*\*

Unigarro, C. A., Trejos Pinzón, J. F., & Acuña-Zornosa, J. R. (2021). Estructura y distribución lumínica en el dosel de dos progenies de café con ángulos foliares diferentes. *Revista Cenicafé*, 72(1), e72104. <https://doi.org/10.38141/10778/72104>



En cultivos perennes, incluido el café, son pocos los estudios que asocian el ángulo de inclinación foliar con la estructura y la distribución lumínica presente en el dosel. En el presente estudio se determinaron las diferencias en la estructura y la distribución teórica de la luz en el dosel de dos progenies de café con ángulos foliares diferentes. En la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé (Caldas, Colombia), se evaluaron plantas de *Coffea arabica* L. con cuatro años sembrados, con una densidad de 6.668 plantas/ha, de las progenies CU1911 (hojas de inclinación vertical) y CX2391 (hojas de inclinación horizontal). Se midieron siete variables estructurales asociadas al follaje y siete respecto al tallo, y se midieron nueve variables en tres perfiles del árbol. Los parámetros de las funciones Elipsoidal y Beta, coeficiente de extinción, fracción de intercepción de la radiación e índice de área foliar iluminado se estimaron matemáticamente. Las comparaciones se realizaron con la prueba t o U de Mann-Whitney ( $\alpha = 0,05$ ) entre genotipos y con la prueba Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) entre perfiles. Características como el tamaño de la hoja, el número de hojas y en menor grado la altura de la planta, presentan cambios que podrían asociarse con la distribución lumínica (coeficiente de extinción) dentro del dosel, y esta con el ángulo foliar. La fracción de intercepción de la radiación y el índice de área foliar iluminado sugieren diferentes desempeños teóricos fotosintéticos. El crecimiento en las ramas no se asoció con el gradiente lumínico.

**Palabras clave:** *Coffea arabica* L., hojas, ramas, tamaño, coeficiente de extinción.

## CANOPY STRUCTURE AND LIGHT DISTRIBUTION OF TWO COFFEE PROGENIES WITH DIFFERENT LEAF ANGLES

There are few studies about perennial crops, including coffee, that relate leaf inclination angle to canopy structure and light distribution. In this study, the differences between structure and theoretical light distribution in the canopy of two coffee progenies with different leaf angles were determined. At the Cenicafé's Naranjal Experiment Station of (Caldas, Colombia), four-year old *Coffea arabica* L. plants at a planting density of 6,668 plants/ha of the progenies CU1911 (vertically inclined leaves) and CX2391 (horizontally inclined leaves) were evaluated. Seven structural variables associated with foliage and seven associated with stem were measured; nine out of these 14 variables were measured in three profiles of the tree. The Ellipsoidal and Beta functions parameters, extinction coefficient, radiation interception fraction and illuminated leaf area index were mathematically estimated. The comparisons were made with the t-test or Mann-Whitney U test ( $\alpha = 0.05$ ) between genotypes and with the Duncan test ( $\alpha = 0.05$ ) between profiles. Characteristics such as leaf size, number of leaves and, to a lesser extent, plant height, show changes that could prove association with light distribution (extinction coefficient) within canopy as well as with leaf angle. The radiation interception fraction and the illuminated leaf area index suggest different theoretical photosynthetic performances. Branch growth was not associated with the light gradient.

**Keywords:** *Coffea arabica* L., leaves, branches, size, extinction coefficient.

\* Investigador Científico I. Disciplina de Fisiología Vegetal, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-7344-3211>

\*\* Asistente de Investigación. Disciplina de Experimentación, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-2349-2856>

\*\*\* Investigador Científico III. Disciplina de Fisiología Vegetal, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0001-6935-2264>



La estructura del dosel influye notablemente en la intercepción de la radiación en las plantas, al regular la distribución de la luz dentro del dosel (Bai et al., 2016). El método clásico para simular la distribución de la luz dentro del dosel envuelve funciones matemáticas basadas en la ley de Beer-Lambert, usando parámetros como el coeficiente de extinción y el índice de área foliar (LAI) (Zhang et al., 2015). En cultivos de plantas frutales las características estructurales como: dimensiones de la planta, forma de la copa, ángulos de ramas y LAI, han sido evaluadas para mejorar la intercepción de la luz (McFadyen et al., 2004; Palmer et al., 1992; Rosell & Sanz, 2012; Tang et al., 2019). Sin embargo, una característica como el ángulo de inclinación foliar con efectos ampliamente reconocidos en la distribución de luz (Monsi & Saeki, 2005) y con aplicaciones prácticas en cultivos de grano como el maíz y sorgo (Mansfield & Mumm, 2014; Truong et al., 2015), ha sido relativamente poco estudiada en perennes, incluido el café (*Coffea arabica* L.).

Los ángulos foliares producen cambios significativos en la distribución vertical de la radiación a través del dosel (Hirose, 2005). Plantas con ángulos foliares más inclinados distribuyen la luz de forma más homogénea a través del dosel, disminuyendo el coeficiente de extinción de la luz e incrementando la fotosíntesis de la planta cuando los LAI son altos (Song et al., 2013), además reduce la sobreexcitación del aparato fotosintético en condiciones de alta irradiancia y mitiga el estrés térmico inducido por el exceso de radiación infrarroja (van Zanten et al., 2010). En cultivos como maíz, las hojas más inclinadas han posibilitado el incremento del número de plantas por superficie de suelo (Mansfield & Mumm, 2014). Por otra parte, los ángulos foliares más horizontales permiten interceptar mayor radiación con bajos LAI, lo cual causa un gradiente lumínico más

heterogéneo, haciéndolos más competitivos por luz (Hikosaka & Hirose, 1997).

Los estudios sobre la estructura del dosel muestran que las variedades de café desarrolladas en Colombia tienen ángulos foliares más horizontales ( $< 45^\circ$ ). Castillo et al. (1996) al evaluar la estructura del dosel de café var. Colombia, registraron un ángulo foliar medio de  $37,7^\circ$  con una densidad de 5.000 plantas/ha con 3,5 años. En la caracterización fenotípica de los 24 genotipos de la variedad Castillo<sup>®</sup>, el ángulo foliar medio osciló entre  $34,5$  y  $35,9^\circ$ , a la edad de tres y cuatro años (Alvarado & Ochoa, 2006). Unigarro et al. (2017) en cafetos de 2,6 años de la variedad Castillo<sup>®</sup>, encontraron un ángulo foliar medio de  $39^\circ$ . No obstante, en la Colección Colombiana de Café existen reportes de genotipos con ángulos foliares más verticales ( $\geq 45^\circ$ ), que proceden de accesiones semisilvestres, con dos y tres años (Mejía et al., 2013; Unigarro et al., 2016). En este contexto, la información sobre estructura y la distribución lumínica en progenies de café con hojas erectas ( $\geq 45^\circ$ ) es escasa, debido al elevado número de progenies con hojas prevalentemente horizontales en las variedades de café actuales. Por lo tanto, el presente estudio tuvo por objetivo determinar las diferencias en la estructura y la distribución teórica de la luz en el dosel de dos progenies de *C. arabica* L. con ángulos foliares contrastantes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización y material vegetal

El estudio fue realizado durante el mes de noviembre de 2019, en la Estación Experimental Naranjal ( $04^\circ 58' N$  y  $75^\circ 39' W$ , 1.400 m. Caldas, Colombia). En un lote de café (*C. arabica* L.) con progenies de la Variedad Castillo<sup>®</sup>, se evaluaron las dos progenies más contrastantes en términos de ángulos foliares, la CU1911 con hojas de inclinación vertical y la CX2391

con hojas de inclinación horizontal (Figura 1). La selección de las dos progenies se realizó con base en el grado de inclinación foliar observado en las distintas progenies desde el mes de julio de 2019 hasta el inicio de la evaluación (noviembre 2019), y también con base en observaciones previas. Esto con la finalidad de garantizar que la inclinación de las hojas fuera una característica intrínseca del genotipo. Los árboles se establecieron el 15 de abril de 2015 con una densidad de 6.668 plantas/ha (1,5 m entre surcos x 1,0 m entre plantas) y crecieron bajo fluctuantes condiciones naturales de temperatura y humedad relativa del aire, hasta el momento de la evaluación (4,6 años). En los surcos donde se encontraban plantados, se seleccionaron 30 plantas al azar, de acuerdo con la teoría de Ross (1981) para

el análisis fitométrico de plantas y el trabajo de Castillo et al. (1996) para evaluar la estructura del dosel en *C. arabica* L. variedad Colombia.

### Medición de la estructura del dosel

Los ángulos foliares ( $\theta_L$ ) se midieron utilizando un compás-transportador similar al descrito por Norman & Campbell (1989), el cual marca la inclinación en grados respecto a la horizontal ( $0^\circ$ ), al medir el ángulo formado entre una línea perpendicular vertical y la normal a la superficie de la hoja. Las hojas seleccionadas para la medición del  $\theta_L$  fueron las ubicadas en la cuarta parte de las ramas presentes en el tallo. Estas ramas se eligieron desde la base del tallo hasta el meristemo apical, siguiendo la sucesión  $a_n = 4n - 3$ , donde  $a$  partir de



**Figura 1.** Progenies de *C. arabica* L. con ángulos foliares contrastantes. En el lado izquierdo, CU1911 con hojas de inclinación vertical y en el lado derecho, CX2391 con hojas de inclinación horizontal.

la primera rama seleccionada, cada término se obtiene de sumar cuatro al anterior (1, 5, 9...). En las hojas donde se midió el  $\theta_L$ , también hizo la medición del largo ( $L_i$ ) y ancho ( $W_i$ ) de la lámina foliar. Mensualmente, se contaron el número de nudos presentes en el tallo (NNS) y el número total de las hojas presentes (NLT). Paralelamente, en las ramas seleccionadas se midió el ángulo de las ramas a una distancia de 10 cm desde las axilas en el tallo, la longitud de la rama desde el punto de inserción en el tallo hasta ápice y número de nudos plagiotrópicos presentes en la rama. También se registró el perfil del cual procedieron las mediciones de las hojas y las ramas. Los perfiles superior, medio e inferior se obtuvieron al dividir a la planta en tres secciones, desde el ápice hasta la base del tallo.

La altura de la planta se midió desde el nivel del suelo hasta el primer par de hojas completamente desarrolladas por debajo del ápice ortotrópico, mientras que el diámetro de la copa se midió perpendicularmente al surco en la parte más ancha de la copa de la planta. El diámetro del tallo se registró a 10 cm por encima del nivel del suelo con un calibrador. Los procedimientos anteriormente descritos se realizaron en cada una de las plantas seleccionadas.

### **Variables calculadas a partir de la estructura del dosel**

El tamaño de la hoja individual ( $LS_i$ ) se estimó con la Ecuación <1>, utilizando la relación alométrica entre el ancho de la lámina foliar ( $W_i$ ) y la  $LS_i$  (Unigarro et al., 2015). Los conteos de hojas por estrato fueron convertidos en área foliar (LA), al multiplicarlos por el tamaño medio de la hoja (LS) del correspondiente estrato (Ecuaciones <2> y <3>), los valores totales de LA por planta se obtuvieron al totalizar los valores por estrato, acorde con

la metodología de Castillo et al. (1997) para café.

$$LS_i = 1,68938 \times W_i^{1,87577} \quad (N = 6441, R^2 = 0,96) \quad <1>$$

$$LS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LS_i \quad <2>$$

$$LA = LS \times NLT \quad <3>$$

El índice de área foliar (LAI) se estimó como la relación entre LA total de los perfiles y la superficie de la copa proyectada en el suelo (Ecuación <4>), tanto para estratos como para plantas. La proyección de la copa se calculó con el diámetro de la copa (CD) y el espacio entre plantas, asumiendo una elipse. El espacio entre plantas fue usado como segundo diámetro, porque es el máximo espacio que puede ocupar la planta dentro del surco.

$$LAI = \frac{LA}{\left[ \left( \frac{CD}{2} \right) / 100 \right] \times \left[ \left( \frac{\text{espacio entre plantas}}{2} / 100 \right) \times \pi \right]} \quad <4>$$

Los parámetros  $v$  y  $\mu$  de la función Beta (Goel & Strebel, 1984) y el parámetro  $\chi$  de la función Elipsoidal (Campbell, 1990) se determinaron con el promedio y desviación estándar de los ángulos foliares obtenidos por planta utilizando las ecuaciones descritas por Wang et al. (2007).

### **Coefficiente de extinción, intercepción de la radiación y LAI al sol**

El coeficiente de extinción  $K(\theta)$  medido por planta se calculó con el algoritmo de Nilson (1971) (Ecuación <5>).  $K(\theta)$  es el promedio del área proyectada por los elementos del dosel cuando ellos están sobre un plano horizontal (Campbell & Norman, 1989).

$$K(\theta) = \frac{\left[ G(\theta) = \int_0^{\pi/2} A(\theta, \theta_L) f(\theta_L) d\theta_L \right]}{\cos(\theta)} \quad <5>$$



Donde,  $\theta$  es el ángulo azimutal de los rayos de luz incidentes,  $\theta_L$  es el ángulo de inclinación foliar y  $G(\theta)$  representa a la función de proyección de la hoja en la dirección  $\theta$ , que puede ser calculada de la distribución de los ángulos foliares  $f(\theta_L)$  y  $\cos(\theta)$  es la longitud óptica de la trayectoria a través de una capa de vegetación, asumiendo que sea homogénea y sin orientación preferida (Yan et al., 2019).

En la Ecuación <5>  $A(\theta, \theta_L)$ , está dada por (Ecuación 6):

$$A(\theta, \theta_L) = \begin{cases} \cos \theta \cos \theta_L, & \text{si } |\cos \theta \cos \theta_L| > 1 \\ \cos \theta \cos \theta_L [1 + (2/\pi)(\tan \psi - \psi)], & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad <6>$$

Donde:  $\psi = \cos^{-1}(\cot \theta \cot \theta_L)$ .

La  $f(\theta_L)$  medida se obtuvo al agrupar los ángulos foliares ( $\theta_L$ ) en diez intervalos que van de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . En el caso de las  $f(\theta_L)$  estimadas, se computaron con las funciones Beta y Elipsoidal a partir de sus respectivos parámetros, posteriormente los valores se fraccionaron en los intervalos  $n$  previamente comentados. Todos los coeficientes de extinción se determinaron en cinco ángulos cenitales ( $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  y  $75^\circ$ ). La fracción de la radiación interceptada  $I(\theta)$  se calculó mediante el modelo de probabilidad de brechas (Ecuación <7>) (Nilson, 1971), asumiendo que la radiación penetrante se extingue según la ley de Beer-Lambert, como lo demostraron Monsi & Saeki (2005). El índice de área foliar al sol (LAI<sub>sun</sub>) se estimó con los valores de  $K(\theta)$  y LAI por planta, siguiendo la metodología de Campbell & Norman (1998), de acuerdo con la Ecuación <8>.

$$I(\theta) = 1 - \exp^{-G(\theta) \frac{LAI}{\cos(\theta)}} \quad <7>$$

$$LAI_{\text{sun}}(\theta) = \frac{(1 - \exp^{-K(\theta) \times LAI})}{K(\theta)} \quad <8>$$

## Procedimientos de análisis

De los registros por planta se analizaron las siguientes variables: ángulo medio de inclinación foliar ( $\theta_L$ ;  $^\circ$ ), largo medio de hoja (L; cm), ancho medio de hoja (W; cm), número de hojas por planta (NLT), ángulo medio de ramas ( $\Theta_B$ ;  $^\circ$ ), longitud media de las ramas plagiotrópicas (BL; cm), número de nudos en ramas plagiotrópicas (NNB), altura del tallo (SH; cm), diámetro del tallo (SD; cm), diámetro de copa (CD; cm), número de nudos en el tallo (NNS), tamaño medio de la hoja (LS;  $\text{cm}^2$ ), área foliar por planta (LA;  $\text{m}^2$ ), índice de área foliar (LAI;  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ), parámetros de funciones ( $\nu$ ), ( $\mu$ ) y ( $\chi$ ) y coeficiente de extinción ( $K(\theta)$ ),  $I(\theta)$ , LAI<sub>sun</sub>( $\theta$ ). La comparación entre genotipos se realizó con la prueba t-Student ( $\alpha = 0,05$ ) cuando se distribuyeron normalmente según prueba de Shapiro-Wilk ( $\alpha = 0,05$ ), en caso contrario, cuando este supuesto fue violado se procedió con la prueba U de Mann-Whitney ( $\alpha = 0,05$ ). Los estratos dentro de un genotipo se compararon con la prueba Duncan ( $\alpha = 0,05$ ). La bondad de ajuste entre la  $f(\theta_L)$  medida y la estimada por las funciones Beta y Elipsoidal se determinó con la prueba de Chi-cuadrado de Pearson ( $\chi^2_{1-\alpha; k-1; k=9}$ ) ( $\alpha = 0,05$ ). Los análisis estadísticos fueron realizados con los procedimientos Base SAS® y SAS/STAT® del software SAS® (versión 9.3).

## RESULTADOS

En las características  $\theta_L$ , L, W y LS asociadas al follaje del dosel, la progenie CU1911 fue estadísticamente mayor ( $p < 0,05$ ) a CX2391. La variable  $\theta_L$  mostró que la progenie CU1911 presentó hojas un 34% más inclinadas que las hojas de CX2391, hecho que corrobora la naturaleza contrastante de estas progenies. Así mismo, en CU1911 las dimensiones de la hoja L y W fueron un 9% más grandes, mientras que, el LS fue un 18% mayor (Tabla

1). En contraparte, la progenie CX2391 fue estadísticamente superior en las características BL, NNB, SH, SD y CD asociadas al tallo ( $p < 0,05$ ), señalando que el crecimiento leñoso fue mayor en esta progenie. Los valores de BL, CD y NNB en la progenie CX2391 fueron entre un 16% y 17% más altos respecto a la progenie CU1911, mientras que la diferencia en

las variables SH y SD solo logró un 9% (Tabla 1). Las variables NLT, LA y LAI y el resto de las variables no difirieron significativamente entre progenies ( $p > 0,05$ ) (Tabla 1).

La comparación entre progenies dentro del perfil mostró que la progenie CU1911 fue estadísticamente mayor ( $p < 0,05$ ) a CX2391

**Tabla 1.** Características estructurales del dosel (tallo y follaje) en las progenies CU1911 (hojas de inclinación vertical) y CX2391 (hojas de inclinación horizontal) de *C. arabica* L.

Variable	CU1911		CX2391	
<b>Características del follaje</b>	<b>(n=29)</b>		<b>(n=30)</b>	
Ángulo medio de inclinación foliar ( $\theta_L$ ; °)	48,7 ± 1,6	a	31,9 ± 1,2	b *
Largo medio de hoja (L; cm)	9,7 ± 0,1	a	8,8 ± 0,1	b *
Ancho medio de hoja (W; cm)	4,4 ± 0,1	a	4,0 ± 0,1	b *
Tamaño medio de hoja (LS; cm <sup>2</sup> )	29,2 ± 0,9	a	23,9 ± 0,6	b *
Número de hojas por planta (NLT)	2.640 ± 217 (2.579)	a	2.891 ± 106 (2.900)	a †
Área foliar por planta (LA; m <sup>2</sup> )	6,8 ± 0,7 (6,4)	a	7,2 ± 0,4 (7,1)	a †
Índice de área foliar (LAI; m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	5,6 ± 0,4 (5,7)	a	5,1 ± 0,2 (5,2)	a †
<b>Características del tallo</b>	<b>(n=29)</b>		<b>(n=30)</b>	
Ángulo medio de rama ( $\Theta_B$ ; °)	22,7 ± 0,9 (21,9)	a	21,7 ± 0,8 (21,7)	a †
Longitud media ramas plagiotrópicas (BL; cm)	48,8 ± 1,9	b	58,0 ± 1	a *
Número de nudos en ramas plagiotrópicas (NNB)	16,0 ± 0,6	b	19,4 ± 0,4	a *
Altura del tallo (SH; cm)	189,1 ± 3,8 (200)	b	204,2 ± 3,6 (207,5)	a †
Diámetro del tallo (SD; cm)	5,2 ± 0,2	b	5,6 ± 0,1	a *
Diámetro de copa (CD; cm)	148,8 ± 4,5	b	176,8 ± 2,5	a *
Número de nudos en el tallo (NNS)	41,3 ± 0,9	a	42,3 ± 0,7	a *

Letras diferentes en la misma fila, indican diferencias significativas entre progenies usando la prueba de t-Student (\*) o la prueba de U de Mann-Whitney (†) al 5% de significancia ( $\alpha = 0,05$ ). Los números en la tabla corresponden al promedio ± error estándar, en el caso de haber usado la prueba de U de Mann-Whitney se adicionó el valor de la mediana entre paréntesis.

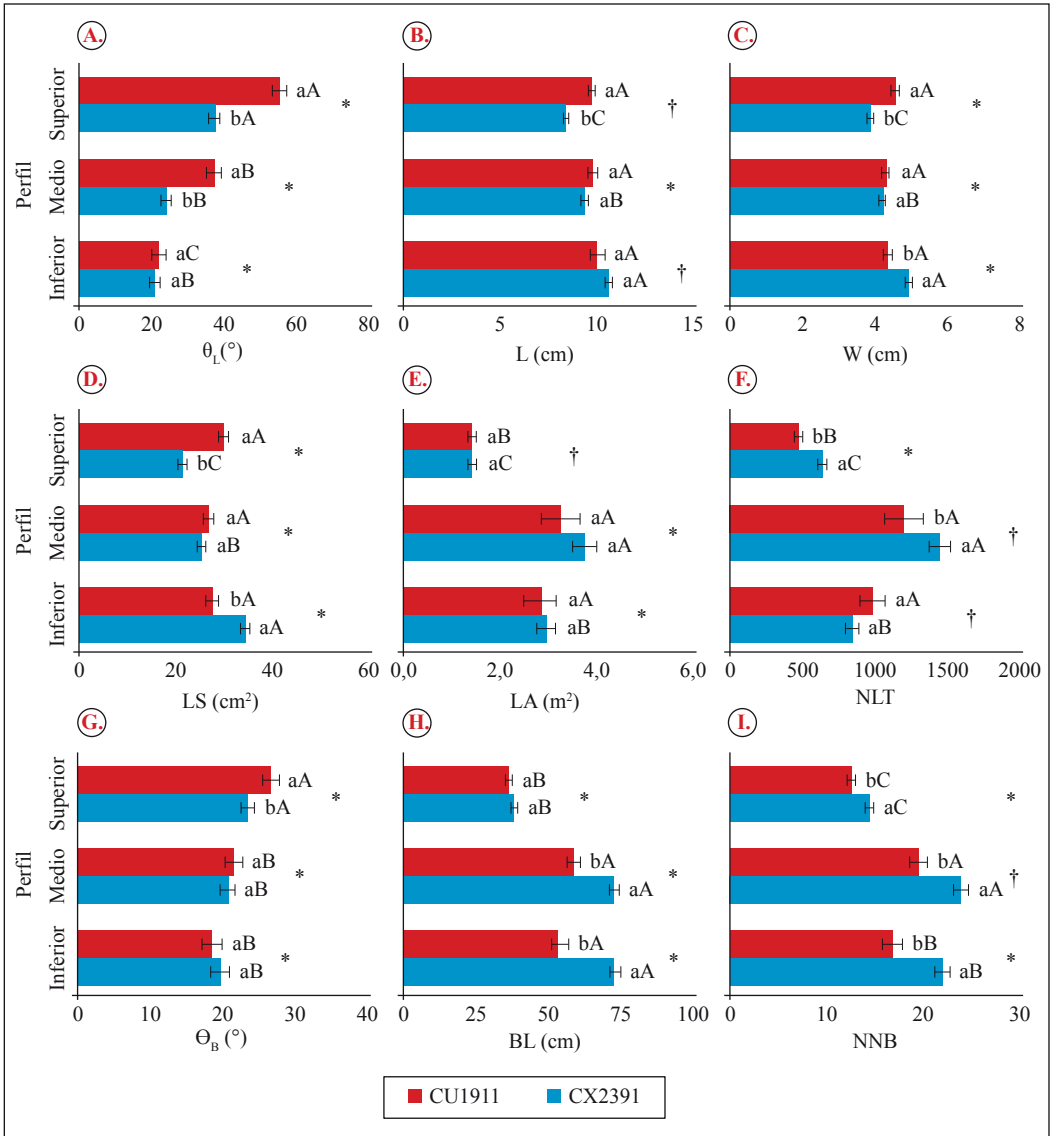
en el perfil superior para las variables  $\theta_L$ , L, W, LS y  $\Theta_B$  con una diferencia del 32%, 14%, 15%, 28% y 12%, respectivamente; no obstante, fue inferior ( $p < 0,05$ ) para las variables NLT (25%) y NNB (13%) (Figura 2 A, B, C, D, F, I). En el perfil medio,  $\theta_L$  también presentó una inclinación significativa ( $p < 0,05$ ) a favor de CU1911 (36%), pero en las variables NLT, BL y NNB la diferencia estuvo a favor de CX2391 (17%, 20% y 18%, respectivamente) (Figura 2 A, F, H, I). Para el perfil bajo de la planta, la comparación entre progenies señaló un incremento ( $p < 0,05$ ) en las variables W (12%), LS (20%), BL (27%) y NNB (24%) a favor de CX2391 (Figura 2 B, D, H, I). El LA no presentó diferencias estadísticas ( $p > 0,05$ ) entre progenies a través de los perfiles evaluados (Figura 2 E).

Por otra parte, las comparaciones entre perfiles dentro de cada progenie mostraron que CU1911 tuvo diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ) en la variable  $\theta_L$ , siendo el perfil superior más inclinado que el medio (33%) y este a su vez más que el inferior (40%). Una tendencia similar también se observó en la progenie CX2391, donde el perfil superior fue estadísticamente más inclinado ( $p < 0,05$ ) respecto a los perfiles medio e inferior (36% y 44%, respectivamente) (Figura 2 A). La variable LS mostró que el perfil inferior fue de mayor tamaño ( $p < 0,05$ ) que el medio (26%) y este a su vez mayor ( $p < 0,05$ ) que el superior (16%) en la progenie CX2391, no obstante, esto no ocurrió para la progenie CU1911 donde todas las hojas presentaron el mismo tamaño ( $p > 0,05$ ) (Figura 2 D). La tendencia de LS también se observó en las variables L y W (Figura 2 B, C). En el caso de la variable LA, la progenie CU1911 presentó un área mayor ( $p < 0,05$ ) en los perfiles medio (57%) e inferior (50%) respecto la registrada en el superior, mientras que, la progenie CX2391 presentó un perfil medio de mayor área que el perfil inferior (13%),

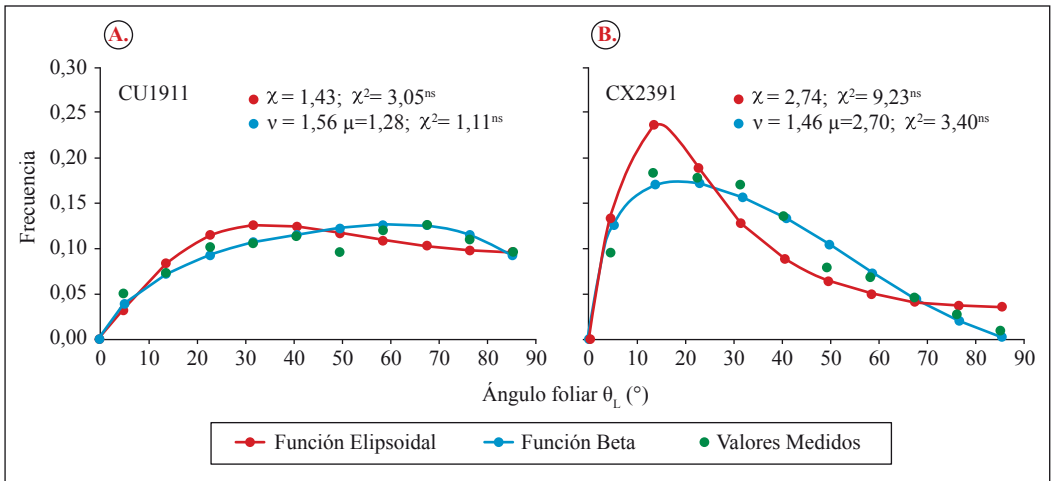
el cual fue a su vez mayor el perfil inferior (50%) (Figura 2 E). La variable NLT mostró un comportamiento similar al observado para LA (Figura 2 F). La variable  $\Theta_B$  mostró que las progenies CU1911 y CX2391 presentaron un ángulo entre 12% y 30% más erecto ( $p < 0,05$ ) en el perfil superior respecto a los perfiles medio e inferior (Figura 2 G). Contrario a esto, en la variable BL fueron los estratos medio e inferior los que presentaron entre 32% y 47% más longitud ( $p < 0,05$ ) respecto al perfil superior en ambas progenies (Figura 2 H). Por último, en ambas progenies, la variable NNB mostró que el perfil medio obtuvo más nudos (8% y 14%, respectivamente) que el perfil inferior ( $p < 0,05$ ), mientras que este fue a su vez mayor ( $p < 0,05$ ) que el perfil superior (25% y 34%, respectivamente) (Figura 2 I).

El ajuste ( $\chi^2$ ) entre  $f(\theta_L)$  medida y las  $f(\theta_L)$  estimadas por las funciones Beta y Elipsoidal, no reveló diferencias significativas (Figura 3), corroborando que las funciones Elipsoidal y Beta producen valores muy próximos a los medidos, hecho que permite modelar adecuadamente el comportamiento de la  $f(\theta_L)$  medida. La función Beta muestra mejor desempeño debido a que logra un menor  $\chi^2$ .

En los ángulos cenitales ( $\theta$ ) posteriores a la media mañana (15°, 30° y 45°), la progenie CU1911 con los ángulos foliares más inclinados presentó los menores  $K(\theta)$  en referencia a CX2391 ( $p < 0,05$ ). No obstante, la diferencia porcentual entre las progenies disminuyó en la medida que  $\theta$  aumentó ( $\theta:15^\circ=23\%$ ;  $\theta:30^\circ=19\%$ ;  $\theta:45^\circ=11\%$ ). Por el contrario, cuando se calcularon los  $K(\theta)$  en los  $\theta$  cercanos a la mañana (60° y 75°), fue CX2391 la progenie que mostró los menores valores ( $p < 0,05$ ), aunque las diferencias registradas fueron más reducidas ( $\theta:60^\circ=4\%$ ;  $\theta:75^\circ=20\%$ ) (Tabla 2). La  $I(\theta)$  presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) a favor de la progenie CX2391 (3%) en el  $\theta$  cercano al medio día (15°),



**Figura 2.** Ángulo medio de inclinación foliar ( $\theta_L$ ) [A], largo de la hoja (L) [B], ancho de la hoja (W) [C], tamaño medio de hoja (LS) [D], área foliar por planta (LA) [E], número de hojas totales (NLT) [F], ángulo medio de rama ( $\theta_B$ ) [G], longitud media ramas plagiotrópicas (BL) [H] y número de nudos en ramas plagiotrópicas (NNB) [I] en tres estratos de la planta para las progenies CU1911 (hojas de inclinación vertical) y CX2391 (hojas de inclinación horizontal) de *C. arabica* L. Letras minúsculas diferentes dentro del mismo estrato, indican diferencias significativas entre progenies usando la prueba de t-Student (\*) o la prueba de U de Mann-Whitney (†) al 5% de significancia ( $\alpha=0,05$ ). Letras mayúsculas diferentes dentro de la misma progenie, indican diferencias significativas entre estratos usando la prueba de Duncan ( $\alpha=0,05$ ). Las barras corresponden al promedio  $\pm$  error estándar (CU1911 n=29, CX2391 n=30).



**Figura 3.** Parámetros de las funciones Elipsoidal( $\chi$ ), Beta ( $v$ ,  $\mu$ ) y distribución de ángulos foliares  $f(\theta_L)$ , medida respecto a las distribuciones estimadas con las funciones, en las progenies CU1911 (hojas de inclinación vertical) [A] y CX2391 (hojas de inclinación horizontal) [B] de *C. arabica* L. <sup>ns</sup>= Función de distribución de ángulos foliares estadísticamente igual a la distribución medida, según la prueba  $\chi^2$ .

en el resto de los  $\theta$  la intercepción de la radiación entre progenies fue similar (Tabla 2). El LAIsun( $\theta$ ) mostró que el área iluminada del follaje fue estadísticamente mayor ( $p < 0,05$ ) en la progenie CU1911 durante los  $\theta$  de la media mañana y posteriores ( $\theta:15^\circ=21\%$ ;  $\theta:30^\circ=18\%$ ;  $\theta:45^\circ=10\%$ ). Por el contrario, cuando los  $\theta$  fueron próximos a la mañana, el área iluminada fue mayor ( $p < 0,05$ ) en CX2391 ( $\theta:60^\circ=4\%$ ;  $\theta:75^\circ=19\%$ ) (Tabla 2).

### DISCUSIÓN

Las frecuencias de las inclinaciones foliares  $f(\theta_L)$  muestra la naturaleza contrastante de las progenies en términos de  $\theta_L$  (Figura 3), siendo este uno de los parámetros base para simular la transferencia radiativa en los doseles (Wang et al., 2007). La modelación de  $f(\theta_L)$  usando las funciones Beta y Elipsoidal, mostró que ambas presentan un desempeño similar, siendo mejor el de la primera (Figura 3). Unigarro et al. (2017) observaron que  $f(\theta_L)$  calculada en

*C. arabica* var. Castillo<sup>®</sup> tuvo un mejor ajuste al modelarse con la función Beta respecto a la Elipsoidal.

Los  $\theta_L$  más verticales en los perfiles superior y medio de la progenie CU1911 y su menor  $K(\theta)$  en los  $\theta$  posteriores a la media mañana ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ), indican una distribución más homogénea de la luz a través de la capas del dosel (van Zanten et al., 2010), hojas menos expuestas a altas cargas de radiación próximas al medio día (Falster & Westoby, 2003) y menor competencia por luz entre plantas (Hikosaka & Hirose, 1997) (Figura 2 A; Tabla 2). Por el contrario, los  $\theta_L$  más horizontales en el perfil superior de CX2391 y un mayor  $K(\theta)$  en los  $\theta$  posteriores a la media mañana, apuntan a una distribución más heterogénea de la luz, puesto que más luz se intercepta en las hojas superiores generando un mayor sombreado a las hojas inferiores, este sombreado también le proporciona un mayor factor de competencia respecto a sus vecinos (Figura 2

A; Tabla 2). La tendencia a presentar hojas con ángulos más inclinados cerca de la punta de la copa de la planta con respecto a las hojas en la base de la planta se observó en ambas progenies, pero de forma más acentuada en CU1911 (Figura 2 A; Tabla 2). Se observa que el  $\theta_L$  cambia gradualmente de una mayor verticalidad en el dosel superior donde es más luminoso, hacia ángulos más horizontales en dosel inferior donde la luminosidad es baja (Niinemets, 2010). Araujo et al. (2008) en *C. arabica* L. también encontraron que los ángulos en las hojas superiores fueron más inclinados, que aquellos registrados en las hojas inferiores. Según Herbert & Nilson (1991) esta estrategia maximiza la tasa fotosintética del dosel, al reducir el estrés lumínico de las hojas superiores e incrementar la transmisión lumínica hacia las hojas inferiores (van Zanten et al., 2010).

El LS general del follaje (Tabla 1) podría indicar un mayor autosombreamiento para CX2391. Falster & Westoby (2003) reportan que especies con un LS más pequeño, tienen mayor autosombreamiento dentro del tallo. Por otra parte, la plasticidad fenotípica de la superficie de la hoja ante la disponibilidad de luz en café (mayor tamaño foliar en cafetos bajo sombra respecto a los expuestos a libre exposición solar) podría ser la causa del cambio en la SL a través de los estratos (Figura 2 D). En el perfil superior, las hojas más horizontales de CX2391 interceptan más radiación, lo cual pudo haber producido la reducción en el LS, mientras que en la progenie CU1911 con hojas más verticales y de menor interceptación, el LS tendió a ser mayor (Figura 2 D). Hojas más verticales en el dosel superior interceptan menos radiación solar al medio día donde la intensidad es mayor (Niinemets, 2010). Matos et al. (2009) registraron en *C. arabica* L. var. Catuaí Vermelho IAC 44 una disminución en LS (hasta de 21%) cuando las

hojas crecieron interceptando altos niveles de radiación fotosintéticamente activa (PAR). Chaves et al. (2008) en *C. arabica* L. var Red Catuaí documentaron que los  $\theta_L$  más verticales interceptan menos PAR en relación con los más horizontales, tanto a plena luz solar como bajo sombra, siendo considerada esta característica como una respuesta fotoprotectora a nivel estructural. Bajo estas premisas, parte de la respuesta observada en el LS del perfil superior estaría en función de la carga radiativa que el  $\theta_L$  influyó sobre la hoja.

Esta primera interceptación de la radiación en el perfil superior afecta a su vez, la distribución de la luz y en particular el sombreado al interior del dosel. Niinemets (2016) sugiere que las hojas verticales al evitar el exceso de interceptación lumínica permiten que la iluminación del follaje sea más uniforme en el dosel, permitiendo una mayor penetración de la luz. Bote et al. (2018) y Pompelli et al. (2012) observaron una relación inversa entre el nivel de sombreado y el área de las hojas individuales en *C. arabica* L.; bajo estas premisas, las hojas más horizontales en el estrato superior de CX2391 reducen la disponibilidad de luz para los siguientes perfiles, lo cual produce un mayor sombreado, razón por la cual el LS tiende a incrementarse en los perfiles inferiores (Figura 2 D). En contraste, la progenie CU1911 con una distribución más homogénea de la luz a causa de sus  $\theta_L$  más verticales en el perfil superior, transmitió más luz hacia los perfiles inferiores reduciendo el nivel de sombrío, condición que podría explicar el LS similar en todos los perfiles (Figura 2 D). Esta evidencia sugiere que los gradientes de luz dentro del dosel influenciados por los ángulos foliares pueden envolver ajustes estructurales como el cambio en el tamaño de lámina foliar, siendo esta la observación más relevante del presente trabajo.

**Tabla 2.** Coeficiente de extinción– $K(\theta)$ , fracción de radiación interceptada– $I(\theta)$  e índice de área foliar al sol– $LAI_{sun}(\theta)$  en cinco ángulos cenitales ( $\theta$ ), para las progenies CU1911 (hojas de inclinación vertical) y CX2391 (hojas de inclinación horizontal) de *C. arabica* L.

Variable	CU1911 (n=29)		CX2391 (n=30)	
<i><math>\theta= 15^\circ</math> (cercano al medio día)</i>				
$K(\theta)$	0,62 ± 0,02	b	0,81 ± 0,01	a *
$I(\theta)$	0,93 ± 0,01 (0,95)	b	0,97 ± 0,01 (0,98)	a †
$LAI_{sun}(\theta)$	1,55 ± 0,05	a	1,22 ± 0,02	b *
<i><math>\theta= 30^\circ</math></i>				
$K(\theta)$	0,66 ± 0,02	b	0,81 ± 0,01	a *
$I(\theta)$	0,95 ± 0,01 (0,96)	a	0,97 ± 0,01 (0,98)	a †
$LAI_{sun}(\theta)$	1,46 ± 0,03	a	1,20 ± 0,02	b *
<i><math>\theta= 45^\circ</math> (media mañana)</i>				
$K(\theta)$	0,75 ± 0,01	b	0,84 ± 0,01	a *
$I(\theta)$	0,97 ± 0,01 (0,98)	a	0,98 ± 0,01 (0,99)	a †
$LAI_{sun}(\theta)$	1,29 ± 0,01	a	1,16 ± 0,01	b *
<i><math>\theta= 60^\circ</math></i>				
$K(\theta)$	0,98 ± 0,01 (0,98)	a	0,94 ± 0,01 (0,94)	b †
$I(\theta)$	0,99 ± 0,003 (0,99)	a	0,99 ± 0,002 (0,99)	a †
$LAI_{sun}(\theta)$	1,01 ± 0,01 (1,01)	b	1,05 ± 0,01 (1,05)	a †
<i><math>\theta= 75^\circ</math> (cercano a la mañana)</i>				
$K(\theta)$	1,75 ± 0,03	a	1,40 ± 0,02	b †
$I(\theta)$	0,99 ± 0,001 (0,99)	a	0,99 ± 0,001 (0,99)	a †
$LAI_{sun}(\theta)$	0,58 ± 0,01	b	0,72 ± 0,01	a *

Letras diferentes en la misma fila, indican diferencias significativas entre progenies usando la prueba de t-Student (\*) o la prueba de U de Mann-Whitney (†) al 5% de significancia ( $\alpha= 0,05$ ). Los números en la tabla corresponden al promedio ± error estándar, en el caso de haber usado la prueba de U de Mann-Whitney se adicionó el valor de la mediana entre paréntesis.

El NLT, mostró que CX2391 presentó más hojas en los estratos medio y superior respecto a CU1911 (Figura 2 F), lo cual podría representar un mayor sombreado en los estratos inferiores. Esto se respalda por la mayor heterogeneidad lumínica (altos  $K(\theta)$ ) encontrada en CX2391 (Tabla 2). Falster &

Westoby (2003) encontraron una relación directa entre el autosombreamiento promedio y el número de hojas. Por otra parte, la ausencia de diferencias significativas en LA total y sus estratos, además en LAI total, señala que la capacidad fotosintética de las progenies es similar (Tabla 1; Figura 2 E). Esto posiblemente

se presentó porque hubo un relativo balance entre el incremento del LS y la reducción del número de hojas (Tabla 1). La mayor  $I(\theta)$  de los  $\theta_L$  más verticales cuando el  $\theta$  es alto (King, 1997), se observó en los  $\theta$  mayores a  $15^\circ$ , cuando la  $I(\theta)$  en progenie CU1911 llegó a ser estadísticamente igual a la de CX2391, una progenie con ángulos más horizontales y, por lo tanto, de mayor interceptación lumínica (Tabla 2). En árboles frutales con densos follajes esto resulta útil, debido a que una adecuada penetración de la luz puede favorecer a la producción, al incrementar la formación de yemas florales (Rom, 1991). Jaramillo & Santos (1980) reportan que la interceptación de la radiación osciló entre 0,95 y 0,96 en plantaciones adultas de *C. arabica* L. No obstante, el IAFsun en los  $\theta$  cercanos a la mañana ( $\theta=60^\circ, 75^\circ$ ) fue mayor en la progenie CX2391 (Tabla 2), situación que podría beneficiar a la fotosíntesis de esta progenie. Todo lo anterior, también estará sujeto a las condiciones ambientales predominantes, por ejemplo, cultivos con hojas verticales tienen marcadas ventajas productivas sobre los de hojas horizontales, en altos LAI y altas radiaciones, pero no en bajos LAI y bajas radiaciones (Valladares, 1999). Estos conceptos teóricos del desempeño fotosintético son puntos que considerar en futuros estudios.

Las diferencias del  $\Theta_B$  solo se presentaron en el perfil superior del dosel, con una inclinación levemente más horizontal en CX2391 ( $23,4^\circ$ ) respecto a CU1911 ( $26,5^\circ$ ) (Figura 2 G), aunque esta podría ser muy leve para tener efectos sobre la interceptación lumínica. En níspero (*Eriobotrya japonica* Lind) las inclinaciones más horizontales incrementaron la interceptación de la PAR al disminuir el sombreado de las hojas, pero solo entre los extremos evaluados ( $30^\circ$  y  $120^\circ$ ) (Tang et al., 2019). Las diferencias relativamente constantes de las progenies a través de los estratos en las variables BL y NNB, además del menor crecimiento de

las ramas inferiores de CU1911 (con mayor disponibilidad de luz) (Figura 2 H, I), sugiere que estas características se asocian más al factor genético que al gradiente lumínico influenciado por los  $\theta_L$ . Bote et al. (2018) encontraron una relación directa entre la BL y el nivel de sombreado en *C. arabica* L., además Rodrigues et al. (2014) determinaron en genotipos de *C. arabica* L., establecidos en altas densidades, que las características BL y NNB son menos influenciadas por el ambiente debido a su muy alta heredabilidad ( $>90\%$ ). En esta misma vía, también se encuentra la variable CD, que está vinculada implícitamente a la BL de las ramas inferiores (Tabla 2; Figura 2 H). La caracterización de Alvarado & Ochoa (2006), en las progenies de *C. arabica* L. var. Castillo<sup>®</sup>, mostró que las variables BL, CD y NNB fueron mayores en CX2391 respecto a CU1911, lo cual concuerda con lo encontrado en el presente estudio. Las dimensiones de la planta tienen marcados efectos en la fracción de la radiación interceptada, puesto que determinan parte del sombreado de las plantas adyacentes (Rom, 1991). En este contexto, el crecimiento plagiotrópico es relevante sobre la proximidad que deben mantener las plantas entre sí, el cual puede afectar el gradiente lumínico.

Parte de la expresión en SH podría estar vinculada al  $\theta_L$  cuando el follaje es denso, puesto que el ángulo foliar determina qué cantidad de luz será interceptada en el perfil superior y, por consecuencia, qué luz estará disponible para los perfiles inferiores, incluso para sus vecinos. El grado de influencia que tiene cada planta sobre el clima lumínico de las otras influencia la SH, de aquí la relación directa entre la altura y la densidad de plantas (Anten, 2016). En este sentido, la menor transmisión de la luz en la progenie CX2391 pudo haber incrementado el grado de competencia entre plantas, lo cual resultó en un mayor crecimiento en altura respecto a CU1911 (Tabla 1). En el



estudio de Alvarado & Ochoa (2006), la SH no mostró diferencias cuando el  $\theta_L$  fue similar en CU1911 y CX2391, ubicadas en la localidad de El Rosario, hecho que posiblemente ocurrió como resultado de la foto protección de las hojas a causa de la intensa radiación. No obstante, en la localidad de Maracay, con 21% menos radiación, las progenies presentaron  $\theta_L$  y SH contrastantes como en el presente estudio. Futuras investigaciones deberían profundizar en el efecto de la inclinación foliar sobre la competencia entre plantas.

Puede concluirse que los ángulos foliares se hicieron más horizontales hacia los perfiles más bajos donde la disponibilidad de luz fue menor, en este sentido las progenies difirieron significativamente en los perfiles medio y superior. Las dimensiones y el tamaño de la hoja se incrementaron hacia los perfiles más bajos cuando las hojas fueron más horizontales (CX2391), pero fueron similares al ser más verticales (CU1911), posiblemente por la mayor homogeneidad en la distribución de la luz a través del dosel. El mayor número de hojas en los perfiles medio y superior de CX2391, así como un menor tamaño foliar promedio señalan un mayor autosombreamiento, probablemente

ligados a la mayor heterogeneidad lumínica causada por los ángulos más horizontales. Variaciones en la  $I(\theta)$  y LAIsun sugieren un desempeño fotosintético teórico distinto entre las progenies, aun cuando presenten similar capacidad fotosintética. En densos follajes donde la competencia por luz es mayor, los ángulos foliares podrían afectar la altura de la planta. La respuesta en el crecimiento plagiotrópico de las ramas no fue asociada al gradiente lumínico. Las diferencias previamente descritas deben explorarse con mayor profundidad, futuros estudios deben profundizar en las diferencias sobre la estructura y la distribución lumínica en varios genotipos de café.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC). Los autores agradecen a Claudia Valencia Vera y Mario Franco Arcila por aportar su experiencia en campo, así como al personal de apoyo en la Estación Experimental Naranjal, por su valiosa colaboración en el registro de la información en el campo.

## LITERATURA CITADA

- Alvarado, G., & Ochoa, H. E. (2006). Características fenotípicas de componentes de variedad Castillo® en dos ambientes. *Revista Cenicafé*, 57(2), 100–121. <http://hdl.handle.net/10778/120>
- Anten, N. P. R. (2016). Optimization and Game Theory in Canopy Models. En K. Hikosaka, Ü. Niinemets, & N. P. R. Anten (Eds.), *Canopy Photosynthesis: From Basics to Applications* (Vol. 42, pp. 355–377). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7291-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7291-4_13)
- Araujo, W. L., Dias, P. C., Moraes, G. A. B. K., Celin, E. F., Cunha, R. L., Barros, R. S., & DaMatta, F. M. (2008). Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 46(10), 884–890. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.05.005>
- Bai, Z., Mao, S., Han, Y., Feng, L., Wang, G., Yang, B., Zhi, X., Fan, Z., Lei, Y., Du, W., & Li, Y. (2016). Study on Light Interception and Biomass Production of Different Cotton Cultivars. *PLOS ONE*, 11(5), e0156335. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156335>
- Bote, A. D., Ayalew, B., Ocho, F. L., Anten, N. P. R., & Vos, J. (2018). Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation levels and rates of nitrogen supply I. Vegetative growth, production and distribution of biomass and radiation use efficiency. *European Journal of Agronomy*, 92, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.10.007>

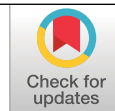
- Campbell, G. S. (1990). Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49(3), 173–176. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90030-A](https://doi.org/10.1016/0168-1923(90)90030-A)
- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (1989). The description and measurement of plant canopy structure. En G. Russell, B. Marshall, & P. G. Jarvis (Eds.), *Plant canopies: Their growth, form and function* (pp. 1–20). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511752308.002>
- Campbell, G. S., & Norman, J. (1998). *An Introduction to Environmental Biophysics* (2nd ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1626-1>
- Castillo, E., Arcila, J., Jaramillo, A., & Sanabria, J. (1996). Estructura del dosel e interceptación de la radiación solar en café *Coffea arabica* L., var. Colombia. *Revista Cenicafe*, 47(1), 5–15. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc047%2801%29005-015.pdf>
- Castillo, E., Arcila, J., Jaramillo, A., & Sanabria, J. (1997). Interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el área foliar de *Coffea arabica* L. *Revista Cenicafe*, 48(3), 182–194. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc048%2803%29182-194.pdf>
- Chaves, A. R. M., Ten-Caten, A., Pinheiro, H. A., Ribeiro, A., & DaMatta, F. M. (2008). Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees. *Trees*, 22(3), 351–361. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0190-7>
- Falster, D. S., & Westoby, M. (2003). Leaf size and angle vary widely across species: What consequences for light interception? *New Phytologist*, 158(3), 509–525. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00765.x>
- Goel, N. S., & Strebel, D. E. (1984). Simple Beta Distribution Representation of Leaf Orientation in Vegetation Canopies. *Agronomy Journal*, 76(5), 800–802. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600050021x>
- Herbert, T. J., & Nilson, T. (1991). A model of variance of photosynthesis between leaves and maximization of whole plant photosynthesis. *Photosynthetica*, 25(1), 597–606.
- Hikosaka, K., & Hirose, T. (1997). Leaf angle as a strategy for light competition: Optimal and evolutionarily stable light-extinction coefficient within a leaf canopy. *Écoscience*, 4(4), 501–507. <https://doi.org/10.1080/11956860.1997.11682429>
- Hirose, T. (2005). Development of the Monsi–Saeki theory on canopy structure and function. *Annals of Botany*, 95(3), 483–494. <https://doi.org/10.1093/aob/mci047>
- Jaramillo, A., & Santos, J. M. (1980). Balance de radiación solar en *Coffea arabica* L., variedades Catuaí y Bourbon amarillo. *Revista Cenicafe*, 31(3), 86–104. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc031%2803%29086-104.pdf>
- King, D. A. (1997). The Functional significance of leaf angle in *Eucalyptus*. *Australian Journal of Botany*, 45(4), 619–639. <https://doi.org/10.1071/BT96063>
- Mansfield, B. D., & Mumm, R. H. (2014). Survey of Plant Density Tolerance in U.S. Maize Germplasm. *Crop Science*, 54(1), 157–173. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.04.0252>
- Matos, F. S., Wolfgramm, R., Gonçalves, F. V., Cavatte, P. C., Ventrella, M. C., & DaMatta, F. M. (2009). Phenotypic plasticity in response to light in the coffee tree. *Environmental and Experimental Botany*, 67(2), 421–427. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.018>
- McFadyen, L. M., Morris, S. G., Oldham, M. A., Huett, D. O., Meyers, N. M., Wood, J., & McConchie, C. A. (2004). The relationship between orchard crowding, light interception, and productivity in macadamia. *Australian Journal of Agricultural Research*, 55(10), 1029–1038. <https://doi.org/10.1071/AR04069>
- Mejía, J. W., Cartagena, J. R., & Riaño, N. M. (2013). Morphometric and Productive Characterization of Nineteen Genotypes from the Colombian Coffea Collection. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 66(2), 7021–7034. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/41144>
- Monsi, M., & Saeki, T. (2005). On the Factor Light in Plant Communities and its Importance for Matter Production. *Annals of Botany*, 95(3), 549–567. <https://doi.org/10.1093/aob/mci052>
- Niinemets, Ü. (2010). A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance. *Ecological Research*, 25(4), 693–714. <https://doi.org/10.1007/s11284-010-0712-4>
- Niinemets, Ü. (2016). Within-Canopy variations in functional leaf traits: structural, chemical and ecological controls and diversity of responses. En K. Hikosaka, Ü. Niinemets, & N. P. R. Anten (Eds.), *Canopy Photosynthesis: From Basics to Applications* (Vol. 42, pp. 101–141). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7291-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7291-4_4)

- Nilson, T. (1971). A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agricultural Meteorology*, 8, 25–38. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90092-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90092-6)
- Norman, J. M., & Campbell, G. S. (1989). Canopy structure. En R. W. Pearcy, J. R. Ehleringer, H. A. Mooney, & P. W. Rundel (Eds.), *Plant Physiological Ecology: Field methods and instrumentation* (pp. 301–325). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-2221-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-94-009-2221-1_14)
- Palmer, J. W., Avery, D. J., & Wertheim, S. J. (1992). Effect of apple tree spacing and summer pruning on leaf area distribution and light interception. *Scientia Horticulturae*, 52(4), 303–312. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(92\)90031-7](https://doi.org/10.1016/0304-4238(92)90031-7)
- Pompelli, M. F., Pompelli, G. M., Cabrini, E. C., Alves, M. C., & Ventrella, M. C. (2012). Leaf anatomy, ultrastructure and plasticity of *Coffea arabica* L. in response to light and nitrogen availability. *Biotemas*, 25(4), 13–28. <https://doi.org/10.5007/2175-7925.2012v25n4p13>
- Rodrigues, W., Tomaz, M. A., Amaral, J. F., Ferrao, M. A., Colodetti, T. V., Apostólico, M. A., & Christo, L. F. (2014). Biometrical studies on characteristics of plagiotropic branches in *Coffea arabica* L. cultivated with high plant density. *Australian Journal of Crop Science*, 8(8), 1239–1247. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1123884>
- Rom, C. R. (1991). Light thresholds for apple tree canopy growth and development. *HortScience*, 26(8), 989–992. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.26.8.989>
- Rosell, J. R., & Sanz, R. (2012). A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 124–141. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.007>
- Ross, J. (1981). *The radiation regime and architecture of plant stands* (Vol. 3). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-8647-3>
- Song, Q., Zhang, G., & Zhu, X.-G. (2013). Optimal crop canopy architecture to maximise canopy photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake under elevated CO<sub>2</sub> – a theoretical study using a mechanistic model of canopy photosynthesis. *Functional Plant Biology*, 40(2), 109–124. <https://doi.org/10.1071/FP12056>
- Tang, L., Yin, D., Chen, C., Yu, D., & Han, W. (2019). Optimal Design of Plant Canopy Based on Light Interception: A Case Study With Loquat. *Frontiers in Plant Science*, 10, 364. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00364>
- Truong, S. K., McCormick, R. F., Rooney, W. L., & Mullet, J. E. (2015). Harnessing Genetic Variation in Leaf Angle to Increase Productivity of *Sorghum bicolor*. *Genetics*, 201(3), 1229–1238. <https://doi.org/10.1534/genetics.115.178608>
- Unigarro, C. A., Hernández, J. D., Montoya, E. C., Medina, R. D., Ibarra, L. N., Carmona, C. Y., & Flórez, C. P. (2015). Estimation of leaf area in coffee leaves (*Coffea arabica* L.) of the Castillo® variety. *Bragantia*, 74(4), 412–416. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0026>
- Unigarro, C. A., Jaramillo, A., & Flórez, C. P. (2017). Evaluation of six leaf angle distribution functions in the Castillo® coffee variety. *Agronomía Colombiana*, 35(1), 23–28. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n1.60063>
- Unigarro, C. A., Jaramillo, A., Ibarra, L. N., & Flórez, C. P. (2016). Estructura del dosel y coeficientes de extinción teóricos en genotipos de café arábico en Colombia. *Acta Agronómica*, 65(4), 383–389. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n4.51899>
- Valladares, F. (1999). Architecture, ecology and evolution of plant crowns. En F. I. Pugnaire & F. Valladares (Eds.), *Handbook of functional plant ecology* (pp. 121–194). Marcel Dekker.
- van Zanten, M., Pons, T. L., Janssen, J. A. M., Voesenek, L. A. C. J., & Peeters, A. J. M. (2010). On the relevance and control of leaf angle. *Critical Reviews in Plant Science*, 29(5), 300–316. <https://doi.org/10.1080/07352689.2010.502086>
- Wang, W. M., Li, Z. L., & Su, H. B. (2007). Comparison of leaf angle distribution functions: effects on extinction coefficient and fraction of sunlit foliage. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(1-2), 106–122. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.003>
- Yan, G., Hu, R., Luo, J., Weiss, M., Jiang, H., Mu, X., Xie, D., & Zhang, W. (2019). Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 390–411. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.033>
- Zhang, W., Tang, L., Yang, X., Liu, L., Cao, W., & Zhu, Y. (2015). A simulation model for predicting canopy structure and light distribution in wheat. *European Journal of Agronomy*, 67, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.02.010>

# IDENTIFICACIÓN DE ALGUNAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS ASOCIADAS CON EL DEFECTO REPOSO EN EL CAFÉ

Claudia Patricia Gallego Agudelo \*, Nelson Rodríguez Valencia \*\*

Gallego, C. P., & Rodríguez-Valencia, N. (2021). Identificación de algunas variables fisicoquímicas y microbiológicas asociadas con el defecto reposo en el café. *Revista Cenicafé*, 72(1), e72105. <https://doi.org/10.38141/10778/72105>



Con el objetivo de identificar la relación de algunas características físico-químicas y microbiológicas asociadas al defecto reposo en café, se desarrolló esta investigación en etapas: I) café pergamino seco con defecto (CD) y sin defecto (SD), donde se evaluaron variables físicas, químicas, microbiológicas y sensoriales; II) las características citadas se evaluaron para encontrar la asociación con las muestras CD; III) se verificó el efecto del almacenamiento del café pergamino en el defecto reposo, en el tiempo. Con respecto a la calidad sensorial (escala SCA), las muestras CD presentaron menores calificaciones en las variables sabor, sabor residual, acidez, cuerpo y balance. El café CD presentó menores valores en porcentaje de almendra sana y de humedad, y mayor factor de rendimiento en trilla. El contenido de lípidos totales y ácido esteárico en CD fue 11,9% y 7,9%, respectivamente. El ácido linoleico predominó en café SD (37,43%). La evaluación microbiológica no mostró variaciones en los dos tipos de café. En la etapa II, el defecto reposo fue más frecuente en el café con contenido de almendra sana menor al 71%. A partir de los 60 días de almacenamiento en pergamino, hubo incrementos en el contenido de ácido esteárico en las muestras almacenadas (no significativos), y a los 120 días hubo cambios significativos en el puntaje del análisis sensorial, asociados con la aparición del defecto reposo. El porcentaje de almendra sana, el contenido de ácido esteárico y la actividad de la polifenoloxidasas se identificaron como indicadores de la presencia del defecto reposo en café.

**Palabras claves:** Café, defecto reposo, almacenamiento, ácido esteárico, lípidos, factor de rendimiento, almendra sana, calidad sensorial, polifenoloxidasas.

## IDENTIFICATION OF SOME PHYSICOCHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL VARIABLES RELATED TO AGED COFFEE

In order to identify the relation among some physicochemical and microbiological characteristics associated to aged coffee, this research was carried out in three stages: I) The physical, chemical, microbiological and sensory variables of dry coffee with defect (CD) and without defect (SD) were evaluated. II) The relation of such characteristics to the CD samples were analyzed, and III) The storage effect on dry coffee regarding the aged defect over time was verified. With respect to the sensory quality evaluated with the SCA scale, the CD samples showed lower percentage values in the variables taste, residual taste, acidity, body and balance. CD coffee showed lower percentage values of healthy green beans and moisture, and higher threshing yield factor. The content of total lipids and stearic acid in CD was 11.9% and 7.9%, respectively. Linoleic acid predominated in SD (37.43%). The microbiological evaluation did not indicate variations in the two types of coffee. In stage II, the aged coffee defect was more frequent in coffee with less than 71% of healthy green coffee. After 60 days of storage, dry coffee showed an increase (not meaningful) of stearic acid content in the stored samples, and after 120 days there were statistically significant changes in the score of the sensory analysis associated with the appearance of the aged coffee defect. The percentage of healthy green coffee, the content of stearic acid and the activity of polyphenoloxidase (PFO) were identified as possible indicators of aged coffee.

**Keywords:** Coffee, aged coffee defect, storage, stearic acid, lipids, yield factor, healthy green coffee, sensory quality, polyphenoloxidase.

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

\*\* Investigador Científico III. Disciplina de Poscosecha, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-0897-4013>



El cultivo del café representa uno de los productos agrícolas de mayor importancia de Colombia, dado que contribuye con la economía nacional, al tiempo de ser el sustento de más de 540.000 familias que se dedican a su producción, el cual se cultiva en las zonas montañosas del país y es reconocido en el mundo, no solo por la cantidad que se exporta, sino por su calidad. Hasta la fecha se han reportado alrededor de 126 especies de café, pero solo la especie *Coffea arabica* L representa importancia económica para Colombia; esta especie es responsable de cerca del 70% de la producción mundial del grano, la producción restante se le atribuye a la especie *Coffea canephora*.

Actualmente, todos los actores de la cadena productiva de café se encuentran en búsqueda de estrategias que apunten al sostenimiento de la producción y al mantenimiento de la calidad del café colombiano, en todo el sistema de producción. Sobre este aspecto, se destaca el seguimiento a las variables asociadas con el aspecto físico del grano, las cuales se reflejan significativamente en la calidad en taza. Almacafé, que es el operador logístico de la Federación Nacional de Cafeteros-FNC, registra que, del total de defectos sensoriales encontrados en el café para comercialización en los centros de acopio del país, el reposo constituye el tercer defecto más predominante (14,8%), solo superado por el fermento (41,9%) y el químico y fenol (33,5%) (Almacafé, 2015). El defecto reposo se caracteriza por el aspecto decolorado (verde muy claro) en los granos de café almendra y un sabor a madera, amargo, sucio y pesado en la bebida de café (Puerta, 2015).

Las características físicas, químicas y biológicas del grano pueden variar en el tiempo, a lo largo de todo el proceso productivo y de comercialización, y durante el almacenamiento, alterando la composición química de los granos

y sus características sensoriales. Desde el punto de vista físico-químico, el contenido de lípidos (Amorim, 1978), la acidez titulable, la actividad enzimática, la actividad del agua (Multon, 1991) y el contenido proteico (Borem et al., 2013; Coelho et al., 2001) entre otros, constituyen un importante conjunto de condiciones de particular atención, pues de sus niveles en el grano, depende significativamente la calidad en taza. Así mismo, el contenido de ácidos grasos libres y de ácidos grasos poli-insaturados influyen significativamente en la calidad durante el almacenamiento de los granos de café verde (Nikolova-Damyanova et al., 1998).

Hasta el momento, la detección del defecto reposo ha estado centrada en el análisis sensorial o prueba en taza, haciéndose necesario identificar cuáles son los principales cambios que ocurren en el grano durante su envejecimiento, mediante pruebas físico-químicas. Algunos trabajos reportados, en este aspecto, son los realizados en Brasil por Rendón et al. (2014), quienes estudiaron los cambios sensoriales en el almacenamiento de los granos de café durante 15 meses, concluyendo que estos ocurren principalmente debido a la oxidación de lípidos y son responsables por la pérdida del valor comercial del café. Durante el período de almacenamiento, se registraron cambios en el contenido de ácidos grasos libres, con incrementos entre 1,78 y 2,47 mg g<sup>-1</sup> de aceite. De igual forma, la intensidad del sabor a café reposado, en la infusión de café, aumentó durante el almacenamiento entre 3,4 y 3,5 unidades, en la escala utilizada en la evaluación, y la concentración del ácido 5-cafeoilquinico disminuyó en el almacenamiento entre el 6,12% y el 11,54%. También hubo pérdidas en la viabilidad de la semilla, el color de la almendra y la estructura celular. Concluyendo que la oxidación sería la responsable de la pérdida de estructura celular, viabilidad de la semilla y los cambios sensoriales.

En Colombia, Pazmiño-Arteaga et al. (2019), realizaron estudios para discriminar entre café con defecto reposo y sin defecto, utilizando *Coffea arabica* colombiano argumentando que el defecto reposo se presenta por el almacenamiento prolongado y por cambios en los perfiles lipídicos del grano. Dado que el análisis de componentes (PCA) fue insuficiente para clasificar entre muestras con y sin el defecto reposo, desarrollaron un modelo forestal, que demostró una especificidad del 72% para detectar café con defecto reposo.

Esta investigación tuvo como objetivo identificar algunas de las variables fisico-químicas, enzimáticas y microbiológicas asociadas a la aparición del defecto reposo en el café, buscando, a través de la hipótesis de trabajo, una o varias variables que se constituyeran en indicadores de la presencia del defecto reposo en la bebida de café.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Etapa I.** Se identificaron las variables físicas, químicas, enzimáticas y microbiológicas asociadas al defecto reposo. Para tal fin, se evaluaron muestras de café con calidad sensorial y procedencia conocida. Para ello, se emplearon 30 muestras de café pergamino seco así: 15 muestras con la presencia del defecto reposo y 15 muestras sin el defecto; cada una constituyó la unidad experimental. Una vez clasificados los dos grupos de muestras con y sin defecto reposo, se determinaron las siguientes variables de respuesta, en cada una de ellas: análisis físico (granulometría, porcentaje de granos decolorados, humedad del grano); análisis químico (ácidos clorogénicos totales, pH, acidez titulable, proteínas solubles, lípidos totales, ácidos grasos); análisis microbiológico (recuento total de bacterias aerobias mesófilas, recuento de hongos y levaduras); actividad enzimática de la polifenoloxidasas; análisis sensorial del café, el cual se realizó bajo los

criterios de calificación de la escala SCA (*Specialty Coffee Association*) para el café.

**Etapa II.** En esta etapa se corroboraron las variables que fueron identificadas en la etapa I, asociadas al defecto reposo, en 30 muestras de café codificadas “*blind test*”.

**Etapa III.** Se hizo una verificación donde las variables identificadas, en las etapas anteriores, se asociaron con la aparición del defecto reposo durante el almacenamiento. Para ello, se recibieron diez muestras de café sin defecto, las cuales fueron almacenadas bajo condiciones de temperatura en el intervalo entre 16 y 18°C y humedad relativa entre 65% y 75%. Estas muestras se sometieron a pruebas fisico-químicas y enzimáticas, en periodos de 0 – 60 – 120 y 210 días en almacenamiento.

**Análisis de la información.** Se realizaron las determinaciones analíticas al café almendra como una contribución directa de la evaluación de los cambios durante el almacenamiento del café pergamino. En la Tabla 1 se presentan los tipos de análisis, la matriz (tipo de muestra) y los métodos empleados para cada grupo. Para las variables de interés se estimaron el promedio y el error estándar. Se aplicó el análisis de varianza de una vía, al 5%, para evaluar los grupos, con todas y cada una de las variables de interés. Se aplicó la prueba de diferencia mínima significativa, al 5%, en aquellos casos donde el análisis mostró efecto de grupo.

Después de determinar el efecto de cada una de las variables sobre el defecto reposo, se evaluó el efecto conjunto de las variables de estudio a partir de un análisis discriminante, con el fin de determinar si hay una relación entre variables que permitan determinar a qué grupo pertenece la muestra (con defecto o sin defecto). Además, se realizó un análisis discriminante cuadrático (QDA) y un análisis

discriminante por pasos, para seleccionar un subconjunto de las variables cuantitativas, que pudieran usarse en la discriminación entre los grupos de muestras.

**Análisis físico y granulométrico.** Este análisis se realizó bajo los estándares y procedimientos del laboratorio de la Disciplina de Calidad de Cenicafé (PACFS-11-12). La muestra de café se homogeneizó en dos momentos seguidos, en el equipo divisor Boemer. Se tomaron 400 g del café homogeneizado y se determinó la humedad en el medidor KAPPA. A través de criterios

visuales y olfativos, se efectuó la calificación de la masa del café en sus aspectos: color, olor y apariencia. Seguido, se extendió el café en una superficie plana para identificar, separar y tomar peso de los granos pelados, tipo guayaba y semi-despulpados e impurezas en general. Posteriormente, la muestra de café pergamino seco con sus defectos, pero sin las impurezas, se homogeneizó nuevamente. Se trillaron 250 g de café, tanto el cisco como el café almendra resultantes se discriminaron por separado para tomar sus respectivos pesos. Este procedimiento permitió calcular el porcentaje de merma.

**Tabla 1.** Variables y métodos empleados para su determinación.

Variable a medir	Tipo de muestra	Método/Fuente
Análisis sensorial	Café tostado molido	Calidad sensorial/SCA
Análisis físico/granulometría	Café pergamino /almendra	Calidad física grano decolorado/ PACFS-11-12
Humedad del grano	Café pergamino /almendra	Gravimétrico/ISO6673/AOAC 925.45
pH	Café tostado molido	Potenciométrico/AOAC 973.46
Acidez titulable	Café tostado molido	Titulométrico/AOAC 942.15
Hongos y levaduras	Café almendra	Microbiológico conteo en placa/NTC 4132/ AOAC 997.02
Aerobios mesófilos	Café almendra	Microbiológico conteo en placa/AOAC 966.23/AOAC 2002.07
Lípidos totales	Café almendra molido	Gravimétrico Soxhlet/ AOAC 945.16 (Latimer & Horwitz, 2005)
Ácidos grasos libres	Café almendra molido	Cromatografía de gases/Espectrometría de masas (GC/MS) AOAC 969.33
Ácidos clorogénicos totales	Café almendra molido	Espectrofotométrico/AOAC 14.025
Proteínas solubles	Café almendra molido	Espectrofotométrico/(Bradford, 1976)
Actividad enzimática (PFO)	Café almendra molido	Espectrofotométrico UV/VIS

**Análisis sensorial.** Se realizó en el Panel de Catación de Cenicafé, siguiendo el protocolo de preparación y análisis sensorial SCA. En las muestras se evaluaron atributos del sabor del café, como: fragancia/aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance, uniformidad, taza limpia, dulzor, puntaje del catador y puntaje total. Estos atributos fueron evaluados en una escala de 16 puntos, representando el nivel de calidad en una tabla entre 6 y 9 puntos.

**Humedad del grano.** Se basó en la pérdida de peso del café verde en grano. En una caja de Petri se pesaron 10 g de café verde y se dejaron en una estufa a una temperatura de 105°C, durante 16 horas (Método ISO 1447).

**Lípidos totales.** Consistió en una extracción sólido-líquido. Se utilizó éter de petróleo 40-60 como solvente de extracción. Se tomaron 10 g de café verde molido, se transfirieron a un dedal de celulosa, el cual se colocó en contacto con 450 mL de éter de petróleo (40-60) en un montaje Soxhlet, durante 24 h, en dos fases de extracción; una en caliente (en contacto directo con el solvente) y otra posterior, en frío con recirculación del solvente. El contenido de grasa se cuantificó por diferencia de peso (AOAC 945.16) (Latimer & Horwitz, 2005).

**Ácidos grasos.** Se tomaron 100 µL de muestra a partir del extracto lipídico de café, se adicionó 1 mL de trifloruro de boro al 20% en metanol. Se dejó en reacción por 40 min a 80°C. Se realizó una extracción de los metilésteres de ácidos grasos con dos extracciones sucesivas de 1 mL de hexano. Posteriormente, se inyectó en el cromatógrafo de gases acoplado al detector de masas (AOAC 969.33). La identificación de los metilésteres de ácidos grasos en el aceite de café se realizó mediante la comparación de los tiempos de retención de sus ésteres metílicos, con los de una mezcla de estándares de metilésteres de ácidos grasos, analizados bajo las mismas condiciones cromatográficas.

**Ácidos clorogénicos totales.** Se determinó cuantitativamente por medio de espectrofotometría de UV-VIS mediante la absorción ultravioleta a longitudes de onda cercanas a 265, 328 y 380 nm.

**Proteínas solubles.** Se determinó con base a una curva de calibración de concentración de proteína vs absorbancia, por medio del método de análisis Bradford, y se expresó como microgramos de proteína por mililitro de solución de extracto de café verde (µg mL<sup>-1</sup>). Se evaluó en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 595 nm.

**Actividad de la polifenoloxidas.** Se determinó en café verde molido diluido en búfer fosfato a pH 6,0. La mezcla se filtró y centrifugó a 10.000 rpm, se llevó a una columna de filtración con vacío en una cámara de extracción, aplicando presión se vació gradualmente. El extracto obtenido se colocó en reacción con L-DOPA (3 mg mL<sup>-1</sup> en solución búfer fosfato) en relación 2:1 (v/v). El cambio de absorbancia se midió en un espectrofotómetro a 480 nm, cada minuto, durante 10 min. Dicho procedimiento permitió determinar las micro moles extinguidas por segundo y se relacionó con el contenido proteico de la muestra.

**Análisis microbiológicos.** Se tomaron asépticamente, en un frasco, 50 g de café y se sumergieron en 450 mL de agua peptonada al 0,1%. Se agitó la muestra y se realizaron diluciones seriales de esta preparación, desde 10<sup>-1</sup> hasta 10<sup>-4</sup>. Se realizó la siembra de la muestra en superficie en dos cajas de agar plate count y agar nutritivo. Se incubaron las cajas a una temperatura de 37°C, durante 24 a 48 h. Se seleccionaron las colonias que crecieron y se aislaron en agar plate count y agar nutritivo, hasta la obtención de un cultivo puro. Posteriormente, se realizaron observaciones macro y microscópicas y pruebas bioquímicas (AOAC 966.23-997.02-2002.07).



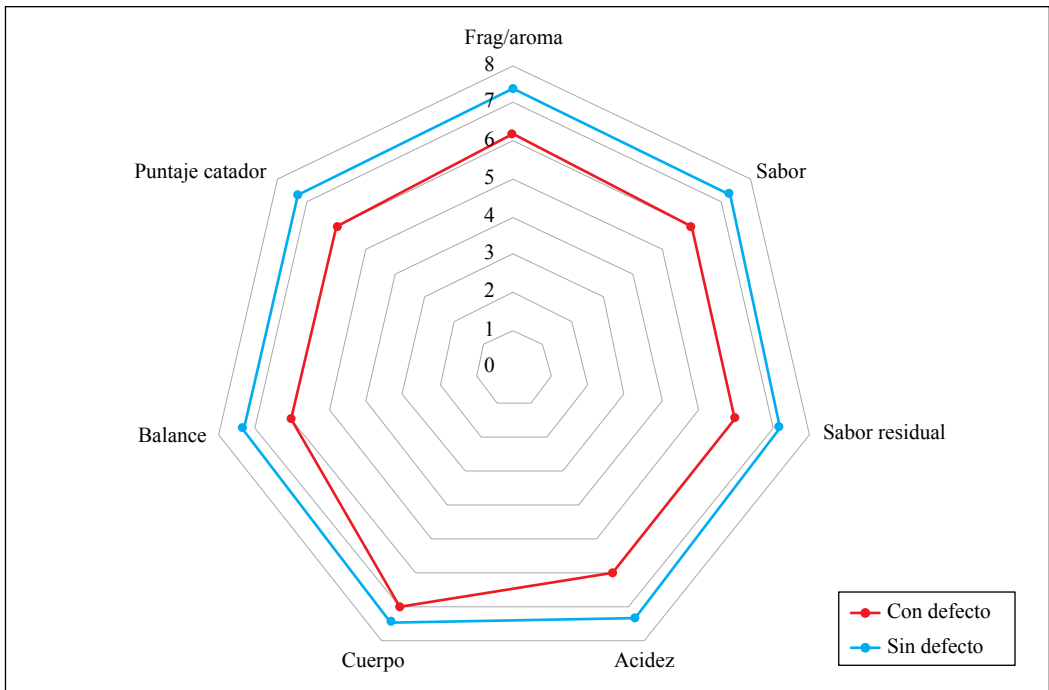
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Etapa I

Los resultados del análisis sensorial permitieron establecer las siguientes tendencias: para las muestras con el defecto reposo (CD) se presentaron descriptivamente menores calificaciones en las variables sabor, sabor residual, acidez, cuerpo y balance, respecto a las muestras sin el defecto reposo (SD), recibiendo el puntaje más bajo de la escala por atributo, que es 6. El puntaje total de las muestras sin defecto fue de 81,3 en promedio, valor que las clasifica como café con calidad especial, y para muestras con defecto el puntaje fue de 53,2, valor por debajo del grado de especial (Figura 1). El puntaje total permitió establecer un diferencial de 28 puntos. Los valores en

las muestras sin defecto se encuentran dentro de los rangos reportados para cafés lavados de buena calidad por fermentación natural (Ribeiro et al., 2017).

Los resultados obtenidos están en concordancia con lo expresado por Puerta (2015), quien define que el café con defecto reposo presenta un envejecimiento irreversible, detectable en la evaluación sensorial, dando como resultado sabores a madera, viejo y moho (Puerta, 2001). Investigaciones previas demuestran cómo los atributos de la calidad sensorial están claramente determinados por las condiciones agroecológicas donde se desarrolla el sistema de producción (Bote & Vos, 2017), y queda en evidencia que el almacenamiento constituye una etapa decisiva que preserva o modifica las características del café.



**Figura 1.** Calidad de la bebida de café con y sin defecto reposo. Escala de calificación SCA: 6,00 (buena), 7,00 (muy buena), 8,00 (excelente), 9,00 (sobresaliente).

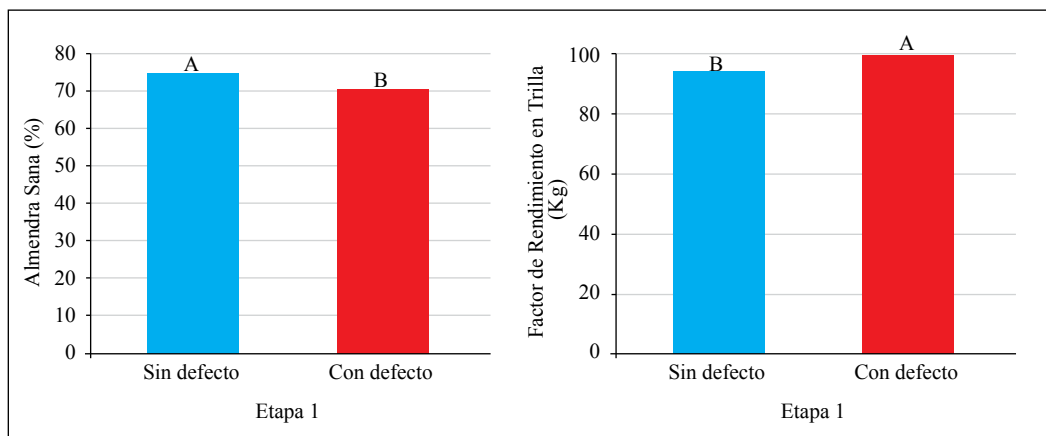
**Calidad física del grano.** El grano de café sano y seco debe tener un contenido de humedad entre 10% y el 12%, con el fin de conservar el café almacenado hasta 10 meses y con una humedad relativa entre el 65% y el 70% en bodega de almacenamiento (Puerta, 2013). Aunque estas condiciones se cumplieron en el almacenamiento de las muestras, con un contenido de humedad dentro del rango establecido, aquellas muestras con un porcentaje de humedad inferior presentaron defecto reposo con mayor frecuencia. Las muestras con defecto presentaron una disminución del porcentaje de almendra sana y un aumento en el factor de rendimiento en trilla, con valores de 71,19% y 99,24 kg, respectivamente (Figura 2). Para las demás variables físicas no se encontraron diferencias estadísticas significativas.

**Composición química y enzimática del grano (lípidos totales, ácidos grasos y ácidos clorogénicos, proteínas totales y actividad de la polifenoloxidasasa PFO).** Los contenidos de lípidos totales y ácidos grasos libres en las muestras evaluadas, con defecto y sin defecto reposo (muestras previamente separadas de las pasillas), presentan diferencias estadísticas

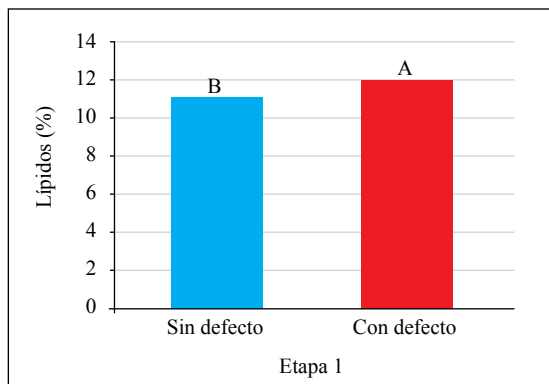
significativas, siendo mayor el contenido de lípidos para las muestras con defecto reposo (Figura 3). Los lípidos totales presentaron un porcentaje promedio del  $11,87\% \pm 0,15$  en café con defecto reposo y  $11,00\% \pm 0,15$  en café sin defecto.

Los resultados obtenidos son coherentes con los de Rendón et al. (2014), en Brasil, quienes reportan valores iniciales de lípidos del 12% en los granos de café, antes del almacenamiento, y establecen que se presenta una oxidación de lípidos en el grano después de 15 meses de almacenamiento, debido a cambios en el contenido de ácidos grasos libres entre 1,78 y 2,47 mg g<sup>-1</sup> de aceite, pasando de valores iniciales entre 1,37 y 1,89 mg g<sup>-1</sup> de aceite en los granos antes del almacenamiento a valores de 3,84 y 3,67 mg g<sup>-1</sup> de aceite, después del almacenamiento.

Con relación a los ácidos grasos libres presentes en la fracción lipídica, el ácido linoleico se encontró en mayor contenido en las muestras sin defecto reposo (37,43%), mientras que en las muestras con defecto el ácido esteárico fue el que presentó el mayor



**Figura 2.** Porcentaje de almendra sana y factor de rendimiento en trilla para café con y sin defecto reposo. Letras distintas indican diferencia estadística según prueba DMS al 5%.



**Figura 3.** Contenido de lípidos totales en café, con y sin defecto reposo. Letras distintas indican diferencia estadística según prueba DMS al 5%.

valor (7,9%), con diferencias estadísticas para estos dos ácidos grasos en las muestras de café con y sin defecto. Para los demás ácidos grasos libres como el araquídico, oleico y palmítico no hubo diferencias significativas (Figura 4).

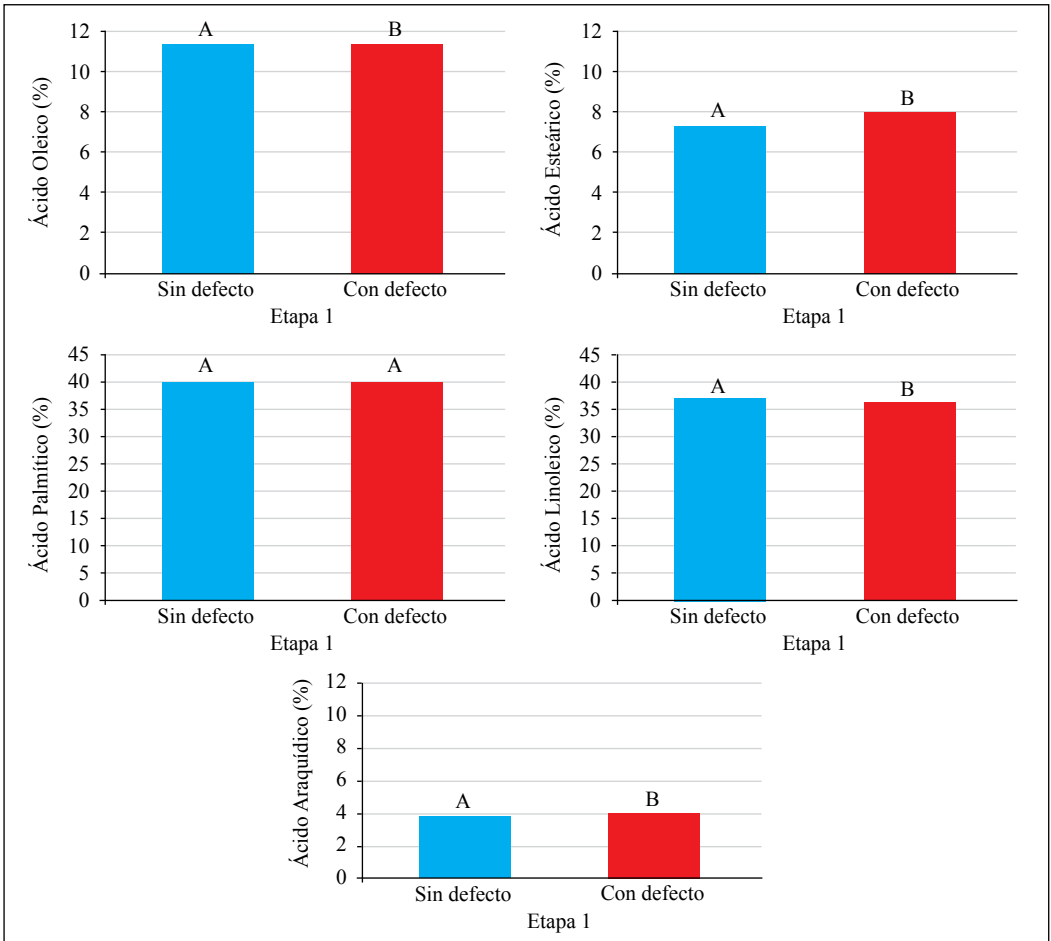
Respecto a los contenidos de ácidos clorogénicos totales, en la Figura 5 se observa que no hubo diferencias significativas en muestras con y sin defecto reposo. En promedio, las muestras de café presentaron 4,5% de ácidos clorogénicos totales, valor por debajo de los promedios reportados por Puerta (2013), para café arábica de frutos maduros que lo sitúa en el rango entre 5,24% y 7,61%.

En cuanto a los ácidos clorogénicos, Rendón et al. (2014) reportan que son los componentes principales de la fracción fenólica de los granos de café, siendo el compuesto principal el 5-CQA (Ácido 5-cafeoilquinico), el cual disminuyó entre 6,12% a 11,54% durante 15 meses de almacenamiento de los granos de café, pasando de valores iniciales en el café antes del almacenamiento entre 4,9 g/100 g y 5,2 g/100 g a valores de 4,6 g/100 g después del almacenamiento. La disminución en el contenido de 5-CQA durante el almacenamiento se debe probablemente a oxidación enzimática y no enzimática.

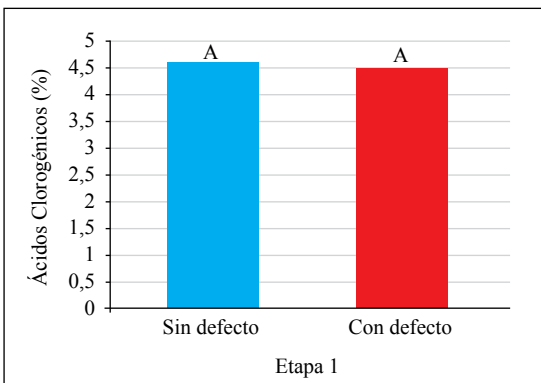
Para el contenido de proteína total, el promedio fluctuó entre 5,20% y 5,37% para las muestras sin y con defecto reposo, respectivamente (Figura 6), sin registrarse diferencias significativas entre uno y otro tipo de café.

**Análisis microbiológico de los granos.** Desde el punto microbiológico, defectos como el reposo pueden ser consecuencia del crecimiento de microorganismos, que pueden conducir a la manifestación de toxinas en el café como la ochratoxina A (OTA), entre las que se destaca la presencia de *Aspergillus* sp. (Perrone et al., 2007).

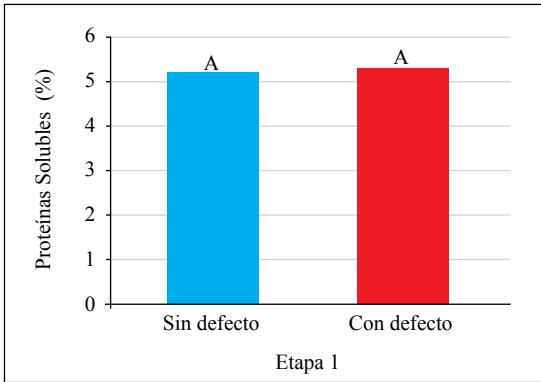
El recuento de hongos, levaduras y bacterias mesófilas en las muestras con y sin defecto fue estadísticamente igual; sin embargo, descriptivamente, se observó que el género *Penicillium* spp. (73%) fue el de mayor porcentaje de frecuencia en las muestras con defecto respecto a los otros tipos de hongos evaluados para este tipo de café, con un valor inferior al registrado en las muestras sin defecto (93%). En el recuento de hongos, en las muestras de café con el defecto reposo se registraron *Penicillium* spp, seguido de *Aspergillus* spp. y *Fusarium* spp., cuyos porcentajes de aparición fueron de 53% y 47%, respectivamente, y de 33%



**Figura 4.** Composición de ácidos grasos en café con y sin defecto reposo. Letras distintas indican diferencia estadística según prueba DMS al 5%.



**Figura 5.** Contenido de ácidos clorogénicos totales en café con y sin defecto reposo. Letras distintas indican diferencia estadística según prueba DMS al 5%.



**Figura 6.** Porcentaje de proteínas solubles en café con y sin defecto reposo. Letras distintas indican diferencia estadística según prueba DMS al 5%.

y 40%, en las muestras de café sin defecto. Los demás géneros de hongos evaluados en el café con defecto se presentaron en un porcentaje inferior al 33%. Las bacterias mesófilas y levaduras estuvieron en un mismo nivel de frecuencia en el café con el defecto reposo (67%), estando las bacterias mesófilas con una frecuencia de aparición menor en el café sin defecto (60%) y las levaduras

con una frecuencia de aparición mayor en el café sin defecto (80%) (Tabla 2). De otro lado, para el recuento de hongos en las muestras de café sin defecto, exceptuando a los géneros *Penicillium* spp y *Aspergillus niger* que se manifestaron en más del 60% de las muestras, los demás géneros encontrados se observaron con una frecuencia inferior del 40%.

**Tabla 2.** Porcentaje de microorganismos en muestras con y sin defecto reposo. Etapa I.

Microorganismos	Con defecto		Sin defecto	
	Ausencia	Presencia	Ausencia	Presencia
<i>Penicillium</i> spp	27	73	7	93
<i>Aspergillus</i> spp	47	53	67	33
<i>Aspergillus niger</i>	73	27	40	60
<i>Aspergillus ochraceus</i>	73	27	73	27
<b>Hongos</b> <i>Aspergillus fumigatus</i>	93	7	93	7
<i>Aspergillus flavus</i>	67	33	67	33
<i>Rhizopus</i> spp	93	7	80	20
<i>Cladosporium</i> spp	87	13	80	20
<i>Fusarium</i> spp	53	47	60	40
<b>Bacterias</b> Bacterias mesófilas	33	67	40	60
<b>Levaduras</b> Levaduras	33	67	20	80

En la Tabla 3 se presenta un resumen de las características físicas, químicas y microbiológicas evaluadas en la Etapa I del estudio, para el café con y sin el defecto reposo.

De acuerdo con los resultados condensados en la Tabla 3, para la Etapa I del estudio se observan diferencias estadísticas, a un nivel de significancia del 5%, entre el café con y sin el defecto reposo en las variables físicas almendra sana y factor de rendimiento; en

las variables químicas, lípidos totales, ácido linoleico y ácido esteárico; en la variable enzimática de la polifenoloxidasas; y en la prueba sensorial.

La prueba de diferencia mínima significativa indicó diferencias a favor de las muestras sin defecto reposo en las variables: almendra sana, prueba en taza, factor de rendimiento y ácido linoleico; el análisis de varianza mostró efecto de grupos, para al menos una de las variables fisicoquímicas y enzimáticas.

**Tabla 3.** Promedio y desviación estándar (D.E.) para cada una de las variables evaluadas en muestras de café, con y sin defecto reposo, en la Etapa I del estudio.

Variables	Con defecto		Sin defecto		
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	
<b>Físicas</b>	Almendra sana (%)	71,19 B	2,63	75,42 A	3,59
	Factor de rendimiento trilla (kg)	99,24 A	3,53	93,61 B	4,51
	Acidez (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	1763,93 A	308,65	1822,87 A	273,74
	pH (Unidades)	4,87 A	0,10	4,87 A	0,10
	Humedad (%)	11,81 A	0,24	11,95 A	0,43
	Grano decolorado (%)	5,36 A	1,85	4,06 A	3,32
<b>Sensorial</b>	Prueba sensorial (SCA)	53,14 B	0,36	81,37 A	1,11
<b>Químicas</b>	Lípidos totales (%)	11,87 A	0,86	11,06 B	1,01
	Ácido linoleico (%)	36,34 B	1,37	37,43 A	1,27
	Ácido esteárico (%)	7,89 A	0,38	7,36 B	0,48
	Ácido palmítico (%)	40,28 A	1,00	40,02 A	0,86
	Ácido oleico (%)	11,33 A	0,31	11,35 A	0,71
	Ácido araquídico (%)	4,01 A	0,37	3,85 A	0,23
	Ácidos clorogénicos (%)	4,49 A	0,57	4,60 A	0,59
	Proteínas totales (%)	5,37 A	0,45	5,20 A	0,30
<b>Enzimática</b>	Polifenoloxidasas (UE)	0,000167 B	0,00008	0,00019 A	0,0001
<b>Microbiológicos</b>	Hongos (UFC/mL)	58643 A	60035	107000 A	0,30
	Levaduras (UFC/mL)	8429 A	26404	31133 A	0,0001
	Bacterias mesófilas (UFC/mL)	18571 A	40765	64700 A	0,00005

Lo anterior permitió corroborar la hipótesis de investigación, donde por lo menos con una variable fisicoquímica o enzimática se identifica el defecto reposo del café.

## Etapa II

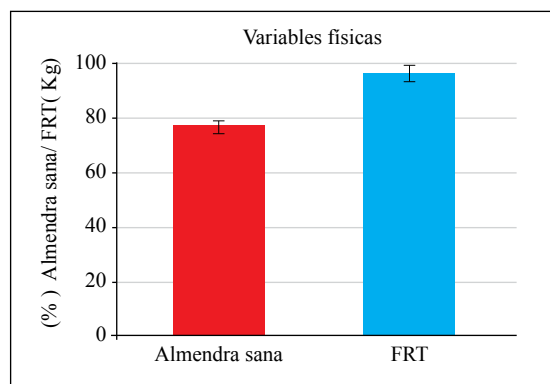
Con base en la identificación de las variables, realizada en la primera etapa del estudio, en la Etapa II se corroboraron las variables fisicoquímicas y enzimática para 30 muestras de café (muestras “a ciegas”), las cuales presentaron el defecto reposo.

**Calidad física del grano.** Para la variable almendra sana, el promedio obtenido para el café con el defecto reposo fue del 75,22%, mayor al promedio obtenido en la Etapa I (71,19%) y ligeramente inferior al valor promedio encontrado en la primera etapa para el café sin defecto, que fue de 75,42%. Se infiere que el defecto reposo tiende a generarse, con mayor frecuencia, en la medida en que el café presente bajos porcentajes de almendra sana, con lo cual se desarrollan granos decolorados/reposados.

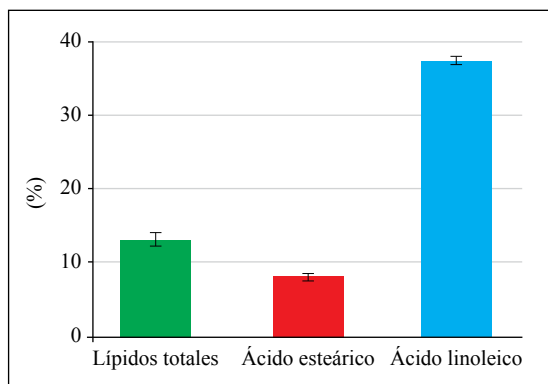
Con relación al factor de rendimiento en trilla (FRT), las muestras con defecto presentaron un valor promedio de 95,11 kg, menor al valor promedio encontrado en la

Etapa I, que fue de 99,24 kg y mayor al valor promedio encontrado en la primera etapa para el café sin defecto, que fue de 93,61 kg (Figura 7, Tabla 4). Esta condición ratifica que el café con el defecto reposo puede presentarse con una mayor probabilidad en el café con altos factores de rendimiento en trilla; con base en lo anterior, puede inferirse que el defecto reposo guarda una estrecha relación con la calidad física del grano y, por ende, se refleja en la calidad sensorial de la bebida.

**Composición química del grano (lípidos totales y ácidos grasos libres).** La evaluación de la composición química del café con defecto reposo en sus variables, lípidos totales y ácidos grasos (esteárico, y linoleico) permitió detectar que, con la manifestación del defecto reposo disminuye el contenido de ácido linoleico (37,42% en la Etapa II y 36,34% en la Etapa I), comparado con el valor presentado en el café sin defecto (37,43%), se incrementa el contenido de ácido esteárico (8,10% en la Etapa II y 7,89% en la Etapa I), comparado con el valor presentado en el café sin defecto (7,36%), y se incrementa el contenido de lípidos totales (13,19% en la Etapa II y 11,87% en la Etapa I), comparado con el valor presentado en el café sin defecto (11,06%), tal como se presenta en la Figura 8 y en la Tabla 4.



**Figura 7.** Promedios e intervalos de confianza al 95% para el porcentaje de almendra sana y el factor de rendimiento en trilla (FRT) en café con defecto reposo. Etapa II.



**Figura 8.** Promedios e intervalos de confianza al 95% en la variación en el contenido de lípidos totales y de los ácidos grasos linoleico y esteárico en el café con defecto reposo.

**Tabla 4.** Promedio e intervalos de confianza para las variables estudiadas asociadas al defecto reposo.

Variable	Intervalos de confianza al 95%		
	Promedio	Límite inferior	Límite superior
Almendra sana (%)	75,22	73,26	77,18
Factor rendimiento (kg)	95,11	91,90	98,33
Lípidos (%)	13,19	12,46	13,94
Ácido linoleico (%)	37,42	36,94	37,89
Ácido esteárico (%)	8,10	7,87	8,32

Luego de determinar el efecto de cada una de las variables estudiadas sobre el defecto reposo en el café, se evaluó el efecto conjunto de las variables objeto de estudio, a partir de un análisis discriminante, con el fin de determinar si se presentaba una relación entre variables que permitiera inferir a qué grupo pertenece una muestra (con defecto o sin defecto reposo). Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un análisis discriminante por pasos, para seleccionar un subconjunto de las variables cuantitativas fisicoquímicas, que pudieran usarse en la discriminación entre los grupos de muestras.

Con el análisis discriminante se determinó que las variables que más explican la

condición de reposo en el café son: el factor de rendimiento en trilla, el contenido de ácido esteárico y la actividad enzimática de la polifenoloxidas (PFO) (Tabla 5, Figura 9). Para el factor de rendimiento en trilla se encontró homogeneidad en las matrices de covarianza interna ( $P < 0,7530$ ). Teniendo en cuenta que el factor de rendimiento en trilla está relacionado con la variable almendra sana, empleada en la comercialización de café, se utilizó esta variable para realizar el análisis discriminante, usando una función lineal discriminante, con una clasificación del 93,3% para las muestras con defecto reposo y del 86,7% para las muestras sin defecto, con errores de clasificación del 6,7% y 13,3%, respectivamente.



**Tabla 5.** Análisis discriminante por pasos en variables cuantitativas.

Resumen de selección paso a paso								
Paso	Ingreso	Parcial R-cuadrado	F valor	Pr> F	Wilks' Lambda	Pr < Lambda	Correlación Prom. cuadrado	Pr > ASCC
1	<b>Factor rendimiento</b>	0,3442	14,70	0,0007	0,65575924	0,0007	0,34424076	0,0007
2	<b>Ácido esteárico</b>	0,3196	12,68	0,0014	0,44621010	<0,0001	0,55378990	<0,0001
3	<b>Polifenol oxidasa</b>	0,2128	7,03	0,0135	0,35124109	<0,0001	0,64875891	<0,0001

Con las muestras de la Etapa II de la investigación (muestras a ciegas), se validó la función discriminante obtenida, logrando una clasificación correcta del 76,7% de las muestras, a partir de las variables ácido esteárico y la actividad enzimática de la polifenoloxidasa (PFO), confirmando los resultados de la primera fase del estudio.

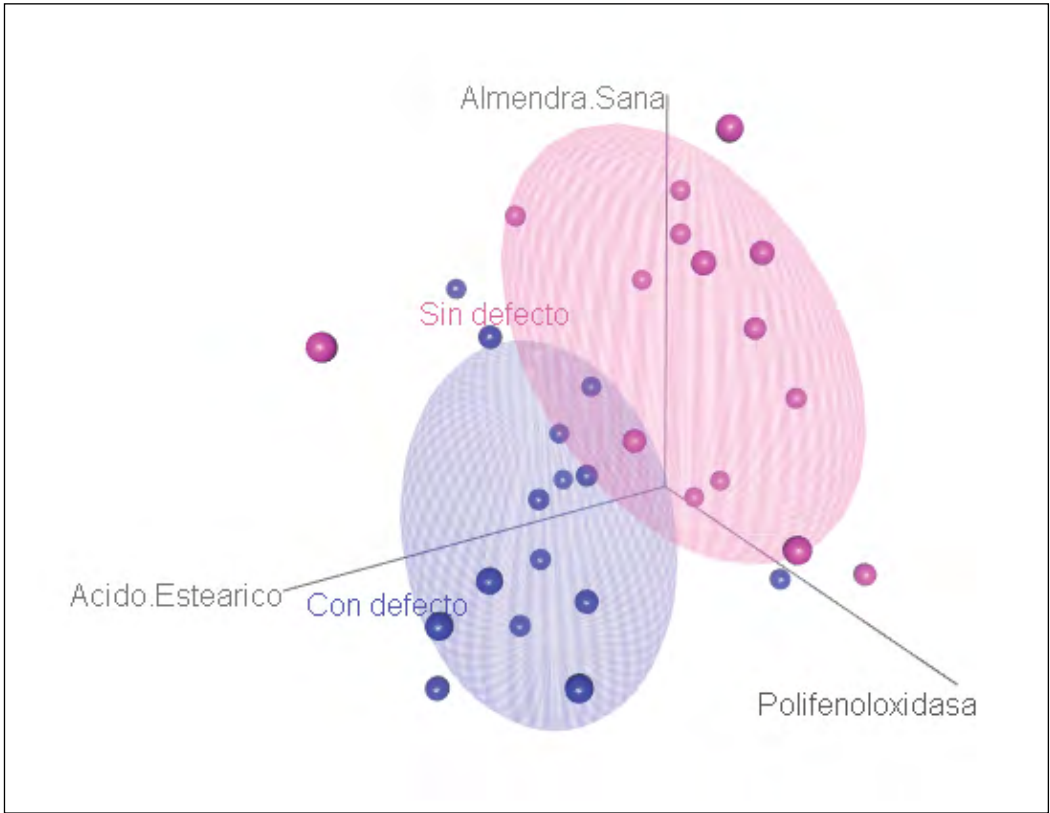
Los análisis y procedimientos estadísticos efectuados, durante las fases del estudio, reafirman que la variable enzimática definida como actividad de la PFO y la variable química determinada como ácido esteárico son indicadores de la presencia del defecto reposo en la almendra de café. En la Figura 9 se evidencia la discriminación del café con y sin el defecto reposo, en función de la almendra sana, la actividad enzimática de la polifenoloxidasa (PFO) y el contenido de ácido esteárico en los granos de café.

### Etapa III

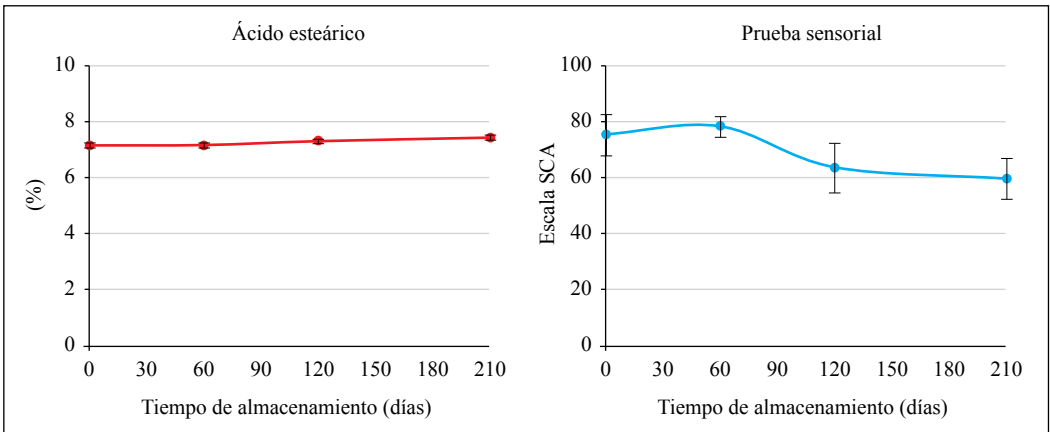
Para verificar la aplicabilidad de las pruebas que identifican el defecto reposo, se recibieron diez muestras de café sin el defecto reposo. A estas muestras se les realizaron las pruebas fisicoquímicas y enzimáticas, en periodos de 0, 60, 120, 210 días en almacenamiento, con

condiciones de temperatura entre 16 y 18°C, y de humedad relativa entre 65% y 75% durante la etapa de almacenamiento.

**Análisis sensorial, fisicoquímico (lípidos totales y ácidos grasos).** Con base en la identificación de las variables en las Etapas I y II del estudio, para diez muestras sin defecto reposo, a través de un análisis de varianza y la prueba *t* student al 5%, se determinó que la calificación sensorial fue la única variable que presentó cambios estadísticamente significativos en su valor promedio durante el almacenamiento por 210 días, evidenciando el cambio a los 120 días de almacenamiento. El contenido de ácido esteárico empezó a incrementarse a los 60 días, alcanzando su mayor valor a los 210 días (7,53%), aunque estos cambios no fueron estadísticamente significativos (Figura 10). Para las demás variables relacionadas en las Etapa I y II con el defecto reposo, como el contenido de lípidos totales, el factor de rendimiento en trilla y el contenido de almendra sana, los cambios durante el tiempo de almacenamiento no fueron estadísticamente significativos (Tabla 6). Cabe anotar que, inicialmente la calidad del café de las muestras recibidas presentó una clasificación por debajo de café especial, según el puntaje total de calidad (SCA).



**Figura 9.** Variables que explican el defecto reposo en el café



**Figura 10.** Cambios en el contenido de ácido esteárico y el puntaje total (SCA) de calidad sensorial para las muestras de café durante 210 días de almacenamiento.

Desde un punto de vista descriptivo y a pesar de que no se encontraron diferencias estadísticas significativas en la variable factor de rendimiento, esta variable disminuyó en el tiempo, con un menor valor de la misma asociada al café sin el defecto reposo. Otra variable que no presentó diferencias estadísticas significativas durante el almacenamiento del café fueron los lípidos totales, de forma descriptiva hubo un incremento durante el tiempo de almacenamiento, pasando del 11,75% al inicio del almacenamiento y finalizando en un valor de 12,29% a los 210 días de almacenamiento (incremento del 4,60%), resultado similar al reportado por Rendón et al. (2014), en café almacenado durante 15 meses.

El incremento del contenido de ácido esteárico, en los primeros 60 días, pasando de 7,23% a 7,25% (fue del 0,28%); sin embargo, este pequeño cambio no se reflejó en la calificación sensorial, la cual se incrementó de un valor de 75,32 a 78,20.

Posteriormente, para los días 120 y 240, los contenidos de ácido esteárico fueron de 7,39% y de 7,53%, respectivamente, presentando incrementos, respecto a la muestra original, del 2,21% y 4,15%, respectivamente; para estos valores se evidenció una disminución en la calificación sensorial con valores 63,70 y 59,65, identificando el defecto reposo.

Los valores iniciales de ácido esteárico encontrados en la Etapa III, para el café sin el defecto reposo, fueron de 7,23%, concordantes con los encontrados en la Etapa I para este tipo de muestras. De igual forma, valores de ácido esteárico de 7,53% al final de la etapa de almacenamiento y para los cuales se encontró el defecto reposo en la prueba sensorial, son consistentes con los encontrados en la Etapa I para café con el defecto reposo (7,89%).

De acuerdo con los registros de temperatura y humedad relativa del cuarto de almacenamiento, se encontró que la temperatura estuvo entre 16 y 18°C y la humedad relativa

**Tabla 6.** Promedios e intervalo para las variables asociadas al defecto reposo durante el almacenamiento.

Variable	0 días		60 días		120 días		210 días	
	Promedio	Intervalo	Promedio	Intervalo	Promedio	Intervalo	Promedio	Intervalo
Almendra sana	77,18 A	0,86	78,86 A	0,70	78,96 A	0,58	79,81 A	1,11
Factor de rendimiento	92,26 A	1,15	89,94 A	0,88	89,91 A	0,73	88,99 A	1,35
Lípidos totales	11,75 A	0,15	12,40 A	0,21	12,35 A	0,21	12,29 A	0,42
Ácido linoleico	36,59 A	0,62	37,41 A	0,47	37,45 A	0,16	38,25 A	0,44
Ácido esteárico	7,23 A	0,24	7,25 A	0,20	7,39 A	0,13	7,53 A	0,22
Prueba sensorial	75,32 A	3,67	78,20 A	1,84	63,70 B	4,44	59,65 B	3,80

Para cada variable, letras no comunes implica diferencia entre promedios de tiempos de almacenamiento, de acuerdo con la prueba de Duncan al 5%.

entre el 65% y 75%. A partir de los 60 días de almacenamiento, una temperatura de 16°C y humedad relativa del 65% se comenzó a detectar un incremento del contenido de lípidos totales y del contenido de ácido esteárico, con el subsiguiente deterioro de la calidad sensorial de la bebida.

Los cambios encontrados en la calificación sensorial para el café en almacenamiento, durante 210 días, pasando de valores en la escala SCA, de 75,32 al inicio del almacenamiento a valores de 59,65 al final del almacenamiento, son coherentes con los reportados por Rendón et al. (2014), en Brasil, quienes reportan que la intensidad del "sabor a reposado" en la infusión de café aumentó entre 3,4 y 3,5 unidades en la escala de medición, pasando de valores entre 2,1 y 3,2 a valores de 5,5 y 6,7; indicando que la oxidación sería la responsable de la pérdida de estructura celular, viabilidad de la semilla y los cambios sensoriales.

En este estudio se puede concluir que:

- El nivel de acidez en la bebida de café, el porcentaje de merma, el contenido de ácidos clorogénicos totales, así como el nivel de proteínas y la frecuencia de

aparición de hongos, levaduras y bacterias, no presentaron diferencias estadísticas para un nivel de significancia del 5% entre las muestras de café, con y sin el defecto reposo.

- Se encontró que las muestras con el defecto reposo presentaron una disminución del porcentaje de almendra sana y un aumento en el factor de rendimiento en trilla. De igual manera, presentaron mayores contenidos de lípidos totales y de ácido esteárico respecto a muestras de café sin el defecto.
- De las 39 variables evaluadas, el porcentaje de almendra sana, el contenido de ácido esteárico y la actividad de la polifenoloxidasas (PFO) se identificaron como posibles indicadores para detectar la presencia del defecto reposo en el café.

## AGRADECIMIENTOS

A Rodrigo Alarcón y Jhon Ehider Espitia de Almacafé; a Rubén Darío Medina, Esther Cecilia Montoya, Luis Imbachí, Valentina Osorio, Luz Fanny Echeverri, Paola Calderón, Hernán González y Aristóteles Ortiz, colaboradores de Cenicafé; a Gloria Inés Puerta y Gustavo Echeverry.

## LITERATURA CITADA

Almacafé. (2015). *Café pergamino presentado, separado por problemas de taza y rechazado—Ss. 40 kg.* [Presentación]. Informe de gerencia general a gerencia técnica.

Amorim, H. D. (1978). *Aspectos bioquímicos e histoquímicos do grãos de café verde relacionados com a determinação da qualidade* [Tesis de Pregrado], Universidad de Sao Paulo.

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>

Bote, A. D., & Vos, J. (2017). Tree management and environmental conditions affect coffee (*Coffea arabica* L.) bean quality. *NJAS Wageningen Journal of Life Sciences*, 83, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2017.09.002>

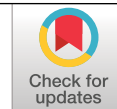
Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1–2), 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)

- Coelho, K. F., Pereira, R. G. F. A., & Vilella, E. R. (2001). Qualidade do café beneficiado em função do tempo de armazenamento e de diferentes tipos de embalagens. *Revista Brasileira de Armazenamento*, 2(1), 22–27.
- Latimer, G. W., & Horwitz, W. (Eds.). (2005). *Official methods of analysis of AOAC International* (18th ed.). AOAC.
- Multon, J. L. (1991). Basics of moisture measurement in grain. En L. D. Hill (Ed.), *Uniformity by 2000: Highlights of an International Workshop on Maize and Soybean Quality* (pp. 35–67). Scherer Communications.
- Nikolova-Damyanova, B., Velikova, R., & Jham, G. N. (1998). Lipid classes, fatty acid composition and triacylglycerol molecular species in crude coffee beans harvested in Brazil. *Food Research International*, 31(6–7), 479–486. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(99\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00016-2)
- Pazmiño-Arteaga, J. D., Chagolla, A., Gallardo-Cabrera, C., Ruiz-Márquez, A. F., González-Rodríguez, A. T., Camargo-Escalante, M. O., Tiessen, A., & Winkler, R. (2019). Screening for Green Coffee with Sensorial Defects Due to Aging During Storage by MALDI-ToF Mass Fingerprinting. *Food Analytical Methods*, 12(7), 1571–1576. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01485-9>
- Perrone, G., Susca, A., Cozzi, G., Ehrlich, K., Varga, J., Frisvad, J. C., Meijer, M., Noonim, P., Mahakarnchanakul, W., & Samson, R. A. (2007). Biodiversity of *Aspergillus* species in some important agricultural products. *Studies in Mycology*, 59, 53–66. <https://doi.org/10.3114/sim.2007.59.07>
- Puerta, G. I. (2001). Cómo garantizar la buena calidad de la bebida del café y evitar los defectos. *Avances Técnicos Cenicafé*, 284, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/562>
- Puerta, G. I. (2020). *Procedimiento para el análisis de la calidad física del café: Servicio de análisis café pergamino* (PACFS-11). Cenicafé.
- Puerta, G. I. (2001). *Procedimiento para el análisis de la calidad física del café: Servicio de análisis café almendra* (PACFS-12). Cenicafé.
- Puerta, G. I. (2011). Composición química de una taza de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 414, 1–12. <http://hdl.handle.net/10778/340>
- 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>
- Rendón, M. Y., 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, L. S., Ribeiro, D. E., Evangelista, S. R., Miguel, M. G., Pinheiro, A. C., Borém, F. M., & Schwan, R. (2017). Controlled fermentation of semi-dry coffee (*Coffea arabica*) using starter cultures: A sensory perspective. *LWT—Food Science and Technology*, 82, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.008>
- Specialty Coffee Association. (2003). *Cupping Protocols. Protocols & Best Practices*. <https://sca.coffee/research/protocols-best-practices>

# PRODUCCIÓN DE CAFÉ VARIEDAD CASTILLO® EN ALTAS DENSIDADES DE SIEMBRA CON UNO Y DOS TALLOS POR SITIO

José Raúl Rendón Sáenz \*

Rendón, J. R. (2021). Producción de café variedad Castillo® en altas densidades de siembra con uno y dos tallos por sitio. *Revista Cenicafé*, 72(1), e72106. <https://doi.org/10.38141/10778/72106>



La densidad de siembra, entre las prácticas de manejo del cultivo de café, es uno de los factores más determinantes de la productividad, seguida por la nutrición y la edad. Bajo las condiciones actuales de la caficultura en Colombia, aumentar el promedio de plantas por hectárea para promover una mayor productividad es una meta nacional, no obstante, algunos caficultores han superado la máxima densidad de 10.000 plantas/ha. Con el propósito de conocer la respuesta a esta práctica, en la Estación Experimental La Catalina, ubicada en el municipio de Pereira (Risaralda), entre los años 2015 y 2019, se evaluaron seis densidades de población de tallos por hectárea (tratamientos), en plantas de café variedad Castillo®, bajo tres arreglos espaciales con uno y dos tallos por sitio, en un diseño completamente aleatorio. El análisis de la producción de la primera cosecha y el acumulado de dos, tres y cuatro cosechas, no mostró diferencias estadísticas según prueba F al 5%, al comparar uno y dos tallos por sitio, con las poblaciones conformadas entre 7.407 y 14.815 tallos/ha, 10.000 y 20.000 tallos/ha, 11.111 y 22.222 tallos/ha, respectivamente. De acuerdo con los resultados, en plantaciones de café variedad Castillo®, al superar las 10.000 plantas o tallos/ha, la competencia intraespecífica ocasionada por una excesiva población, compromete la estabilidad de la producción y dificulta el manejo del cultivo. En consecuencia, en variedad Castillo® la mayor densidad de siembra recomendada es de máximo 10.000 plantas o tallos/ha.

**Palabras clave:** Arreglo espacial, competencia entre plantas, ciclos de producción, tallos por sitio.

## COFFEE PRODUCTION OF THE CASTILLO® VARIETY AT HIGH PLANTING DENSITIES WITH ONE AND TWO STEMS PER SITE

Planting density, among all other coffee cultivation management practices, is the most determinant factor for productivity, followed by nutrition and plant age. Under the current conditions of coffee cultivation in Colombia, to increase the average number of plants per hectare to promote higher productivity is a national goal. However, some coffee farmers have exceeded the maximum density of 10,000 plants per hectare. In order to know the response to this practice, at La Catalina Experiment Station, located in the Pereira municipality (Risaralda department), between 2015 and 2019, six stem population densities (treatments) were evaluated in Castillo® variety plants, under three spatial arrangements with one and two stems per site, in a completely randomized design. The analysis of yield of the first harvest and the aggregate of two, three and four harvests did not show statistical differences, according to the F test at 5%, when comparing one and two stems per site, comparing populations of 7,407 and 14,815 stems/ha, 10,000 and 20,000 stems/ha, and 11,111 and 22,000 stems/ha, respectively. According to these results when coffee plantations of the Castillo® variety exceed 10,000 plants or stems per hectare, intraspecific competition caused by an excessive population compromises yield stability and makes crop management difficult. Consequently, the highest planting density recommended for the Castillo® variety should not exceed 10,000 plants or stems/ha.

**Keywords:** Spatial arrangement, plant competition, production cycles, stems per site.

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



La elección de la densidad de siembra y el arreglo espacial son las primeras etapas que se definen para implantar un sistema de producción agrícola, este es el punto de partida con el que se estiman la cantidad de semillas y la necesidad de material vegetal para el establecimiento. La densidad de siembra es considerada, entre todas las prácticas de manejo del cultivo de café, uno de los factores más determinantes de la productividad (Araque & Duque, 2019), de allí radica la importancia de los estudios que vinculan esta variable con otros componentes del sistema como la variedad, la edad, la nutrición y la oferta ambiental.

Investigaciones sobre densidades de siembra en café con variedades desarrolladas por Cenicafé han demostrado los mayores rendimientos en genotipos de porte bajo, con poblaciones de hasta 10.000 plantas/ha (Rendón & Duque, 2017) y en genotipos de porte alto con 5.000 plantas/ha (Farfán et al., 2016). Bajo sistemas agroforestales establecidos con variedades de café de porte intermedio y bajo, las máximas producciones se han obtenido con densidades de siembra entre 8.000 y 10.000 plantas/ha (Farfán & Sánchez, 2016). Con las recientes variedades Cenicafé 1 y Castillo® zonales, las características de arquitectura y el porte del árbol facilitan el establecimiento de altas densidades de siembra (Flórez et al., 2016).

En la caficultura colombiana, el aumento en el número promedio de plantas por hectárea es una prioridad para promover mayor grado de tecnificación y competitividad. Las condiciones agroecológicas de un amplio rango del área cultivada actualmente presentan potencial para incrementar las densidades de siembra por encima de 5.000 plantas/ha. En este contexto, la adopción de altas densidades de siembra presenta ventajas asociadas con un mejor aprovechamiento del agua y los nutrientes,

menor efecto de altas temperaturas y una mayor productividad, en concordancia con una reducción en la duración de los ciclos de producción (Giomo et al., 2009).

En el cultivo de café, las altas densidades de siembra contribuyen a un mejor reciclaje de nutrientes y una menor pérdida por erosión (Augusto et al., 2007). La mayor cobertura del terreno, a partir de un adecuado número de plantas, disminuye el período de interferencia ejercida por las arvenses, promueve la reducción de los costos y el aprovechamiento más eficiente de las áreas de cultivo (Arcila et al., 2007; Andrade et al., 2014).

Para aumentar la densidad de siembra y reducir los costos de establecimiento, la práctica de eliminación de la yema terminal en plantas de almácigo (descope), es una alternativa que permite inducir la formación de dos tallos por planta y aumentar la densidad de población por hectárea, sin incrementar el número de sitios sembrados (Duque, 2004); esta práctica conlleva a un ajuste en las distancias de siembra del cultivo y corresponde a una de las opciones de obtención de las poblaciones de tallos en esta investigación. Mestre & Arboleda, (1999) con base en el aumento del número de tallos por sitio en variedad Colombia, encontraron una mayor producción al dejar dos tallos por sitio, con poblaciones de 5.000 plantas por hectárea, mientras que cuando se establecieron poblaciones de 7.500 y 10.000 plantas no se encontraron diferencias entre uno y dos tallos por sitio.

Una forma de determinar la conveniencia de las prácticas de manejo agronómico en los cultivos es a través del análisis de óptimos biológicos y económicos. El óptimo biológico para la densidad de plantas de café puede definirse por medio de una curva de respuesta con la cual se alcanza la máxima producción, luego la curva de producción muestra un

punto de inversión; en variedad Caturra este óptimo se estima en 11.033 plantas/ha, sin embargo el óptimo económico estimado se encuentra entre 9.404 y 9.852 plantas/ha (Arcila et al., 2007).

Otro factor importante que involucra la densidad de siembra es la duración de los ciclos de producción, la cual puede determinarse a través del análisis de elasticidad de la producción; este tipo de análisis mide el grado de respuesta entre el insumo (tiempo) y el producto (arobas de café pergamino seco) conservando las demás variables de manejo constantes (Duque, 2004). Con el aumento de la edad en altas poblaciones de plantas por hectárea, se ha demostrado mayor competencia intraespecífica en cortos períodos de tiempo, en los que la elasticidad es igual a cero y se hace necesario la renovación para recuperar la productividad de los cultivos.

Con base en la estrategia de implantar altas densidades de siembra en café, algunos agricultores de la zona central cafetera de Colombia han implementado poblaciones superiores a 10.000 plantas/ha, a través del establecimiento de colinos descopados, con la premisa de obtener ciclos de producción de máximo tres cosechas, lo cual implica una mayor frecuencia en la renovación de las plantaciones, con posibles efectos sobre la producción acumulada y el incremento de los costos. En procura de ampliar la

información sobre estas prácticas y orientar a los caficultores en las decisiones de manejo de las densidades de población del cultivo, se evaluó el efecto de la densidad de siembra y el arreglo espacial sobre la producción de sistemas establecidos con variedad Castillo® y altas poblaciones de tallos obtenidas con uno y dos tallos por sitio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la Estación Experimental La Catalina, ubicada en el municipio de Pereira (Risaralda), a 4°45' latitud N, 75°44' longitud W, con los valores históricos de clima descritos en la Tabla 1 y características de suelos pertenecientes a la unidad cartográfica Chinchiná. Entre los años 2015 y 2019 se evaluaron seis densidades de población de tallos por hectárea (tratamientos), con plantas de café variedad Castillo®, en tres arreglos espaciales (Tabla 2).

Las parcelas experimentales (unidad experimental) fueron asignadas aleatoriamente a los tratamientos, bajo un diseño completamente aleatorio, con cinco repeticiones y un área de 132 m<sup>2</sup> por parcela. Para alcanzar el número de tallos por hectárea con los respectivos arreglos espaciales, se establecieron colinos de café con un solo tallo por sitio en los tratamientos 1, 2 y 3, y colinos descopados con dos tallos por sitio en los tratamientos 4, 5 y 6 (Tabla 2).

**Tabla 1.** Principales variables de clima de la Estación Experimental La Catalina.

Altitud	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)	Brillo solar anual (horas)	Precipitación anual acumulada (mm)
	Mínima	Máxima	Media			
1.321	17,4	27,3	21,6	78,0	1.621	2.270

Fuente: Datos históricos plataforma agroclimática, Cenicafé.



**Tabla 2.** Descripción de los tratamientos con las densidades de población evaluadas.

Tratamiento	Arreglo (m)	Número de sitios/ha	Número de tallos/ha
1	0,6 x 1,5	11.111	11.111
2	0,5 x 2,0	10.000	10.000
3	0,9 x 1,5	7.407	7.407
4	0,6 x 1,5	11.111	22.222
5	0,5 x 2,0	10.000	20.000
6	0,9 x 1,5	7.407	14.815

El manejo agronómico del cultivo se basó en la implementación de prácticas integradas para el control de arvenses, plagas y enfermedades. La nutrición se hizo según las recomendaciones del análisis de fertilidad del suelo; para la etapa de levante con dosis determinadas por planta, y a partir del inicio de la etapa reproductiva, con la cantidad de fertilizante recomendada por hectárea.

Como variables de respuesta se registró la producción por parcela, en kilogramos de café cereza por año, y la acumulada durante un ciclo de cuatro cosechas (cuatro años de producción). Como variable complementaria se registró el número de cruces por planta en cada una de las unidades experimentales, sobre una muestra de diez plantas centrales, durante dos años de producción.

### Análisis de la información

Se estimó el promedio y el error estándar por tratamiento, con las variables de respuesta y complementaria. Se aplicó el análisis de varianza bajo el diseño completamente aleatorio y se evaluaron los contrastes descritos en la Tabla 3, a través de la prueba F al 5% de probabilidad, con la producción acumulada en kilogramos de café cereza. Los contrastes corresponden al

arreglo espacial con uno y dos tallos por sitio; el primer grupo lo conformaron las poblaciones de tallos obtenidas en el arreglo 0,9 x 1,5 m (7.407 y 14.815 tallos/ha), el segundo grupo con las poblaciones de tallos obtenidas en el arreglo 0,5 x 2,0 m (10.000 y 20.000 tallos/ha) y el tercero con las poblaciones de tallos del arreglo 0,6 x 1,5 m (11.111 y 22.222 tallos/ha) (Tabla 2). El análisis estadístico se realizó a través del programa SAS (*Statistical Analysis Software*) versión 9.4 TS Level 1M5 (SAS Institute inc, 2016).

**Tabla 3.** Descripción de los contrastes para el análisis de las poblaciones con uno y dos tallos por sitio.

Tratamiento		Tratamiento
1	Vs.	4
2	Vs.	5
3	Vs.	6

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Producción anual

Las condiciones de clima predominantes con la ocurrencia del evento El Niño en el año 2016, provocaron períodos de déficit hídrico

(Figura 1), favorables para el desarrollo de floraciones en el cultivo de café durante el primer semestre, por consiguiente, la cosecha registrada durante el segundo semestre del mismo año representó un alto volumen de producción en la región. El inicio de la primera cosecha del lote experimental coincidió con este período, alcanzando el máximo promedio anual de café cereza por parcela con un valor de 392,9 kg (Figura 2).

La producción obtenida en el año 2017 alcanzó un máximo promedio de 300,1 kg de café cereza por parcela, un menor volumen comparado con el año anterior (Figura 2). Este evento fue atípico comparado con el patrón normal de cosechas en el ciclo de producción del cultivo, ya que, en términos generales, la segunda cosecha es de mayor volumen en relación con la primera, no obstante, por haberse registrado una cosecha de gran magnitud el año anterior, debido a las condiciones de clima, este comportamiento cambió.

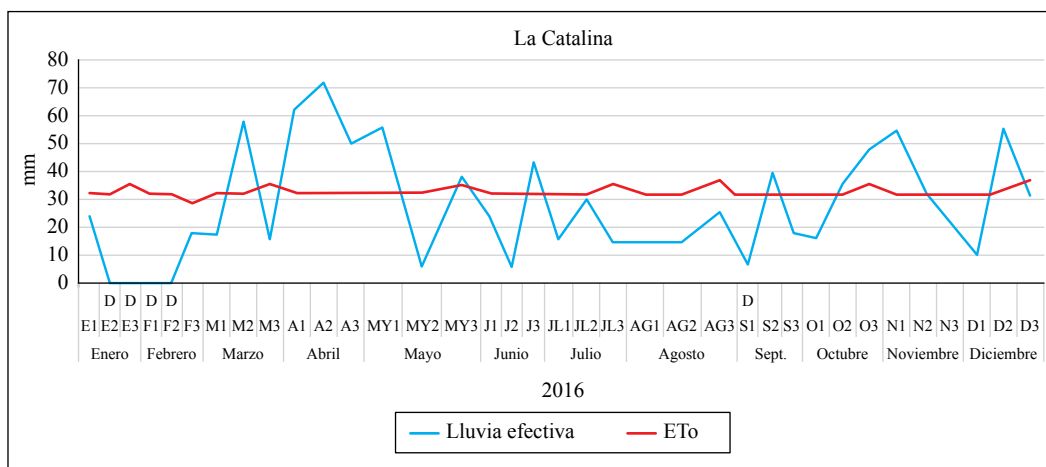
La producción anual registrada con las diferentes poblaciones de tallos, según el

análisis de varianza, sólo mostró diferencias significativas para la cosecha registrada en el año 2018,  $Pr > F 0,0339$  con un máximo promedio de producción de 313,5 kg de café cereza por parcela. En general, la cuarta cosecha evaluada en el ciclo mostró la disminución de la producción en todos los tratamientos, con un máximo promedio de 251,6 kg de café cereza por parcela (Figura 2).

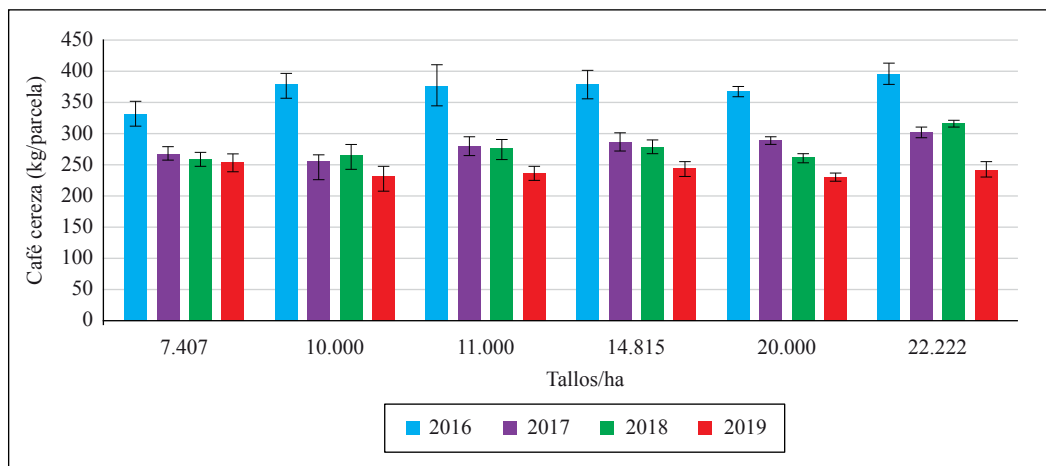
### Producción acumulada

Para el análisis de la producción obtenida en cada sistema de siembra, se comparó el acumulado de una, dos, tres y cuatro cosechas, de manera independiente. Las densidades de población de 7.407 y 14.815 tallos/ha, según el arreglo espacial 0,9 x 1,5 m con uno y dos tallos por sitio, respectivamente, mostraron producciones iguales en la primera cosecha y en el acumulado de dos, tres y cuatro cosechas evaluadas en el ciclo (Tabla 4).

Este mismo comportamiento fue identificado entre las densidades de población de 10.000 y 20.000 tallos/ha, según el arreglo espacial



**Figura 1.** Balance hídrico en la Estación La Catalina, período enero-diciembre 2016. La letra D en el eje x indica los períodos decadares en que se presentó déficit hídrico.



**Figura 2.** Producción anual de café cereza por parcela, en kilogramos, las barras sobre cada columna (error estándar) indican la variación de los promedios.

0,5 x 2,0 m con uno y dos tallos por sitio, respectivamente, y al comparar la producción obtenida con las poblaciones de 11.111 y 22.222 tallos/ha, según el arreglo espacial 0,6 x 1,5 m con uno y dos tallos por sitio, respectivamente (Tabla 4).

Bajo las condiciones agroecológicas del lugar de estudio, el incremento en el número de tallos por sitio, con poblaciones que superaron los 10.000 tallos/ha, acarrió dificultades en la administración del cultivo, especialmente en la cosecha. Es así como, un elevado número de plantas o tallos por unidad de área asociado a la reducción de las distancias de siembra, tiene efectos sobre el crecimiento y la arquitectura de las plantas (Pereira et al., 2011), presentándose alargamiento de los entrenudos del tallo, autosombreamiento y reducción de la capacidad productiva de la planta. Según Andrade et al. (2014), en arreglos espaciales rectangulares, cuando las ramas de las plantas de café se traslapan con las plantas dentro del surco, se presenta una tendencia a ocupar el espacio disponible entre los surcos, condición que finalmente dificulta la labor de recolección, con el aumento de la edad del cultivo.

Con densidades superiores a 10.000 tallos por hectárea, las labores de manejo de plagas como la broca del café aumentan los costos; una de las razones es la difícil circulación de los recolectores entre los surcos para hacer la cosecha, en consecuencia, los frutos maduros y secos que quedan en el árbol o caen al suelo son infestados y aumentan las poblaciones del insecto y su dispersión. Durante el tiempo en que se llevó a cabo este experimento, los máximos niveles de infestación registrados en periodos críticos con estas poblaciones fueron del orden del 7%, en el año 2018.

La variedad Castillo® se caracteriza por tener un tipo de crecimiento intermedio de los árboles. Bajo los arreglos espaciales evaluados, las poblaciones establecidas con uno y dos tallos por sitio, según el análisis estadístico, indican que, a partir de 7.407 sitios por hectárea no es viable establecer más de un tallo por sitio. Esta respuesta radica en la influencia que tiene el aumento del número de ejes por sitio sobre la producción de cada tallo, cuando estos comparten el mismo espacio de una planta individual; resultados similares a los obtenidos en este estudio se presentan con

**Tabla 4.** Promedio y error estándar para la producción acumulada de café cereza (cc) en kilogramos por parcela, según el arreglo espacial.

Producción acumulada (kg de cc/ parcela)	Arreglo espacial (0,9 x 1,5 m)		Arreglo espacial (0,5 x 2,0 m)		Arreglo espacial (0,6 x 1,5 m)							
	Promedio	EE	Promedio	EE	Promedio	EE						
Una cosecha	328,9 a	19,4	376,8 a	22,6	376,5 a	16,4	364,5 a	7,8	373,7 a	32,6	392,9 a	16,3
Pr > F	<b>0,1143</b>		<b>0,6821</b>		<b>0,5152</b>							
Dos cosechas	594,9 a	22,1	660,7 a	35	629,5 a	20,1	651,4 a	7,3	651,6 a	35,2	693,0 a	20,9
Pr > F	<b>0,0789</b>		<b>0,5466</b>		<b>0,2588</b>							
Tres cosechas	851,5 a	25,9	936,3 a	34,1	891,6 a	33,2	910,5 a	10,5	924,8 a	38,2	1.006,6 a	19,0
Pr > F	<b>0,0462</b>		<b>0,6424</b>		<b>0,0534</b>							
Cuatro cosechas	1.103,3 a	28,4	1.178,0 a	34,2	1.122,7 a	42,3	1.138,9 a	14,6	1.158,5 a	46,5	1.246,4 a	10,6
Pr > F	<b>0,1157</b>		<b>0,7262</b>		<b>0,0667</b>							

Letras distintas indican diferencias entre tratamientos según prueba F al 5%.

el establecimiento de dos plantas de café por sitio (Paulo et al., 2005).

Entre los diferentes sistemas de obtención del número de plantas por hectárea, los colinos descopados se han considerado una opción para reducir los costos de establecimiento cuando el número de sitios por hectárea es aproximadamente igual a 5.000 (Duque et al., 2003); es decir, hasta obtener un máximo de 10.000 tallos/ha. De acuerdo con los resultados del presente estudio, si el número de sitios por hectárea es superior a 7.407 y se establece con colinos descopados, la población de tallos final (14.814) no garantiza incrementos significativos en la producción a favor de esta práctica, por el contrario, esta decisión puede afectar la duración de los ciclos de producción y conduce a la planificación de renovaciones más frecuentes por la acentuada disminución de la capacidad productiva de las plantas (Toledo & Barros, 1999).

### **Crecimiento de las plantas de café**

El crecimiento de las plantas de café se caracteriza por presentar, después del primer año de edad, estructuras de crecimiento vegetativo y reproductivo de manera simultánea, donde cada par de ramas primarias desarrolladas en el tallo conforman una cruz. El número de cruces formadas en las poblaciones establecidas con uno y dos tallos por sitio, en el arreglo espacial 0,9 x 1,5 m con 14.815 tallos/ha, obtenidos en 7.407 sitios (Figura 3), presentó 14,3 cruces (pares de ramas) más que las registradas con 7.407 tallos/ha, a los 18 meses de edad; luego de dos años la mayor población fue superior en 28,3 cruces. En términos de tasa de crecimiento absoluto se registraron valores de 1,77 y 0,99 cruces por mes para 14.815 y 7.407 tallos/ha, respectivamente.

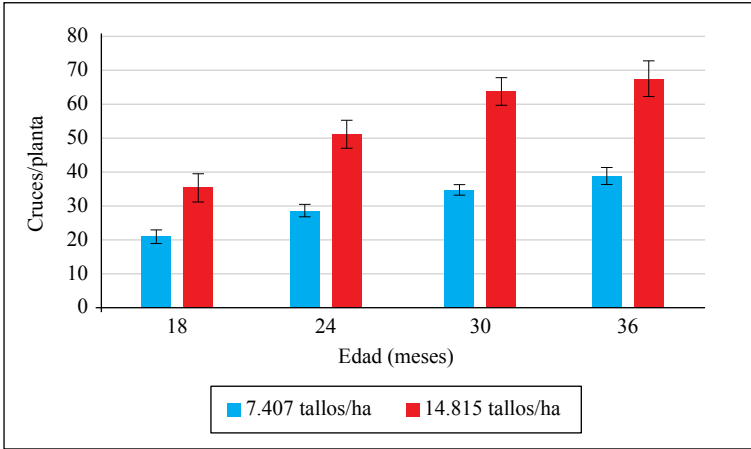
La densidad de población de 20.000 tallos/ha obtenida en 10.000 sitios, bajo un arreglo

espacial de 0,5 x 2,0 m, a los 18 meses de edad, registró 17,2 cruces más que las registradas con 10.000 tallos/ha; luego de dos años en el mismo orden, esta variable fue superior en 31,8 cruces. Las tasas de crecimiento absoluto para estas poblaciones fueron 1,57 y 0,76 cruces por mes, para 20.000 y 10.000 tallos/ha, respectivamente (Figura 4).

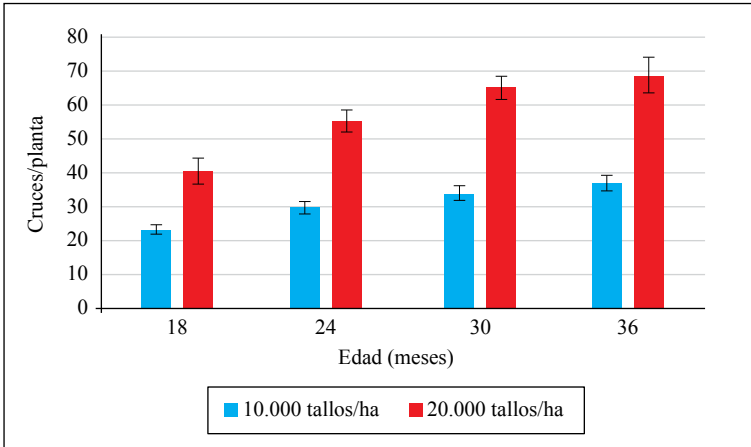
Bajo el arreglo espacial de 0,6 x 1,5 m (Figura 5), la población de 22.222 tallos/ha obtenida en 11.111 sitios, registró 16,1 cruces más que las registradas con 11.111 tallos/ha, a los 18 meses de edad; luego de dos años esta variable fue superior en 23,5 cruces con la mayor población. Las tasas de crecimiento absoluto fueron de 1,34 y 0,92 cruces por mes, con 22.222 y 11.111 tallos/ha, respectivamente.

El crecimiento de las plantas de café con las mayores poblaciones de tallos evaluadas en este estudio, a partir de los tres años de edad del cultivo, mostró un deterioro de las ramas bajas con la progresiva pérdida de área foliar en este estrato del árbol. Frente a este aspecto Andrade et al. (2014) determinaron una mayor concentración de ramas productivas en el tercio superior de la planta, con pérdida de ramas en el tercio inferior de la planta, al establecer densidades de siembra superiores a 10.000 plantas/ha. Además, cuando las altas densidades de siembra se obtienen con distancias muy cortas entre plantas, puede presentarse también una mayor altura de las plantas y un mayor número de ramas (Carvalho et al., 2006).

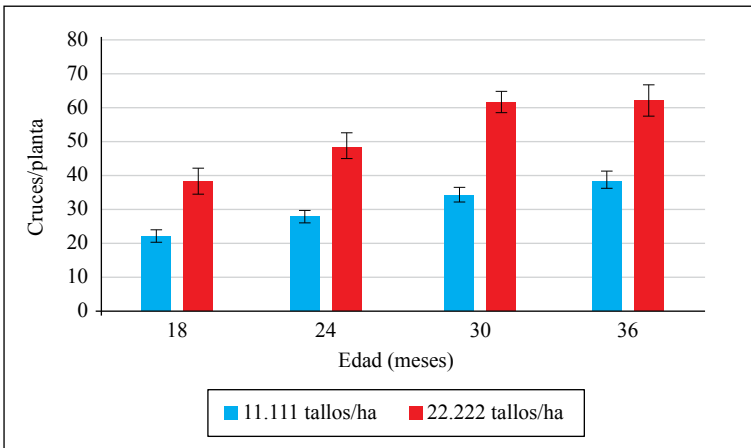
Al considerar el número potencial de ramas y nudos formados en cada planta con dos tallos por sitio, podría esperarse un mayor número de nudos productivos, sin embargo, debido al efecto del auto sombreado y una menor longitud de las ramas que se traslapan entre los dos tallos, este número de



**Figura 3.** Número de cruces por planta con poblaciones de 7.407 y 14.815 tallos/ha, las barras sobre cada columna (error estándar) indican la variación de los promedios.



**Figura 4.** Número de cruces por planta con poblaciones de 10.000 y 20.000 tallos/ha, las barras sobre cada columna (error estándar) indican la variación de los promedios.



**Figura 5.** Número de cruces por planta con poblaciones de 11.111 y 22.222 tallos/ha, las barras sobre cada columna (error estándar) indican la variación de los promedios.

nudos puede verse afectado. De acuerdo con la variable número de cruces, el crecimiento del árbol de café después de un determinado número de plantas o tallos/ha y en función de la edad, muestra el efecto acentuado de la competencia, esta es una respuesta que puede relacionarse con alteraciones fisiológicas en el comportamiento de las plantas, causadas por una excesiva densidad de siembra (Martínez et al., 2007).

En relación con los arreglos espaciales, una planta de café a libre crecimiento y bajo un adecuado manejo agronómico, durante la etapa de crecimiento vegetativo y en los primeros dos o tres años de vida, no presenta diferencias importantes en variables como el número de cruces o ramas por tallo (Pereira et al., 2007). Posterior al registro de una segunda cosecha, un menor distanciamiento entre plantas o entre surcos, con altas densidades de siembra, se asocia con la pérdida de ramas bajas y con el aumento de la altura del árbol; por el contrario, un mayor distanciamiento entre

plantas o entre surcos, con bajas densidades, influye negativamente sobre la productividad (Pereira et al., 2013).

Según lo encontrado en esta investigación, con la variedad Castillo®, la población no debe superar los 10.000 de tallos por hectárea, una excesiva población de plantas o tallos compromete la estabilidad de la producción y pone en riesgo la capacidad de respuesta en torno a escenarios climáticos extremos o escasos de recursos económicos para el manejo del cultivo.

## AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que aportaron con su trabajo en el desarrollo de las actividades del experimento, a Diego Fabián Montoya responsable de la Estación La Catalina hasta el año 2019, al Asistente de Investigación Carlos Augusto Ramírez por el apoyo en el registro de información y al personal de las Disciplinas de Biometría y Experimentación de Cenicafé.

## LITERATURA CITADA

- Andrade, W. E., Guimares, P. T., Faquin, V., & Guimarães, R. J. (2014). Produtividade do cafeeiro arábica em condições de adensamento, no noroeste Fluminense. *Coffee Science*, 9(1), 90-101. <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/554>
- Araque, 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. (2007). Densidad de siembra y productividad de los cafetales. En J. Arcila, F.F. Farfán, A. M. Moreno, L.F. Salazar, & E. Hincapié (Eds.), *Sistemas de producción de café en Colombia* (pp. 131-143). Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/720>
- Augusto, H., Martínez, H. E., Sampaio, N., Cruz, C., & Pedrosa, A. (2007). Concentração foliar de nutrientes em cultivares de *Coffea arabica* L. sob espaçamentos adensados. *Ciência e Agrotecnologia*, 31(4), 973-981. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400005>
- Carvalho, G., Mendes, A., Bartholo, G., Nogueira, A., & Amaral, M. (2006). Avaliação de produtividade de progênies de cafeeiro em dois sistemas de plantio. *Ciência e Agrotecnologia*, 30(5), 838-843. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542006000500003>
- Duque, H. (2004). *Cómo reducir los costos de producción en la finca cafetera* (2da. ed.). Cenicafé.
- Duque, H., Arboleda, C., & Arcila, J. (2003). Colinos de café descopados: una opción para obtener altas densidades de siembra a menor costo. *Avances Técnicos Cenicafé*, 309, 1-4. [https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras\\_publicaciones/avances\\_tecnicos/avance\\_tecnico\\_0309](https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/avances_tecnicos/avance_tecnico_0309)

- Farfán, F., Rendón, J., & Menza, H. (2016). Densidad de siembra de *Coffea arabica* variedad Tabi en sistemas agroforestales, en tres zonas cafeteras de Colombia. *Revista Cenicafé*, 67(2), 52-57. <http://hdl.handle.net/10778/728>
- Farfán, F., & Sánchez, P. M. (2016). Densidad de siembra del café variedad Castillo® en sistemas agroforestales, en el departamento de Santander-Colombia. *Cenicafé, Revista Cenicafé*, 67(1), 55-62. <http://hdl.handle.net/10778/678>
- Flórez, C. P., Arias, J. C., Maldonado, C. E., Cortina, H. A., Moncada, M. P., Quiroga, J., Molina, D. M., García, J. C. & Duque, H. (2018). Variedades Castillo® Zonales resistente a la roya con mayor productividad. *Avances Técnicos Cenicafé*, 489, 1-8.
- Flórez, C. P., Maldonado, C. E., Cortina, H. A., Moncada, M. P., Montoya, E. C., Ibarra, L. N., Unigarro, C. A., Rendón-Sáenz, J., & 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. <http://hdl.handle.net/10778/4178>
- Giomo, G., Mistro, J. C., Nasser, M., Gallo, P., & Fazuoli, L. C. (2009, junio 2-5). Efeito do adensamento na produtividade de cultivares de *Coffea arabica* L. de porte baixo. En Consórcio Pesquisa Café e Desenvolvimento do Café (Organizador), VI Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Vitória, Espírito Santo, Brasil. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/2750>
- Martínez, H. E., Augusto, H., Cruz, C., Pedrosa, A., & Sampaio, N. (2007). Crescimento vegetativo de cultivares de café (*Coffea arabica* L.) e sua correlação com a produção em espaçamentos adensados. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 29(4), 481-489. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v29i4.404>
- Mestre, A., & Arboleda, C. (1999). Aumente la densidad de población de los cafetales y la productividad, sin costos adicionales. *Avances Técnicos Cenicafé*, 263, 1-4.
- Paulo, E., Furlani Junior, E., & Fazuoli, L. (2005). Comportamento de cultivares de cafeeiro em diferentes densidades de plantio. *Bragantia, Campinas*, 64(3), 397-409. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000300009>
- Pereira, S., Pereira, D., Oliveira, M., Donizeti, J., & Guimarães, R. (2013). Influência do espaçamento de cultivo em duas épocas de poda nos teores caulinares de carboidratos em cafeeiros. *Coffee Science*, 8(4), 460-468. <http://www.coffeescience.ufpa.br/index.php/Coffeescience/article/view/498>
- Pereira, S., Bartholo, G., Baliza, D., Sobreira, F., & Guimarães, R. (2011). Crescimento, produtividade e bionalidade do cafeeiro em função do espaçamento de cultivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(2), 152-160. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000200006>
- Pereira, S., Guimarães, R., Bartholo, G., Guimarez, P. T., & Alves, J. (2007). Crescimento vegetativo e produção de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) recepadados em duas épocas, conduzidos em espaçamentos crescentes. *Ciência e Agrotecnologia*, 31(3), 643-649. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000300007>
- Rendón, J., & Duque, H. (2017). Determine la densidad de tallos en las zocas de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 484, 1-4. <http://hdl.handle.net/10778/4210>
- SAS Institute Inc. (2016). SAS® 9.4 User's Guide (4th ed.).
- Toledo, S., & Barros, I. (1999). Influência da densidade de plantio e sistema de podas na produção de café. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34(8), 1379-1384. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000800009>



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

**DIRECCIÓN**

---

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

**DISCIPLINAS DE INVESTIGACIÓN**

---

**Agroclimatología**

Juan Carlos García L., Ing. Agrónomo, Ph.D.  
Ninibeth Gibelli Sarmiento H., Ing. Agrícola, M.Sc.  
Carolina Ramírez C., Ing. Agrícola, M.Sc.  
Julián Guillermo García P., Geógrafo  
Juan Camilo Mora G., Ing. Ambiental  
Wilmar A. Rendón G., Tecnólogo en Sistemas Informáticos  
Jorge Wilmar Valencia G., Tecnólogo en Análisis y  
Desarrollo de Sistemas de Información  
Luis Gonzaga Henao R.  
Orlando Salazar G.

**Biometría**

Rubén Darío Medina R., Estadístico, M.Sc.  
Hernando García O., Ing. Agroforestal  
Luis Carlos Imbachi Q., Estadístico

**Calidad**

Valentina Osorio P., Ing. Alimentos, Esp.  
Jenny Paola Pabón U., Ing. Agrícola, M.Sc.  
Claudia Patricia Gallego A., Bacterióloga, M.Sc.  
Luz Fanny Echeverry G., Química  
Claudia Rocío Gómez P., Tecnóloga Química  
Lina María González C., Química Industrial M.Sc.  
Claudia Tabares A., Ing. Química  
Lady Juliet Vargas G., Ing. Alimentos  
Miguel Junior Martínez H., Tecnólogo en Procesos  
Biotecnológicos  
Paola Andrea Calderón T., Tecnóloga en Producción  
Agropecuaria Ecológica  
Wilson Vargas López

**Economía Agrícola**

Hugo Mauricio Salazar E., Ing. Agrónomo, M.Sc.  
Juan Carlos Gómez S., Contador, Ing. Agrónomo, M.Sc.

**Entomología**

Pablo Benavides M., Ing. Agrónomo, Ph.D.  
Carmenza E. Góngora B., Microbióloga, Ph.D.  
Zulma Nancy Gil P., Ing. Agrónomo, Ph.D.  
Marisol Giraldo J., Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.  
Lucio Navarro E., Biólogo, Ph.D.  
Luis Miguel Constantino C., Biólogo, M.Sc.  
Aníbal Arcila M., Ing. Agrónomo  
Jesús Hernando Gómez L., Biólogo

Juan Diego Maldonado C., Biólogo  
Claudia Patricia Martínez D., Bacterióloga  
Diana Soraya Rodríguez A., Técnico en Producción de Café  
Luis Eduardo Escobar S., Agrónomo  
Carlos Alberto Quintero A.  
Claudia Bibiana Tabares B.  
Faber de Los Ríos P.  
Diana Marcela Giraldo V.  
José Robin García C.  
Gloria Patricia Naranjo E.  
Luz Andrea Carmona V., Pasante  
Paula Andrea Figueroa V., Pasante  
Rosa Nathalie Grueso G., Pasante

**Fisiología Vegetal**

José Ricardo Acuña Z., Biólogo, Ph.D.  
Aristóteles Ortiz, Químico, M.Sc.  
Carlos Andrés Unigarro M., Ing. Agrónomo, M.Sc.  
Natalia Catalina Flechas B., Bióloga  
Cristian David Camilo R., Químico, Ph.D.  
Dora Janeth García J., Licenciada en Biología y Química,  
Ph.D.  
Marta Bibiana Escobar P., Tecnóloga Química  
Claudia Patricia Valencia V., Técnico en producción de café  
Claudia Marcela Mora A.  
Mario Franco A.

**Fitopatología**

Carlos Ariel Ángel C., Ing. Agrónomo, Ph.D.  
Rosa Lilia Ferrucho., Ing. Agrónoma, Ph.D.  
Lina María del Mar Escobar T., Bióloga, Ph.D.  
Nancy del Carmen Arciniegas B., Ing. Agrónoma, M.Sc.  
Gustavo Adolfo Marín R., Ing. Agrónomo, M.Sc.  
Carlos Alberto Zuluaga E., Técnico en Mantenimiento de  
Computadores y Redes de datos.  
Carlos Alfonso Doncel B., Tecnólogo Recursos Naturales  
Carlos Arturo González V.  
Jorge Dicksson Ocampo M.  
Carla Daniela Granada F., Aprendiz

**Fitotecnia**

José Raúl Rendón S., Ing. Agrónomo, M.Sc.  
Francisco Fernando Farfán V., Ing. Agrónomo, M.Sc.  
Santiago Jaramillo C., Ing. Agrónomo, M.Sc.  
Andrés Felipe León B., Ing. Agrónomo  
Daniel Felipe Fernández R., Ing. Agrónomo, M.Sc.  
Alexander Jaramillo J.

**Mejoramiento Genético**

Claudia Patricia Flórez R., Ing. Agrónomo, Ph.D.  
Diana María Molina V., Bacterióloga, Ph.D.  
Carlos Ernesto Maldonado L., Ing. Agrónomo, M.Sc.  
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  
Marlio Fernando Abella D., Agrónomo  
Mauricio Jiménez S., Ing. Agrónomo, M.Sc.  
Gilbert Rodríguez Q., Técnico Profesional en Desarrollo de Producción Pecuaria  
Jhon Esteban Quintero A., Técnico en Producción de Café  
Leidy Jasmín González V., Tecnología en Química Aplicada a la Industria  
Hernán Díaz C.  
Cruz Elena Díaz M.  
Omar Villarreal  
Manuel Antonio Piamba  
Viviana Andrea Grajales R., Pasante  
Natalia Arango O., Pasante  
Lizeth Fernanda Banguero M., Pasante

#### **Poscosecha**

Juan Rodrigo Sanz U., Ing. Mecánico, M.Sc., Ph.D.  
Nelson Rodríguez V., Ing. Químico, Ph.D.  
Aída Esther Peñuela M., Ing. Alimentos, M.Sc., Ph.D.  
César Augusto Ramírez G., Arquitecto, M.Sc.  
Juan Carlos López N., Microbiólogo, M.Sc.  
Álvaro Guerrero A., Ing. Electrónico/Electricista, M.Sc.  
Laura Vanessa Quintero Y., Ing. Química, M.Sc.  
Carlos Alfonso Tibaduiza V., Ing. Agrícola, M.Sc.  
Sandra Paola Moreno R., Ing. Biológica, M.Sc.  
Ingrid Paola Hower G., Ing. Alimentos, Esp.  
Jhoan Felipe García D., Ing. Alimentos  
Anyela Vanessa Velásquez E., Microbiólogo  
Juan Manuel Rendón R., Tecnólogo en Química  
Ricardo José Grisales M., Tecnólogo en Electrónica  
Jorge Alexander Londoño C., Técnico en Soldadura  
Mario Espinosa G.  
Javier Velásquez H.  
Samuel Castañeda  
Juan Carlos Ortiz F.  
Angie Lorena Valencia A., Pasante  
Sharol Daniela Ramírez C., Aprendiz

#### **Suelos**

Siavosh Sadeghian K., Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.  
Hernán González O., Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.  
Luis Fernando Salazar G., Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.  
Luz Adriana Lince S., Ing. Agrónomo, Geóloga, M.Sc.  
Juan Camilo Rey S., Ing. Agrónomo, M.Sc.  
Vanessa Catalina Díaz P., Química, M.Sc.  
Eliana Gómez A., Tecnóloga Química  
Arturo Gómez V.  
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  
Melsar Danilo Santamaría B., Ing. de Alimentos  
Tito Alberto Ramírez S.  
Carlos Yohanny Cardona Z., Aprendiz

#### **Estación Experimental El Tambo**

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

#### **Estación Experimental El Rosario**

Carlos Mario Ospina P., Ing. Forestal, M.Sc.

#### **Estación Experimental La Catalina**

Héctor Flabio Álvarez A., Ing. Agrónomo

#### **Estación Experimental La Trinidad**

Myriam Cañón H., Ing. Agrónomo, M.Sc.

#### **Estación Experimental Paraguaito**

Daniel Antonio Franco C., Agrónomo

#### **Estación Experimental Pueblo Bello**

José Enrique Baute B., Ing. Agrónomo

#### **Estación Experimental San Antonio**

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

#### **Divulgación y Transferencia**

Sandra Milena Marín L., Ing. Agrónoma, Esp., M.Sc.  
Jair Montoya T., Administrador de Empresas, M.Sc.  
Carmenza Bacca R., Diseñadora Visual  
Óscar Jaime Loaiza E., Diseñador Visual  
Luz Adriana Álvarez M., Diseñadora Visual  
Paula Andrea Salgado V., Administrador Financiero  
Nicolás Grisales L., Aprendiz  
Manuela Valencia R., Pasante  
Silvanna María de los Ángeles Bustos R., Pasante

#### **Tecnología de la Información y Comunicaciones**

Luis Ignacio Estrada H., Ing. Químico  
Carlos Hernán Gallego Z., Ing. de Sistemas, Esp.  
Miguel Alfonso Castiblanco C., Bibliotecólogo/Ing. de Sistemas, Esp.  
Elkin Marcelo Valencia L., Ing. de Sistemas, Esp.  
Daniel Orozco J., Ing. de Sistemas y Telecomunicaciones, Esp.  
Leonardo Adolfo Velásquez N., Ing. de Sistemas y Telecomunicaciones, Esp.  
Kevin Adolfo Hincapié V., Ing. de Sistemas y Telecomunicaciones, Esp.  
Andrés Felipe Ramírez M., Ing. de Sistemas y Telecomunicaciones, Esp.  
Audberto Quiroga M., Biólogo, Esp.  
Juan Camilo Espinosa O., Ing. Topográfico, Esp.  
Juan Pablo Carvajal B., Ing. Electrónico  
Miguel Ángel Salamanca Q., Ingeniero de sistemas  
Mariana Valencia L., Aprendiz  
Julián David Medellín M., Pasante

## **UNIDAD ADMINISTRATIVA Y FINANCIERA**

---

Luz Miryam Corredor R., Administradora de Empresas,  
Contador Público, Esp.  
Rufina Perdomo G.  
Nancy Elena Pérez M., Contador

### **Gestión Contable**

Martha Elena Vélez H., Contadora, Esp.  
Daniela López O., Contadora, Esp.  
Jorge Eduardo Dávila M., Contador Público, Esp.  
César Alberto Serna G., Contador, M.Sc.  
Luis Alfredo Amaya F., Administrador Público  
Andrés Felipe Mejía H., Técnico laboral por competencias  
en gestión administrativa  
Viviana Grajales V., Pasante

### **Gestión de Bienes y Servicios - Compras y Contratación**

Ángela Jaramillo G., Prof. en Comercio Internacional, Esp.  
Mauricio Loaiza M., Ing. Industrial  
Carolina Correa M., Profesional en Negocios  
Internacionales  
Diego Alejandro Muñoz G., Economista  
Lina María Giraldo., Administrador Financiero  
Luz Stella Duque C., Tecnóloga en Administración de  
Negocios  
Jesús Alberto Vergara T., Técnico en Sistemas  
Gabriel Antonio Melo P.  
Johana Betancur M., Aprendiz

### **Gestión de Bienes y Servicios - Mantenimiento**

Paulo Alejandro Arias C., Ing. Electricista, Esp.  
Cristian Andrés Chica G., Ing. Mecatrónica  
María Alejandra López R., Ing. Mecatrónica  
Robinson Guzmán G., Técnico Electricista  
Jorge Hernán Marulanda E., Tecnólogo en Electrónica

Albert Johanne Agudelo L., Tecnólogo en Electrónica  
Gabriel Hernando Ortiz C., Tecnólogo en Gestión Bancaria  
y Financiera  
José Gildardo Aguirre O., Tecnólogo en Mantenimiento  
eléctrico industrial  
Mauricio Londoño V., Tecnólogo en Mantenimiento Eléctrico  
Industrial  
Uriel López P.  
Fredy Hernán Osorio C.  
Jhon Fredy Rojo G.  
Jorge Eduardo Sepúlveda V.  
Jorge Antonio Arias A.  
Carlos Andrés Hernández G.  
Fabián Sánchez L.  
Mario López L.  
Jorge Eliecer Acevedo V., Aprendiz

### **Gestión de Tesorería**

Jesús Danilo González O., Contador, Esp.

### **Gestión del Talento Humano**

Érica Mayerly Galvis R., Trabajadora Social, 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  
Estefanía Serna V., Pasante

### **Planeación Financiera y Presupuesto**

Jesús Alberto Cardona L., Ing. Industrial, M.Sc., PMP®  
Valentina Sepúlveda C., Ingeniera Industrial, Esp., PMP®  
Juan Manuel Meza S., Administrador de empresas, M.Sc.  
Ángelo Quintero Román., Contador Público  
Lina Marcela Patiño G., Administradora de Empresas

## 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  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ , 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:  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$  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  $14\text{ y }20\text{ }^\circ\text{C}$  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

Impresión:

300 ejemplares



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](http://www.cenicafe.org)**

---

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