

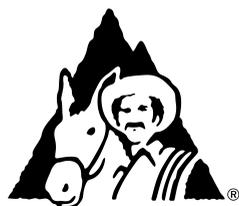
Cenicafé

Revista del
Centro Nacional de Investigaciones de Café



Volumen 70 Número 1

Enero - Junio 2019



**Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia**

COMITÉ NACIONAL

Ministro de Hacienda y Crédito Público
Alberto Carrasquilla Barrera

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Andrés Valencia Pinzón

Ministro de Comercio, Industria y Turismo
José Manuel Restrepo Abondano

Directora del Departamento Nacional de Planeación
Gloria Amparo Alonso Másmela

Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros
Nicolás Pérez Marulanda

Periodo 1° enero/2015- diciembre 31/2018

José Eliecer Sierra (Antioquia)
José Alirio Barreto (Boyacá)
Eugenio Vélez Uribe (Caldas)
Danilo Reinando Vivas (Cauca)
Juan Camilo Villazón (Cesar-Guajira)
Javier Bohórquez Bohórquez (Cundinamarca)
Ruber Bustos Ramírez (Huila)
Javier Mauricio Tovar (Magdalena)
Jesús Armando Benavides (Nariño)
Armando Amaya Álvarez (Norte de Santander)
Carlos Alberto Cardona (Quindío)
Luis Miguel Ramírez (Risaralda)
Héctor Santos Galvis (Santander)
Olivo Rodríguez Díaz (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.

Editada en junio de 2019
Tel: 57(6)8506550 Fax: 57(6)8504723 A.A.: 2427 Manizales
E-mail: cenicafe@cafedecolombia.com
www.cenicafe.org

Cenicafé

Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café

Manizales - Caldas - Colombia

VOL. 70

ENERO - JUNIO 2019

No. 1

CONTENIDO

DISTRIBUCIÓN DE RAÍCES EN CAFÉ VARIEDAD CASTILLO® BAJO DOS ARREGLOS ESPACIALES. José Raúl Rendón Sáenz; Andrea Giraldo Herrera	7
DISTRIBUTION OF ROOTS IN THE CASTILLO® COFFEE VARIETY UNDER TWO SPATIAL ARRANGEMENTS	7
EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE UNA CENTRAL COMUNITARIA PARA EL BENEFICIO DE CAFÉ UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA ECOMILL®. Juan Rodrigo Sanz Uribe; César Augusto Ramírez Gómez; Carlos Eugenio Oliveros Tascón	18
EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF A COMMUNITY CENTRAL ON COFFEE PROCESS USING ECOMILL® TECHNOLOGY	18
EVALUACIÓN DE UN LAVADOR DE FLUJO HORIZONTAL PARA CAFÉ CON DEGRADACIÓN PREVIA DEL MUCÍLAGO. Carlos Eugenio Oliveros Tascón; Juan Rodrigo Sanz Uribe; Rubén Darío Medina Rivera	30
EVALUATION OF A HORIZONTAL FLOW COFFEE WASHER WITH PREVIOUS MUCILAGE DEGRADATION	30
EVALUACIÓN DE PROGENIES F4RC1 DE (CATURRA x <i>Coffea canephora</i>) x CATURRA. Hernando Alfonso Cortina Guerrero	44
EVALUATION OF F4RC1 PROGENIES OF (CATURRA x <i>Coffea canephora</i>) x Caturra	44
VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ANDISOLES EN LA REGIÓN CAFETERA COLOMBIANA. Luz Adriana Lince Salazar; Siavosh Sadeghian Khalajabadi	65
SPATIAL VARIABILITY OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF ANDISOLS IN THE COLOMBIAN COFFEE ZONE	65
VARIABLES AGRONÓMICAS DETERMINANTES DE LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE CAFÉ EN FINCAS DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS. Humberto Araque Salazar; Hernando Duque Orrego	81
AGRONOMIC VARIABLES THAT DETERMINE THE PRODUCTIVITY OF COFFEE CROPS IN FARMS OF THE CALDAS DEPARTMENT	81

COMITÉ EDITORIAL

Pablo Benavides M.	Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé
Luis Fernando Salazar G.	Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé
Carmenza Esther Góngora B.	Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé
José Ricardo Acuña Z.	Ph.D. Biólogo. Fisiología Vegetal, Cenicafé
Diana María Molina V.	Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético, Cenicafé

EDITORES ESPECIALIZADOS

Hernán González O.	Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé
--------------------	---------------------------------------

DISTRIBUCIÓN DE RAÍCES EN CAFÉ VARIEDAD CASTILLO® BAJO DOS ARREGLOS ESPACIALES

José Raúl Rendón Sáenz*, Andrea Giraldo Herrera**

RENDÓN S., J.R.; GIRALDO H., A. Distribución de raíces en café variedad Castillo® bajo dos arreglos espaciales. Revista Cenicafé 70(1):7-17. 2019

Las raíces de las plantas son órganos de importancia para el anclaje, la absorción y el transporte de agua y minerales desde la solución del suelo. Con el objetivo de determinar la distribución de raíces en plantaciones de café variedad Castillo® de cinco años de edad, bajo dos arreglos espaciales a 1,0 m x 1,0 m y 1,0 m x 2,0 m con 10.000 tallos/ha, se extrajeron las raíces del área de terreno ocupada por la planta, 1,0 y 2,0 m², respectivamente. Las muestras se tomaron a dos profundidades, 0 a 25 cm y 25 a 50 cm y a distancias horizontales cada 25 cm desde la base del tallo, 50 cm y 100 cm, para los arreglos espaciales 1,0 x 1,0 m y 1,0 x 2,0 m, respectivamente, en cuatro árboles. A partir de un diseño completamente aleatorio, en arreglo factorial, se evaluó la interacción distancia por profundidad para la variable de respuesta (densidad de raíces totales). En los primeros 25 cm de distancia horizontal medidos a partir de la base del tallo y a una profundidad de 25 cm se encontró la mayor densidad de raíces finas y totales, en ambos arreglos espaciales, según la prueba de contraste al 5%. La proporción de raíces totales hasta los 25 cm de profundidad fue del 86,3% y de 86,4% en los arreglos espaciales de 1,0 x 1,0 m y 1,0 x 2,0 m, respectivamente. Una distancia de 25 cm desde la base del tallo podría indicarse como sitio adecuado para la aplicación del fertilizante.

Palabras clave: Raíces totales, raíces finas, *Coffea arabica*.

DISTRIBUTION OF ROOTS IN THE CASTILLO® COFFEE VARIETY UNDER TWO SPATIAL ARRANGEMENTS

Roots are important organs for plants to anchor, absorb and transport water and minerals from the soil solution. In order to determine the distribution of roots in five-year-old Castillo® coffee variety plantations, under two spatial arrangements at 1.0 m x 1.0 m and 1.0 m x 2.0 m with 10,000 stems/ha, the roots of the area of land occupied by the plant, 1.0 and 2.0 m², respectively, were extracted. The samples were taken at two depths 0 to 25 cm and 25 to 50 cm and horizontal distances every 25 cm from the base of the stem, 50 cm and 100 cm, for the spatial arrangements 1.0 m x 1.0 m and 1.0 m x 2.0 , respectively, in four trees. Through a completely randomized design in factorial arrangement, the interaction distance by depth was evaluated for the response variable (total root density). In the first 25 cm of horizontal distance measured from the base of the stem and at a depth of 25 cm the highest density of fine and total roots was found in both spatial arrangements, according to a 5% contrast test. The proportion of total roots up to 25 cm of depth was 86.3% and 86.4% m in the spatial arrangements of 1.0 m x 1.0 m and 1.0 m x 2.0 respectively. A distance of 25 cm from the base of the stem could be specified as a suitable site for fertilizer application.

Keywords: Total roots, fine roots, *Coffea arabica*.

*Investigador Científico I. Disciplina de Fitotecnia, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

**Ingeniera Agrónoma, Universidad de Caldas.

La importancia del sistema de raíces del café está soportada en la capacidad que poseen dichos órganos para desempeñar funciones como la absorción y el transporte del agua y los minerales desde la solución del suelo. Además, la raíz es el medio de anclaje de la planta en el suelo y contribuye en la síntesis de algunos reguladores de crecimiento y compuestos orgánicos (Arcila y Riaño, 1991).

El óptimo desempeño del sistema radical depende de una estructura bien desarrollada, tanto de la raíz pivotante como de las raíces laterales y finas, que le proporcionen a la planta una mayor capacidad de obtención de los nutrimentos para su crecimiento (Arcila, 1992). Entre los principales aspectos que determinan el crecimiento de la raíz se encuentran las propiedades físicas y químicas de los suelos, la disponibilidad hídrica, el grado de competencia con las plantas vecinas y la interacción con otros organismos que habitan el suelo (Partelli *et al.*, 2014; Ronchi *et al.*, 2015). A pesar del conocimiento de las funciones que ejercen las raíces en las especies vegetales, en el cultivo de café son pocos los estudios que relacionan el crecimiento de estos órganos con el arreglo espacial y las distancias de siembra.

Las raíces de café, al encontrar condiciones limitantes pueden afectar su crecimiento, provocando un desarrollo deficiente de la parte aérea de la planta, baja producción y, en condiciones extremas, causar su muerte (Arcila, 1992). Un buen sistema radical se relaciona con las propiedades físicas del suelo y con su buen drenaje (Silva y Martins, 2010). La densidad del suelo influye en el desarrollo de las raíces debido a su relación con otras características como la porosidad total, la retención de humedad, la permeabilidad al agua y al aire, la penetrabilidad de las raíces y la actividad microbiana (Salamanca y Sadeghian, 2004).

Las prácticas de manejo agronómico en su conjunto son determinantes para el crecimiento y la productividad de los cultivos, aspectos como una correcta selección de las distancias y la densidad de siembra son fundamentales para el establecimiento del cultivo (Carvalho *et al.*, 2006; Martins *et al.*, 2005; Prieto *et al.*, 2007). En términos prácticos si el hábito de crecimiento de las plantas es de tipo compacto, con un alto potencial de producción, puede considerarse el uso de distancias de siembra cortas para favorecer mayores rendimientos por unidad de área (Anim-kwapong *et al.*, 2010). En Brasil, a partir del uso de menores distancias de siembra en plantaciones de café, se han obtenido los mayores registros de biomasa, volumen y área superficial total de raíces en el suelo (Ronchi *et al.*, 2015). Por otro lado, Silva *et al.* (2016) en plantas de café de tres años de edad encontraron un mayor número de raíces finas a una profundidad comprendida entre 0,60 y 0,90 m, lo cual se relaciona con la ocurrencia de períodos secos prolongados, en los que el agua se encuentra disponible en estas capas del suelo.

En Colombia, los primeros estudios desarrollados por la Federación Nacional de Cafeteros- FNC (1969) sobre la raíz del café en variedad Típica, determinaron que, hasta los 10 cm de profundidad desde la superficie del suelo, se encuentra el 65% de las raíces finas, las cuales tienen como principal función, la absorción de agua y nutrientes; también se reporta que entre la superficie del suelo y 1,0 m de profundidad se encuentra el 90% de las raicillas, y a 1,5 m todas las raíces del café.

En diferentes cultivares de *Coffea arabica*, Garriz (1979) encontró que las raíces fibrosas son más abundantes en los primeros 30 cm de profundidad del suelo. En cuanto a la distribución lateral de las raíces, el mayor

porcentaje se registró en los primeros 60 cm de distancia desde la base del tallo.

La distribución de las raíces según el tipo de suelos donde se desarrollan también puede ser variable en abundancia y profundidad. Carducci *et al.* (2014) obtuvieron la mayor concentración de raíces entre 0,20 y 0,34 m de profundidad en un suelo latosol caolinitico y la mayor presencia de raíces finas en un latosol gibbsítico, entre 0,80 y 0,94 m de profundidad.

Uno de los métodos más empleados para evaluar raíces en especies vegetales se basa en la extracción de muestras de suelo y raíz a través de cilindros o cubos de acero de volumen conocido. Las raíces son separadas del suelo y se establecen relaciones entre la longitud o la biomasa radical con el volumen de suelo (densidad radical) para describir su comportamiento (Gómez *et al.*, 2018; Ronchi *et al.*, 2015).

Dada la importancia que tiene la raíz del café en los sistemas de producción, con las actuales variedades que se cultivan en Colombia, esta investigación tuvo como objetivo determinar la distribución de raíces en dos arreglos espaciales del cultivo de café variedad Castillo®. Los resultados que se presentan son de utilidad para ajustar prácticas de manejo agronómico relacionadas con la identificación del sitio de aplicación del fertilizante, el monitoreo de plagas y enfermedades de la raíz y el manejo de las arvenses.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue desarrollada en la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé, ubicada en el municipio de Chinchiná (Caldas), a 4°

58' latitud Norte y 75° 39' longitud Oeste, a 1.381 m de altitud, temperatura media de 20,8°C, brillo solar anual de 1.797 horas y promedio anual de precipitación de 2.656 mm, con suelos correspondientes a la Unidad Chinchiná, clasificado taxonómicamente como acruoxic melanudands. Se utilizaron plantas de café variedad Castillo®, provenientes de dos lotes establecidos a libre exposición solar, ambos con cinco años de edad, cuatro cosechas registradas en el ciclo de producción y próximos a ser renovados por zoca¹. El primer lote seleccionado tenía una densidad de siembra de 10.000 plantas/ha, con un tallo por sitio, en arreglo espacial de 1,0 x 1,0 m, y el segundo tenía 10.000 tallos/ha obtenidos en un sistema de siembra de 5.000 plantas/ha con dos tallos por sitio, colino descopado², en arreglo espacial de 1,0 x 2,0 m.

Biomasa de raíces. Para determinar la biomasa de raíces, se seleccionaron aleatoriamente cuatro plantas (unidad experimental) por cada arreglo espacial. Bajo un diseño completamente aleatorio en arreglo factorial, en el área de terreno ocupada por la planta, según la densidad de siembra y el arreglo espacial, se extrajeron el suelo y la raíz por medio de cubos metálicos de 25 cm en sus lados, tomando las muestras en las distancias horizontales desde la base del tallo hasta 50 cm y 100 cm, para los arreglos espaciales 1,0 x 1,0 m y 1,0 x 2,0 m, respectivamente, y en dos profundidades, de 0 a 25 cm y de 25 a 50 cm (Figuras 1 y 2).

En el arreglo espacial 1,0 x 1,0 m en un área total de 1,0 m² por planta, se tomaron 16 muestras (cubos) por cada profundidad (Figura 1) y en el arreglo espacial 1,0 x 2,0 m en un área total de 2,0 m² por planta se obtuvieron 32 muestras por cada profundidad (Figura 2).

¹ **Zoca:** corte del tallo a 30 cm desde la superficie del suelo

² **Colino descopado:** eliminación de la yema terminal del tallo en etapa de almácigo.

La extracción de las muestras de suelo y raíces se hizo desde la parte externa del área ocupada por la planta, hacia la base del tallo (Figuras 1 y 2). Las raíces fueron removidas del suelo por medio de tamizado en seco y, posteriormente, se lavaron y secaron al aire, para eliminar el exceso de agua y almacenarlas en bolsas de papel.

La biomasa de raíces se determinó llevando las muestras a secado en horno, con una temperatura de 70°C, con recirculación de aire hasta obtener su peso constante. En el laboratorio las raíces se clasificaron de acuerdo a su diámetro, en finas ≤ 5 mm y gruesas $>$

5 mm. Finalmente, se registró el peso total y el peso para cada diámetro, mediante una balanza Mettler Toledo PB3002-5.

Análisis de la información. Para cada arreglo espacial (lote) se estimó el promedio de raíces finas y raíces totales, en las diferentes distancias horizontales y en cada profundidad. A partir del diseño completamente aleatorio en arreglo factorial, se evaluó la interacción distancia por profundidad para la variable de respuesta (densidad de raíces totales) y la combinación con el mayor promedio de densidad de raíces, según prueba de contraste al 5%. La densidad de raíces se obtuvo a

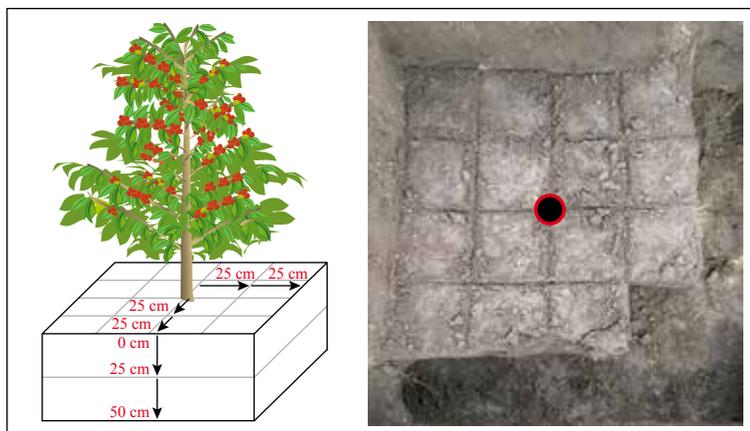


Figura 1. Distancias horizontales y verticales para la extracción de muestras de suelo y raíces en el arreglo espacial 1,0 m x 1,0 m.

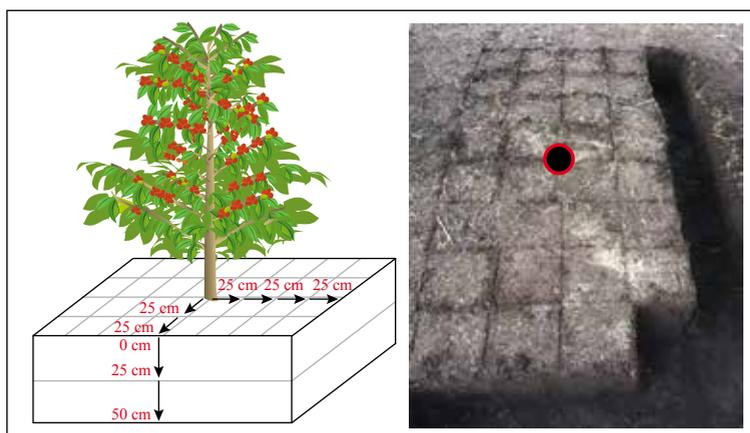


Figura 2. Distancias horizontales y verticales para la extracción de muestras de suelo y raíces en el arreglo espacial 1,0 m x 2,0 m.

partir de la relación entre la biomasa de raíces y el volumen del cubo con el cual se extrajeron las muestras. Para el análisis estadístico se utilizó el Software SAS versión 9.4 (SAS institute, 2012).

La distribución de las raíces en los dos arreglos espaciales se expresó como la contribución porcentual de biomasa en las distancias horizontales medidas a partir de la base del tallo, en las dos profundidades, y se representó de manera gráfica utilizando el programa ArcGIS® 10.3, con los promedios de biomasa obtenidos en el volumen de las muestras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biomasa, densidad y distribución de las raíces de las plantas de café

La biomasa y la densidad de raíces finas y totales obtenidas en un volumen de 0,015 m³ se analizaron en las diferentes distancias horizontales tomadas a partir de la base del tallo y las dos profundidades en el perfil del suelo, dentro

del área de muestreo correspondiente a cada arreglo espacial del cultivo.

Arreglo espacial 1,0 m x 1,0 m. Entre 0 y 25 cm de profundidad del suelo y en los primeros 25 cm de distancia horizontal medida desde la base del tallo, la densidad de raíces con diámetro inferior o igual a 5 mm fue de 1.047,88 g m⁻³, este valor se redujo en un 38% en la distancia horizontal de 25 a 50 cm. En la profundidad de 25 a 50 cm, la densidad de raíces finas en los primeros 25 cm de distancia horizontal, presentó una disminución del 65% respecto al valor de la primera profundidad (Tabla 1).

La densidad de raíces totales en la profundidad de 0 a 25 cm y una distancia horizontal de 0 a 25 cm, medida a partir de la base del tallo, fue de 3.646,68 g m⁻³, al aumentar la distancia horizontal de 25 a 50 cm este valor disminuyó en un 81%. En la profundidad de 25 a 50 cm la densidad de raíces totales en los primeros 25 cm de distancia horizontal, presentó una disminución del 87% respecto al valor de la primera profundidad (Tabla 2).

Tabla 1. Densidad y biomasa de raíces finas en café variedad Castillo® con el arreglo espacial 1,0 x 1,0 m, en el área de terreno ocupada por árbol.

Profundidad (cm)	Distancia horizontal (cm)	Número de muestras (n)	Biomasa de raíces (g)	Coefficiente de variación (%)	Densidad de raíces (g m ⁻³)
0-25	0-25	16	16,37	21,87	1.047,88
	25-50	48	10,10	31,36	646,15
25-50	0-25	16	5,65	32,18	361,84
	25-50	48	3,35	16,11	214,33

Tabla 2. Densidad y biomasa total de raíces en café variedad Castillo® con el arreglo espacial 1,0 x 1,0 m, en el área de terreno ocupada por árbol.

Profundidad (cm)	Distancia horizontal (cm)	Número de muestras (n)	Biomasa de raíces (g)	Coefficiente de variación (%)	Densidad de raíces (g m ⁻³)
0-25	0-25	16	56,98	25,10	3.646,68
	25-50	48	10,67	34,06	682,87
25-50	0-25	16	7,32	48,45	468,20
	25-50	48	3,39	18,55	217,24

El análisis de varianza para la densidad de raíces en el arreglo espacial 1,0 x 1,0 m mostró efecto de la interacción distancia horizontal y profundidad ($p=0,0001$). La mayor densidad de raíces totales se presentó en la distancia horizontal de 25 cm, medidos a partir de la base del tallo, y a una profundidad de 25 cm, según prueba contraste al 5%. Por el contrario, a una distancia horizontal comprendida entre 25 y 50 cm para ambas profundidades, los valores de densidad de raíces no difieren entre sí (Figura 3).

La biomasa de raíces en el área de evaluación equivalente a 1,0 m² se distribuyó de la siguiente manera:

- En la profundidad comprendida desde la superficie del suelo hasta los 25 cm y en los primeros 25 cm de distancia horizontal, medida a partir de la base del tallo, se obtuvo el 46,2% de las raíces finas y el 72,7% de las raíces totales.
- En la distancia horizontal comprendida desde los 25 hasta los 50 cm, el 28,5% correspondió a las raíces finas y el 13,6% de las raíces totales.
- En la segunda profundidad desde los 25 hasta los 50 cm, la distancia horizontal de 25 cm, medida a partir de la base del tallo,

representó el 15,9% de las raíces finas y el 9,3% de las raíces totales.

- En la distancia horizontal desde los 25 cm hasta los 50 cm, se obtuvo el 9,4% de las raíces finas y el 4,3% de las raíces totales.

La proporción de raíces totales acumulada en los primeros 25 cm de profundidad fue del 86,3% y el restante 13,7% entre los 25 y 50 cm de profundidad. La biomasa radical en un metro cuadrado de terreno, hasta una profundidad de 50 cm, fue en promedio 425,95 g. En la Figura 4 se muestra la distribución espacial de la biomasa de raíces para cada distancia horizontal medida a partir de la base del tallo en las dos profundidades, con los rangos y los valores extremos registrados.

Arreglo espacial 1,0 m x 2,0 m. La densidad de las raíces clasificadas como finas, a una profundidad de 0 a 25 cm, fluctuó entre 603,76 g m⁻³ y 1.868,64 g m⁻³. Con relación al máximo valor, se presentó una disminución del 29% en la distancia horizontal de 25 a 50 cm y del 67% cuando se tomaron muestras entre los 75 y 100 cm. En la profundidad de 25 a 50 cm se presentó una disminución del 71% en la variable para la distancia horizontal de 0 a 25 cm, respecto al valor de la primera profundidad (Tabla 3).

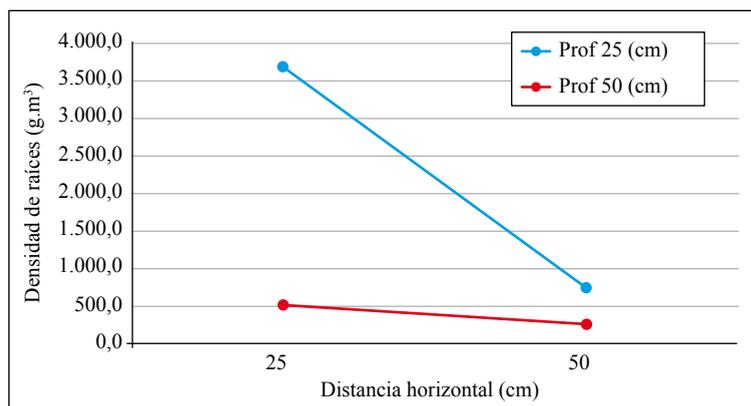


Figura 3. Densidad de raíces totales para las distancias horizontales y profundidades del arreglo espacial 1,0 m x 1,0 m.

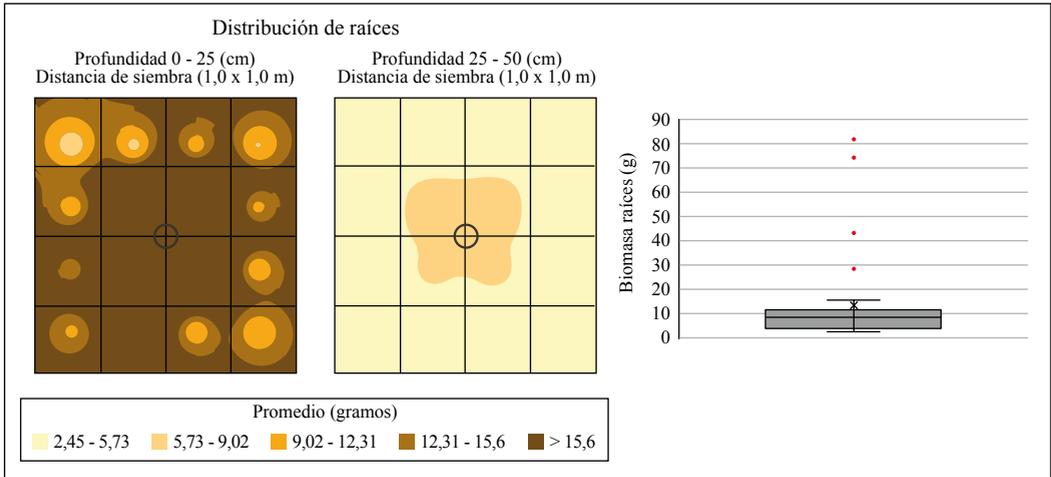


Figura 4. Distribución de la biomasa de raíces en el arreglo espacial 1,0 m x 1,0 m, en las profundidades comprendidas de 0 a 25 cm y 25 a 50 cm. (El círculo central en la imagen representa el tallo del café y la figura de cajas los valores extremos registrados).

Tabla 3. Densidad y biomasa de raíces finas en café variedad Castillo® con el arreglo espacial 1,0 x 2,0 m, en el área de terreno ocupada por árbol.

Profundidad (cm)	Distancia horizontal (cm)	Número de muestras (n)	Biomasa de raíces (g)	Coefficiente de variación (%)	Densidad de raíces (g m ⁻³)
0-25	0-25	16	29,20	17,36	1.868,64
	25-50	48	20,61	26,52	1.319,32
	50-75	32	13,37	21,39	855,62
	75-100	32	9,43	17,65	603,76
25-50	0-25	16	8,38	27,78	536,60
	25-50	48	4,96	7,99	317,19
	50-75	32	3,23	14,13	207,02
	75-100	32	2,27	10,77	145,14

La densidad de raíces totales registró valores entre 603,76 y 5.415,72 g m⁻³ en la profundidad comprendida de 0 a 25 cm del suelo, con una disminución del 71% al aumentar la distancia horizontal de 25 a 50 cm. En la profundidad de 25 a 50 cm la densidad de raíces fluctuó entre 145,14 y 644,12 g m⁻³, con una disminución del 88% en la variable para la distancia horizontal de 0 a 25 cm, respecto al valor de la primera profundidad (Tabla 4).

El análisis de varianza para la variable densidad de raíces en el arreglo espacial 1,0 x 2,0 m mostró efecto de la interacción distancia horizontal y profundidad ($p = <0,0001$). La Figura 5 muestra como a una distancia horizontal de 25 cm, desde la base del tallo, y en la menor profundidad evaluada (25 cm) se encuentra la mayor densidad de raíces (g m⁻³), según prueba de contraste al 5%. Por el contrario, en las distancias horizontales superiores a 50

Tabla 4. Densidad y biomasa total de raíces en café variedad Castillo® con el arreglo espacial 1,0 x 2,0 m, en el área de terreno ocupada por árbol.

Profundidad (cm)	Distancia horizontal (cm)	Número de muestras (n)	Biomasa de raíces (g)	Coefficiente de variación (%)	Densidad de raíces (g m ⁻³)
0-25	0-25	16	84,62	22,28	5.415,72
	25-50	48	24,17	37,09	1.547,06
	50-75	32	13,43	22,19	859,52
	75-100	32	9,43	17,65	603,76
25-50	0-25	16	10,06	38,30	644,12
	25-50	48	5,15	10,93	329,49
	50-75	32	3,23	14,13	207,02
	75-100	32	2,27	10,77	145,14

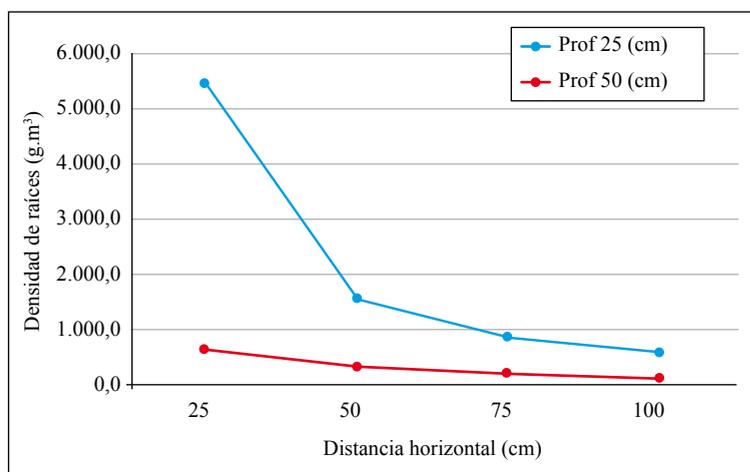


Figura 5. Densidad de raíces totales para las distancias horizontales y profundidades del arreglo espacial 1,0 m x 2,0 m.

cm, la densidad de raíces totales no difiere entre las profundidades.

La biomasa de raíces en el área de evaluación, equivalente a 2,0 m² para este arreglo, se distribuyó de la siguiente manera:

- En la profundidad comprendida de 0 a 25 cm, con una distancia horizontal de 25 cm medida a partir de la base del tallo, se obtuvo el 31,9% de las raíces finas y el 55,5% de las raíces totales.
- En la distancia horizontal desde los 25 hasta los 50 cm, se encontró el 22,5% de las raíces finas y el 15,9% de las raíces totales.
- Para la distancia horizontal entre 50 y 75 cm los valores de biomasa representaron el 14,6% de las raíces finas y un 8,8% de las raíces totales.
- En la distancia de 75 a 100 cm el 10,3% de las raíces finas y el 6,2% de las raíces totales.

La distribución de la biomasa radical representó para la profundidad de 25 a 50 cm:

- El 9,2% de las raíces finas y 6,6% de raíces totales extraídas en los primeros 25 cm de distancia horizontal.
- Entre los 25 y 50 cm de distancia horizontal el 5,4% de las raíces finas y el 3,4% de raíces totales.
- Para la distancia de 50 a 75 cm el 3,5% de las raíces finas y el 2,1% de raíces totales.
- De 75 a 100 cm el 2,5% de las raíces finas y el 1,5% de raíces totales.

La proporción de raíces totales acumulada en los primeros 25 cm de profundidad fue del 86,4% y el restante 13,6% se encontró distribuido entre los 25 y los 50 cm (segunda profundidad). En la distancia horizontal desde la base del tallo hasta los 50 cm y desde la superficie hasta los 25 cm de profundidad, se encontró el 71,4% de las raíces totales. La biomasa radical registrada en un área de

terreno equivalente a 1,0 m² desde la superficie del suelo hasta los 50 cm de profundidad fue en promedio de 478,77 g. La distribución espacial de la biomasa de raíces obtenida en cada distancia horizontal y en cada profundidad se ilustra en la Figura 6.

La distribución de la biomasa radical registrada en esta investigación, para los dos arreglos espaciales del cultivo de café, mostró correspondencia con los trabajos realizados por Vargas *et al.* (2006) al observar la mayor concentración de raíces de café (*C. arabica* L.) Catuaí hasta una profundidad de 20 cm, y también con lo reportado por Rodrigues *et al.* (2001) quienes encontraron en árboles de café disminución de la cantidad de raíces en las capas más profundas del suelo. A una menor profundidad Ronchi *et al.* (2015) en *C. arabica* L. y Partelli *et al.* (2014) en café variedad Conilon (*C. canephora*) muestran la mayor proporción de raíces en los primeros 10 cm de profundidad del suelo, mientras que los estudios realizados por Suárez de Castro (1953) y Trancoso (1960) determinaron que

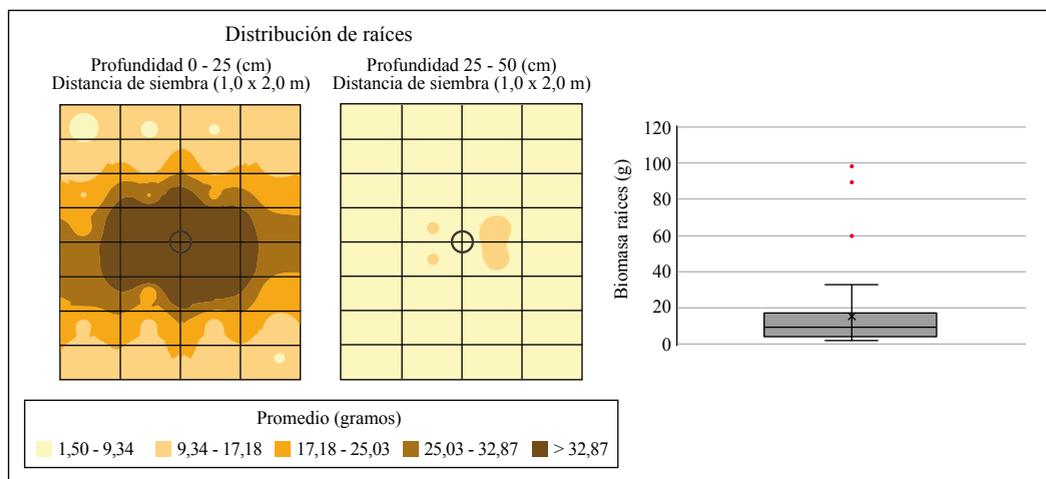


Figura 6. Distribución de la biomasa de raíces en el arreglo espacial 1,0 m x 2,0 m en las profundidades comprendidas de 0 a 25 cm y 25 a 50 cm. (El círculo central en la imagen representa el tallo del café y la figura de cajas los valores extremos registrados).

el mayor porcentaje de raíces en el cultivo de café se encuentra en los primeros 30 cm de profundidad desde la superficie del suelo.

En un plano horizontal del suelo, Silva *et al.* (2016) y Carducci *et al.* (2015) indican que la mayor concentración de raíces se encuentra en las zonas más cercanas al tallo principal, disminuyendo progresivamente del tronco hacia la periferia. Bajo las condiciones de los arreglos espaciales evaluados en esta investigación el patrón de distribución de raíces conservó la misma tendencia.

Al considerar un área de 1,0 m² de superficie y la profundidad total en la que se hizo la extracción de las raíces de las plantas de café, en los dos arreglos espaciales de 1,0 x 1,0 m y 1,0 x 2,0 m, la biomasa de raíces registrada fue de 425,95 y 478,77 g, respectivamente. Estos valores de biomasa radical se asemejan a los obtenidos por Arcila (1987) en plantas de café de cinco años de edad, con las variedades Caturra y Colombia, en las cuales se registraron 486,6 y 475,1 g respectivamente.

Con base en los resultados de esta investigación pudo concluirse que la mayor densidad de raíces finas y totales se obtuvo en la profundidad comprendida desde la superficie del suelo hasta los 25 cm y en la distancia horizontal medida desde la base del tallo hasta los primeros 25 cm, con disminución de estos valores al ampliarse la profundidad y las distancias horizontales.

Para los planes de nutrición edáfica en plantaciones de café de cuatro o cinco años de edad, se podría indicar como la zona más adecuada para la disposición del fertilizante sobre la superficie del suelo, una distancia de 25 cm desde la base del tallo, que corresponde a la zona donde se encuentra la mayor cantidad de raíces finas y totales.

El área de terreno que representa esta zona de mayor densidad de raíces debe permanecer libre de la competencia de arvenses, implementando prácticas de manejo integrado que minimicen el daño mecánico al sistema radical y las limitaciones que puede presentar el desarrollo de la raíz (Arcila, 1992). Así mismo para realizar diagnósticos relacionados con el monitoreo de plagas, enfermedades y el estado de desarrollo de la raíz, las muestras deberían tomarse hasta una profundidad máxima de 25 cm y una distancia horizontal desde la base del tallo y máxima de 50 cm, considerando la proporción de raíces que se encuentran allí.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los colaboradores de la Estación Experimental Naranjal, al ingeniero agrónomo Jhon Félix Trejos, a la disciplina de Biometría y a los Auxiliares de Investigación Carlos Augusto Ramírez y Jonnier Alejandro Hoyos.

LITERATURA CITADA

- Anim-Kwapong., G.J., Anim-Kwapong, E. y Oppong, F.K. (2010). Evaluation of some robusta coffee (*Coffea canephora* pierre ex a. Froehner) clones for optimal density planting in Ghana. *African Journal of Agricultural Research*, 5(1), 84-89. Recuperado de http://www.academicjournals.org/app/webroot/article/article1380800006_Anim-Kwapong%20et%20al.pdf.
- Arcila P., J. (1987). Aspectos fisiológicos de la producción de café *Coffea arabica* L. En *Tecnología del Cultivo del café* (p. 59-111). Chinchiná: Cenicafé.
- Arcila P., J. (1992). *Factores que limitan el desarrollo de las raíces del café*. (Avance Técnico No. 176). Manizales: Cenicafé.
- Arcila P., J., Riaño H., N.M. (1991). *Desarrollo de las raíces de las variedades Caturra y Colombia*. (Avance Técnico No. 167). Manizales: Cenicafé.

- Carducci, C.E., Oliveira, G.C., Curi, N., Heck, R.J., Rossoni, D.F., Carvalho, T.S. y Costa, A.L. (2015). Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. *Soil and Tillage Research*, 145, 171-180. doi: 10.1016/j.still.2014.09.015.
- Carducci, C.E., Oliveira, G.C., Lima, J.M., Rossoni, D.F., Costa, A.L. y Oliveira, L.M. (2014). Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois latossolos sob manejo conservacionista. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(3), 270-278. Recuperado de <http://www.sbcife.ufv.br/handle/123456789/10551>.
- Carvalho, G.R., Guimaraes M., A.N., Ferreira B., G., Nogueira, A.M. y Aparecido A., M. (2006). Avaliação de produtividade de progênies de cafeeiro em dois sistemas de plantio. *Ciência e Agrotecnologia*, 30, 838–843. Recuperado de <http://www.sbcife.ufv.br/handle/123456789/7938>.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1969). *Manual del Cafetero Colombiano*. (3 ed.). Bogotá: FNC.
- Garriz, P.I. (1979). Distribución radicular de tres cultivares de *Coffea arabica* L. en un suelo limo-arcilloso. *Agronomía Tropical*, 29(1), 91-103.
- Gómez G., R., Palma L., D.J., Obrador O., J.J. y Ruiz R, O. (2018). Densidad radical y tipos de suelos en los que se produce café (*Coffea arabica* L.) en Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 203–215. doi: 10.19136/era.a5n14.1278.
- Martins P, E., Furlani J, E. y Fazuoli, L.C. (2005). Comportamento de cultivares de cafeeiro em diferentes densidades de plantio. *Bragantia*, 64(3), 397-409. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/%0D/brag/v64n3/26433.pdf>.
- Partelli, F.L., Covre, A.M., Oliveira, M.G., Alexandre, R.S., Vitória, E.L.D. y Silva, M.B.D. (2014). Root system distribution and yield of 'Conilon' coffee propagated by seeds or cuttings. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(5), 349-355. doi:10.1590/S0100-204X2014000500004.
- Prieto M, H.E., Silva A, H., Damião C, C., Woods P, A., Ferreira S, 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. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/3030/303026575007.pdf>.
- Rodrigues, L.A., Martínez, H.E.P., Neves, J.C.L., Novais, R.F. y Mendonça, S.M. (2001). Growth response of coffee tree shoots and roots to subsurface liming. *Plant and Soil*, 234(2), 207-214. doi:10.1023/A:1017999318532.
- Ronchi, C.P., Sousa Júnior, J.M., Almeida, W.L., Souza, D.S., Silva, N.O., Oliveira, L.B., Guerra, A.M.N. y Ferreira, P.A. (2015). Morfologia radicular de cultivares de café arábica submetidas a diferentes arranjos espaciais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(3), 187-195. doi:10.1590/S0100-204X2015000300001.
- Salamanca J., A. y Sadeghian K., S. (2004). *La densidad aparente en suelos de la zona cafetera y su efecto sobre el crecimiento del café*. (Avance Técnico No. 326). Manizales: Cenicafé.
- Silva B., V.L. y Martins S., P.F. (2010). Propriedades físicas do solo e sistema radicular do cafeeiro, variedade conilon, sob diferentes espaçamentos. *Revista de Ciências Agrárias*, 1(53), 96–101. doi.org/10.4322/rca.2011.013.
- Silva, É.A., Godinho S, S.H., Oliveira, G.C. y Carducci, C.E. (2016). Root spatial distribution in coffee plants of different ages under conservation management system. *African Journal of Agricultural Research*, 11(49), 4970-4978. doi:10.5897/AJAR2016.11356.
- Suárez de C., F. (1953). *Distribución de las raíces del Coffea arabica L. en un suelo franco-limoso*. (Boletín Técnico No. 12). Manizales: Cenicafé.
- Trancoso V, J.A. (1960). O estudo do sistema radicular do cafeeiro em Angola. *Revista do Café Português*, 8(29), 101-106.
- Vargas M, A.C., Andreas N, J., Tiemi Y, G. y Monte S., B. (2006). Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí. *Acta Scientiarum. Agronomy*, (28)4, 455-463. doi:10.4025/actasiagron. v28i4.758 .

EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE UNA CENTRAL COMUNITARIA PARA EL BENEFICIO DE CAFÉ UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA ECOMILL®

Juan Rodrigo Sanz Uribe*, César Augusto Ramírez Gómez*, Carlos Eugenio Oliveros Tascón*

SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; OLIVEROS T., C.E. Evaluación del impacto ambiental de una Central Comunitaria para el beneficio de café, utilizando la tecnología Ecomill®. Revista Cenicafé 70(1):18-29. 2019

Se obtuvo información del desempeño técnico y ambiental de una central diseñada para atender el beneficio de café de 123 pequeños productores, localizada en el municipio de Belén de Umbría (Risaralda). En el diseño de la Central se utilizaron las siguientes tecnologías desarrolladas en Cenicafé, para disminuir el consumo de agua en el proceso de beneficio y el impacto ambiental causado por las aguas residuales, principalmente del lavado del café: el clasificador hidráulico de tolva y tornillo sinfin para el café cereza, el despulpado sin agua, la tecnología Ecomill® para el lavado del café con degradación previa del mucilago, por fermentación natural o aplicando enzimas pectinolíticas, y el tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café. Se obtuvo un consumo específico de agua global (incluyendo todas las etapas del beneficio y el lavado de los equipos) de 1,19 L kg⁻¹ de café pergamino seco, control de la contaminación de las aguas residuales de 100% y un requerimiento específico de energía de 0,1046 kW h kg⁻¹ de c.p.s. Los resultados obtenidos indican que el diseño evaluado de la central, es una alternativa ecológica, técnicamente viable para atender las necesidades de beneficio del café, sin afectar a los ecosistemas.

Palabras clave: Beneficio ecológico, impacto ambiental, sostenibilidad, clasificador hidráulico, consumo específico de agua.

EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF A COMMUNITY CENTRAL ON COFFEE PROCESS USING ECOMILL® TECHNOLOGY

Information about the technical and environmental performance of a central, located in the municipality of Belén de Umbría (Risaralda), to assist coffee processing of 123 small-farm producers was obtained. The design of the central included the following technologies developed in Cenicafé to reduce water consumption in coffee processing and the environmental impact caused by waste water, mainly from coffee washing: the hydraulic separator with hopper and screw conveyor for cherry coffee, dry pulping, Ecomill® technology for coffee washing with previous mucilage degradation by natural fermentation or pectinolytic enzymes and waste waters treatment of coffee processing. A specific global water consumption (including all coffee process stages and equipment washing) of 1.19 L kg⁻¹ of dry parchment coffee (dpc) was obtained, with 100% control of waste water pollution and a specific energy requirement of 0.1046 kW h kg⁻¹ of dpc. The results show that the evaluated community central design is a technically viable ecological option to meet the needs of coffee processing to avoid ecosystem damage.

Keywords: Eco-friendly process, environmental impact, sustainability, hydraulic classifier, specific water consumption.

*Investigador Científico III, Investigador Científico I e Investigador Principal, respectivamente. Disciplina de Poscosecha, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

Hace más de dos décadas, con el beneficio húmedo del café que se realizaba en Colombia, se utilizaban más de 40 L kg⁻¹ de café pergamino seco (c.p.s.) obtenido y se generaba una contaminación de las fuentes de agua con materia orgánica, proveniente de la pulpa y del mucílago, comparable a la causada anualmente por una ciudad de 800.000 habitantes, en excretas y orina (Roa *et al.*, 1999). Con la tecnología Becolsub, desarrollada en Cenicafé en la década de los 90s, se redujo el consumo de agua a valores entre 0,7 y 1,0 L kg⁻¹ de café seco, permitiendo el control del 90% de la contaminación potencial, al mezclar la pulpa y el mucílago, utilizando un tornillo sinfín (Roa *et al.*, 1999).

Aunque con la tecnología Becolsub se obtuvo un avance importante en la gestión ambiental, no es suficiente para cumplir a cabalidad con el decreto 3930 de 2010 (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010), que establece niveles muy bajos de Demanda Química de Oxígeno (DQO) para los vertimientos (máximo 400 mg L⁻¹ de DQO). Con la motivación de contribuir al cumplimiento de la legislación ambiental y producir café con fermentación natural, se desarrolló la tecnología Ecomill® (Oliveros *et al.*, 2014); con ella se reduce el consumo de agua en más del 50% con relación al Becolsub, se elimina la contaminación causada por las aguas de lavado del café (ARLs), ya que se retienen totalmente al adicionarlas a la pulpa o se deshidratan en secadores solares. Adicionalmente, se reduce el requerimiento específico de energía eléctrica (W h kg⁻¹ de c.p.s.), con relación a la tecnología Becolsub (Oliveros *et al.*, 2014).

La tecnología Ecomill® está diseñada para lavar desde 500 hasta 3.000 kg h⁻¹ de café, capacidades adecuadas para fincas de medianos y grandes productores en Colombia. También se ha implementado en centrales de beneficio

de café, que se han construido en los últimos años. Para los pequeños productores se ha planteado la instalación de beneficiaderos comunitarios como alternativa para mejorar los indicadores ambientales, económicos y sociales de la sostenibilidad de la caficultura (Tibaduiza *et al.*, 2018).

Entre las ventajas de las centrales de beneficio para el caficultor resaltan:

- Concentración de los esfuerzos por producir mejor calidad de granos de café.
- Mayor tiempo de dedicación a otras labores de la finca cafetera y, en general, a actividades que contribuyan al bienestar de su familia.
- Posibilidad de obtener retribución inmediata y no después de un largo proceso en la finca.
- Menor riesgo de robo, porque el café en cereza es menos atractivo para los ladrones.

Así mismo, se obtienen las siguientes ventajas en el proceso y el producto:

- Menor consumo de agua y menor impacto ambiental causado por las ARLs.
- Aprovechamiento de las ventajas de la economía de escala por disponer de máquinas de alta capacidad y eficiencia.
- Mayor control sobre la calidad del producto final, al contar con procesos estandarizados, clasificaciones rigurosas y equipos eficientes que conducen a la producción de buenas calidades de café de manera consistente.
- Posibilidad de obtener café de calidad diferenciada, de manera consistente y ecológica, en grandes cantidades.

No obstante, hay barreras culturales como la tradición y el arraigo que se oponen a un

proyecto comunitario, barreras técnicas como los mayores fletes que se requieren por un mayor volumen y peso, o del poco tiempo que tiene el café en cereza para llegar al beneficiadero, lo cual hace necesario que los productores habiten cerca de la central y que las vías de acceso estén en buen estado.

En este proyecto se utilizó de manera conjunta parte de los últimos desarrollos de Cenicafé, a gran escala. No obstante, en este artículo se presentan solamente los resultados relacionados con los aspectos ambientales, con énfasis en el cuidado del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La central de beneficio está localizada en el municipio de Belén de Umbría (Risaralda) y pertenece a la Asociación de Productores de Café de Alta Calidad - Cuchilla del San Juan, conformada por 123 caficultores, en su mayoría pequeños productores, con un promedio de área sembrada en café de 2,3 ha. Los cultivos, de variedad Castillo[®], se encuentran localizados en un rango altitudinal entre 1.300 y 1.700 m. La central comunitaria fue denominada Central Agroindustrial de Café - Belén de Umbría (CBU).

Descripción del proceso

La Figura 1 muestra el diagrama de procesos para el café, que incluye los procedimientos principales para pasillas y para los subproductos pulpa y mucílago. Antes de iniciar se analizó la calidad siguiendo el método CERPER (Guerrero, 1992; Sanz y Oliveros, 2017), con modificaciones, de acuerdo a las condiciones actuales de valoración de café. Los subprocesos empleados para la obtención de café de mejor calidad son:

- Recibo en seco.
- Separación de frutos de menor densidad que la del agua, denominados flotes, y del material extraño que llega con el café al beneficiadero, como piedras y elementos metálicos, que puede causar daños a las despulpadoras, utilizando el clasificador hidráulico diseñado en Cenicafé (Oliveros *et al.*, 2009).
- División de la masa de café en cereza por tamaño, con el fin de mejorar el uso de las despulpadoras en cuanto a la calidad del despulpado.
- Despulpado sin utilizar agua, con clasificación previa en zaranda circular de varillas, con separación de 12,7 mm, para disminuir daños en los granos, especialmente en los de mayor grosor.
- Degradación del mucílago en el tanque del equipo Ecomill[®], por medio de fermentación natural o con aplicación de enzima pectinolítica (Peñuela *et al.*, 2010).
- Lavado en el equipo Ecomill[®].
- Separación de flotes presentes en el café lavado.
- Secado.

En la Figura 2 se presenta una vista general de los equipos utilizados para el beneficio del café en la CBU. Se dispone de tres tolvas de recibo, tres tanques de fermentación y un secador con tres cámaras de secado, de tal manera que cada tanda pueda procesarse por completo sin mezclarse con otras. Se utilizó un módulo Ecomill[®] 3.000, con volumen total de tanques de fermentación de 12 m³ (para 9.600 kg de café despulpado), en tres tanques iguales.

Para transportar el café lavado hasta los tanques de fermentación se empleó una bomba

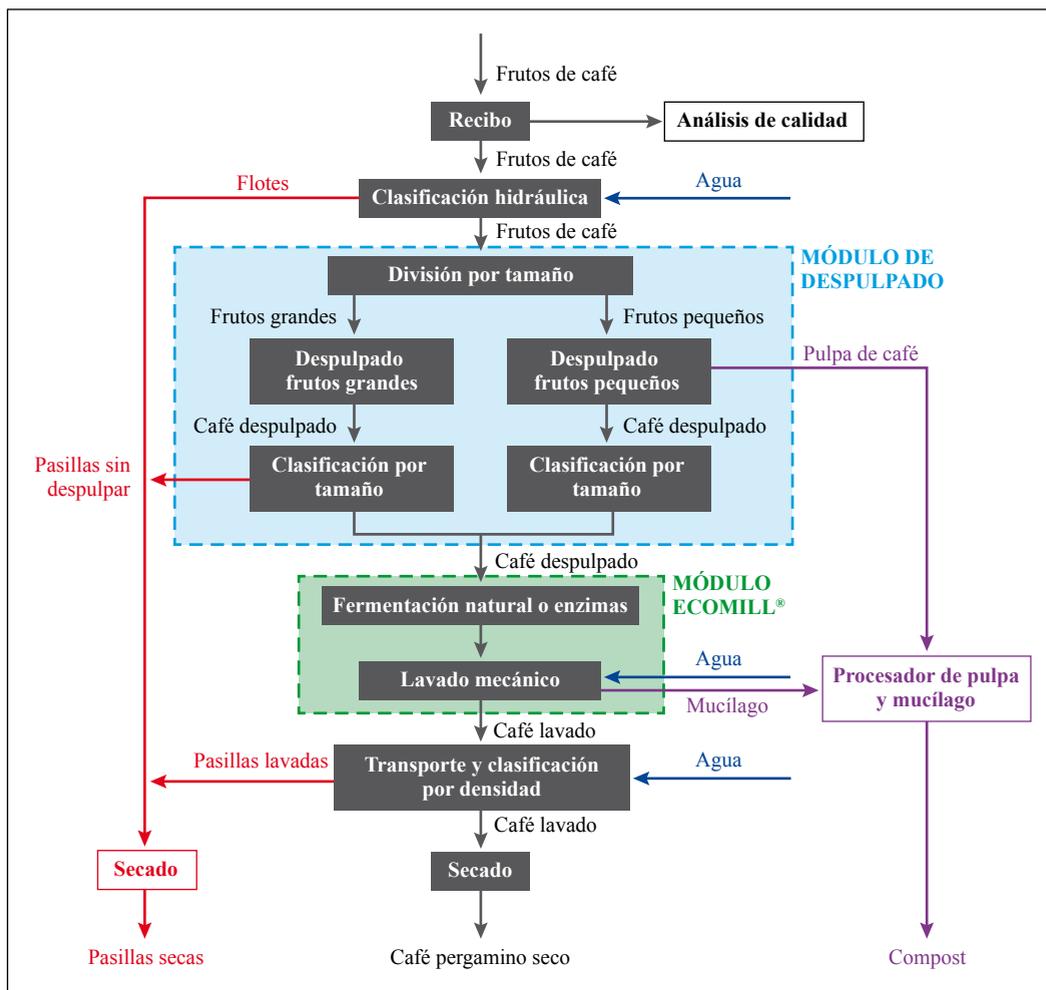


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de la Central Agroindustrial de Café de Belén de Umbría.

sumergible de 1,5 kW (1,5 kW mecánicos y 3,8 kW eléctricos), con recirculación del agua. En ese proceso se remueven los pocos granos flotantes que aún quedan en la masa de café.

La última etapa es el secado mecánico, en el cual se reduce la humedad al café hasta el rango exigido en la comercialización, entre 10,0% y 12,0% base húmeda. El secador tiene un dispositivo electrónico que permite mantener el caudal y la temperatura del aire

de secado en los valores recomendados por Parra *et al.* (2018), sin importar la altura de la capa de granos (González *et al.*, 2010).

En el proceso se recogen tres tipos de pasillas, que son los flotes obtenidos en el separador hidráulico, los granos separados en las zarandas de café despulpado y los flotes obtenidos en el sistema de transporte hidráulico. Por otro lado, se tienen la pulpa del café y el mucilago degradado proveniente del lavador

mecánico, los cuales son mezclados y llevados a un procesador en donde se convierten en compost.

El techo de la edificación tiene un área transversal aproximada de 500 m² y posee canales para recoger el agua llovida y los conductos para llevarla hasta un tanque de almacenamiento de 60 m³, el cual tiene un sistema de bombeo que abastece la central de agua, para ser utilizada en el procesamiento de café (Figura 3).

La Figura 4 muestra el interior del recinto para el procesamiento de pulpa y mucílago. En el tanque cilíndrico se recogen las ARLs que se producen en el equipo Ecomill®. El tanque cuadrado tiene un volumen de 1,5 m³ y en él se recogen todos los lixiviados que se producen durante el proceso de compostaje. Se utiliza una sola bomba para regar el mucílago fresco y los lixiviados, lo cual se obtiene en dos pasadas.

El sistema hidrosanitario recoge todos los líquidos y los conduce a la planta de tratamiento

de las aguas residuales, la cual tiene un reactor hidrolítico y un reactor metanogénico de 5 m³ cada uno, lo que da un tiempo de retención de más de siete días, que permite remover más del 90% de la contaminación.

Metodología

Se realizaron seis pruebas de evaluación de la planta trabajando con café en cereza, llevado a la CBU por diferentes asociados. Las pruebas tuvieron lugar entre los meses de octubre y diciembre de 2016. Con las características de la planta, los datos de los asociados y el café recibido se determinaron diferentes indicadores técnico-ambientales de la CBU.

A partir de los datos de los caficultores que pertenecen a la asociación, los volúmenes de fermentación y de los recibos realizados durante las fechas de evaluación, puede determinarse el día de mayor flujo de café en la planta, la proporción sobre la capacidad total y, por ende, la capacidad anual. Para obtener la distribución y magnitud de la cosecha en las diferentes regiones donde tienen fincas los asociados,



Figura 2. Tecnología empleada para el procesamiento del café en la Central de Beneficio de Belén de Umbría (Risaralda).



Figura 3. Tanque y sistema de bombeo de aguas llovidas.



Figura 4. Tanques para recibo de mucilago concentrado desde la planta y de recolección de lixiviados (izq.) y riego de pulpa descompuesta con mucilago fresco (der.).

se realizaron entrevistas personales, los datos fueron corroborados con los registros de la cooperativa.

A partir del consumo de agua medido se obtienen las ventajas ecológicas de usar el separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín (SHTTS), y a través de los análisis de muestras antes y después de la labor, se obtienen la eficacia de clasificación de flotes y de objetos

duros presentes en el café en cereza en este dispositivo hidro-mecánico.

Se evaluó el efecto de la división de la masa, para disminuir el daño mecánico causado a los granos en el despulpado por cuenta de las diferencias de tamaño de los frutos.

También se evaluó la capacidad de lavado en el equipo Ecomill® 3.000 (kg h⁻¹ de café lavado),

a partir de muestras tomadas en la descarga del lavador, cada 15 minutos; el requerimiento máximo de energía eléctrica (kW h), con base en registros del contador eléctrico instalado en la CBU, en días de mayor flujo de café o días “pico”; el consumo específico de agua (L kg⁻¹ de c.p.s.), considerando el agua utilizada para el lavado del café, máquinas y edificio; y el control de la contaminación de las aguas residuales (%) mediante la retención en la pulpa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Capacidad máxima de la CBU

Se observó que el día pico de producción de las fincas localizadas en diferentes rangos de altitud fue variable, por lo que se obtuvo suministro de café en la central durante mayor tiempo, sin concentración de un solo día o semana. Por lo anterior, la capacidad instalada anual de la Central es de 360.000 kg año⁻¹ de c.p.s. (30.000 @ año⁻¹ de c.p.s.), con un día pico de 1,02%, como proporción del total de café recibido.

Eficacia de clasificación de flotes y de objetos duros presentes en el café en cereza (%)

Durante el procesamiento de las casi 40 toneladas de café en cereza, que fueron seleccionadas en el separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín no se observaron incidentes relacionados con el daño de máquinas despulpadoras por objetos duros y densos, lo cual permite concluir que el equipo tuvo una eficacia de separación de este tipo de objetos del 100%. Así mismo, durante las pruebas se observó que el equipo trabajó a la misma capacidad del transportador de banda con paletas (3.000 kg h⁻¹ de café en cereza ± 50 kg h⁻¹) con una eficacia de separación de material flotante del 100%. El consumo de agua por jornada fue de 240 L día⁻¹.

Calidad del café despulpado

En la Tabla 1 se muestran los resultados para la calidad del café despulpado. Se observa que el daño mecánico promedio causado a los granos fue de 0,2% en los frutos grandes y de 0,4% a los frutos pequeños, el cual es inferior al máximo permitido en la norma NTC2090 ($D_m < 1,0\%$) (ICONTEC, 1985). La mejor calidad se obtuvo en los frutos grandes, explicable porque estos frutos son en su mayoría maduros y sobremaduros, y por una mayor calidad de la labor de despulpado (Tabla 1). Con esos resultados se concluyó que dividir la masa de café de acuerdo al tamaño disminuye pérdidas en el proceso por daño mecánico a los granos.

Capacidad de lavado

En las pruebas realizadas, el equipo Ecomill[®] 3.000 presentó un rendimiento promedio de 2.860 kg h⁻¹ de café lavado ($S = 11,5$ kg h⁻¹), con una remoción de mucílago superior al 98%, evaluada con el método de la enzima pectinolítica Zymucil. Con la capacidad de lavado obtenida y teniendo en cuenta la máxima capacidad de los tanques de fermentación (10.800 kg de café despulpado, equivalentes a 7.400 kg de café lavado), puede realizarse el lavado de todo el café en 2,5 horas, aproximadamente.

En la Tabla 2 se presentan los resultados correspondientes al efecto neto en la labor de lavado de café; los granos mordidos y trillados corresponden a los daños netos causados en esta labor.

El daño mecánico neto, es decir, los granos trillados y mordidos en la actividad de lavado, ascienden en promedio a 0,53%, lo cual indica un efecto aceptable sobre la calidad física del producto, pues se aceptan contenidos de

hasta 0,5% de granos trillados y hasta 0,5% de granos mordidos.

Requerimiento de energía eléctrica

En la Figura 6 se muestra el requerimiento de energía eléctrica durante la operación en un

día pico. El máximo requerimiento de energía eléctrica se alcanzó trabajando simultáneamente el transportador de banda con paletas, el SHTTS, el banco de despulpado, el elevador de cangilones y el tornillo sinfin distribuidor, lo mismo que el secador y sus accesorios. Así se alcanzó un pico de 33,0 kW h⁻¹ a las

Tabla 1. Calidad física del café despulpado en la Central Agroindustrial de Café de Belén de Umbría.

Tipo de grano	Despulpadora			
	Frutos grandes		Frutos pequeños	
	Promedio	S	Promedio	S
Grano bueno (sano)	92,30%	1,0010%	80,80%	4,3232%
Grano trillado (sano)	0,20%	0,0028%	0,40%	0,0127%
Grano mordido (sano)	0,00%	0,0000%	0,00%	0,0000%
Frutos sin despulpar (bueno)	0,00%	0,0000%	4,20%	0,9200%
Pulpa en el grano	1,50%	0,1000%	1,90%	0,1100%
Grano trillado (verde-pintón)	0,40%	0,0020%	1,50%	0,0120%
Grano mordido (verde-pintón)	0,00%	0,0000%	0,00%	0,0000%
Frutos sin despulpar (verde-pintón)	3,20%	0,3000%	0,50%	0,0900%
Impurezas	0,10%	0,0200%	0,30%	0,8200%
Grano en la pulpa	0,00%	0,0000%	0,30%	0,0000%

Tabla 2. Calidad del café a la salida del lavador Ecomill® 3000.

Tipo de grano	Ecomill®	
	Promedio	S
Grano bueno (sano)	87,70%	1,0010%
Grano trillado (sano)	0,46%	0,0210%
Grano mordido (sano)	0,07%	0,0012%
Frutos sin despulpar (bueno)	0,00%	0,0000%
Pulpa en el grano	3,10%	1,0880%
Grano trillado (verde-pintón)	2,80%	0,0250%
Grano mordido (verde-pintón)	0,00%	0,0000%
Frutos sin despulpar (verde-pintón)	2,90%	0,3000%
Impurezas	0,00%	0,0000%

7:00 p.m. y un total de 376,5 kW h⁻¹ para procesar los 18.000 kg de café en cereza, que al final resultaron en aproximadamente 3.600 kg de c.p.s., es decir, 0,1046 kW h kg⁻¹ de c.p.s. Sin considerar la etapa de secado el consumo específico de energía es 0,0346 kW h kg⁻¹ de c.p.s.

Consumo específico de agua (L kg⁻¹ de c.p.s.) en el beneficio del café

El agua utilizada para procesar el café se divide en dos: la utilizada en la clasificación hidráulica del café cereza y el transporte del café lavado, denominadas aguas remanentes, y el agua utilizada en el lavado del café en el módulo Ecomill®.

Las aguas remanentes fueron 240 L en el SHTTS y 300 L en el tanque de la motobomba sumergible y las tuberías que conforman el sistema de transporte de café lavado al secador. Es decir, en cada proceso que se realice diariamente se consumen 540 L sin importar la cantidad de café. Si se trabaja a capacidad máxima el consumo específico de agua asociado a las aguas remanentes sería de 0,15 L kg⁻¹ de c.p.s. No obstante, cuando se procesan menores cantidades de

café en la planta el consumo específico de agua es mayor.

Consumo específico de agua en el lavado del café

Por otro lado, el consumo específico de agua en el módulo Ecomill® fue determinado al dividir el agua consumida sobre la masa de café pergamino seco obtenida. El promedio fue de 0,49 L kg⁻¹ de c.p.s., con un máximo de 0,52 L kg⁻¹ y un mínimo de 0,46 L kg⁻¹. La desviación estándar fue $S=0,024$ L kg⁻¹ de c.p.s.

La Figura 7 presenta una gráfica del consumo específico de agua durante el procesamiento de café, incluyendo las aguas remanentes y de lavado de café, en función del café en cereza recibido. Se observa que para que el consumo específico de agua esté por debajo de 1,0 L kg⁻¹ de c.p.s. se debe trabajar con cantidades de café en cereza mayores a 5.350 kg.

Dado que en la Central Agroindustrial de Café de Belén de Umbria se procesa un promedio diario de 8.000 kg de café en cereza, el requerimiento de agua durante el proceso tiene un consumo específico de agua promedio de 0,83 L kg⁻¹ de c.p.s.

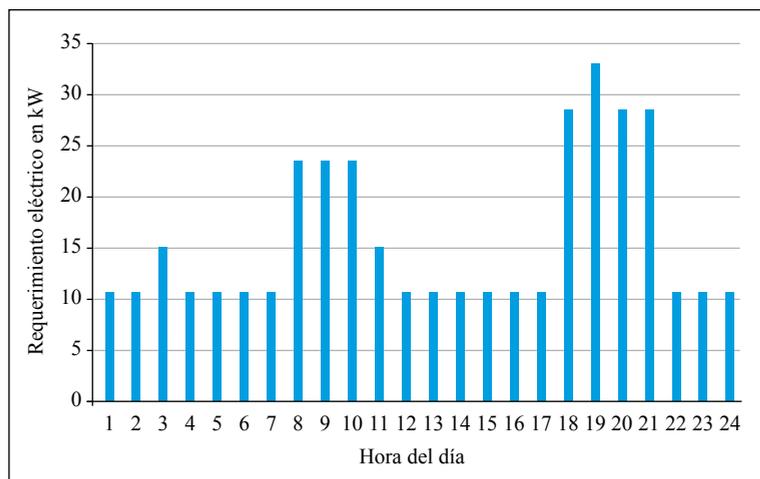


Figura 6. Requerimiento de energía eléctrica en el día pico de la central de beneficio.

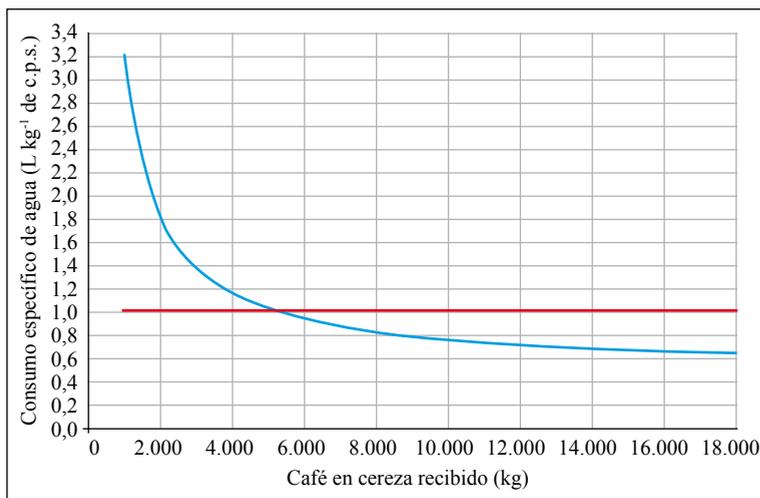


Figura 7. Consumo específico de agua en el proceso en función del café en cereza recibido.

Cabe aclarar que las aguas remanentes y las aguas utilizadas en el módulo Ecomill® tienen destinos diferentes, las primeras van a la planta de tratamiento de aguas residuales y las segundas van al recinto de procesamiento de pulpa y mucílago para ser adicionadas a la pulpa.

Para el aseo de los equipos se utilizó una hidrolavadora de bajo caudal de agua y alta presión (20 MPa). Se tuvo en promedio un caudal de 5,85 L min⁻¹ de agua para el aseo de los equipos y las instalaciones, este caudal fue determinado midiendo el volumen de agua a la salida de la hidrolavadora por unidad de tiempo.

Inicialmente el aseo de los equipos tomaba en total entre 135 y 152 minutos, sin embargo, después de implementar mejoras en el lavado y adquirir mayor experiencia en el manejo de la hidrolavadora, se redujo el tiempo a un promedio de 98 minutos (rango entre 90 y 120 minutos). El consumo de agua ascendió a 573,3 L en promedio (rango entre 526, 5 y 702,0 L día⁻¹) para el aseo de los equipos e instalaciones. La Figura 8 muestra una gráfica del consumo específico de agua en función del café en cereza que se recibe. Se aprecia, que

los consumos específicos de agua son mayores cuando se procesan cantidades menores de café en cereza.

El agua proveniente del aseo de los equipos va a la planta de tratamiento para su descontaminación antes de ser enviada a las corrientes naturales que pasan cerca de la Central.

La Tabla 3 muestra la carga orgánica de cada una de las aguas mencionadas, el consumo específico de agua y la carga orgánica absoluta por cada kilogramo de café pergamino seco que se obtiene en la Central. La contribución en contaminación por parte del mucílago que se desprende en el módulo Ecomill® es de 95,5%, es decir, que con el tratamiento de riego de las aguas de lavado del café sobre la pulpa se controla el 95,5% de la contaminación de las fuentes naturales de agua. Las otras aguas, 2,4% de aguas remanentes y 2,1% de aguas utilizadas para el aseo de equipos e instalaciones, van a un Sistema Modular de Tratamiento de Aguas (SMTA) residuales, donde tienen una remoción mayor del 80% de la carga orgánica. Se espera que con esa eficiencia las aguas salgan de SMTA con máximo 1.000 mg de DQO por litro.

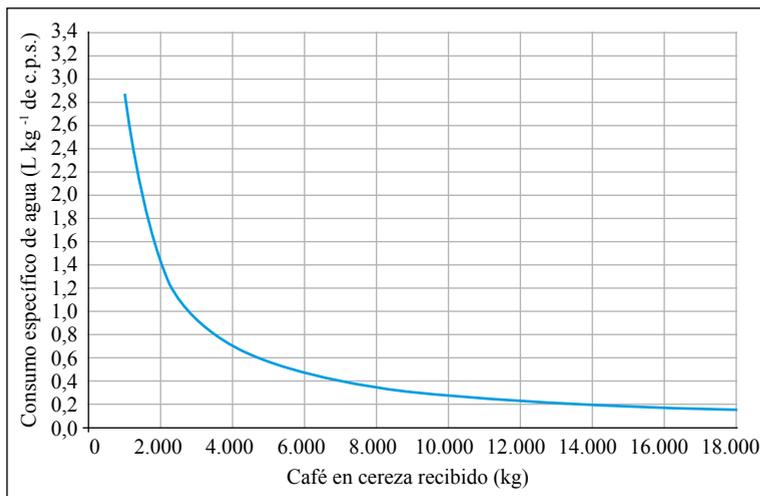


Figura 8. Consumo específico de agua para el aseo de equipos en función del café en cereza recibido.

Tabla 3. Carga orgánica de las aguas residuales de la central de beneficio.

Aguas residuales	Rango carga orgánica	Consumo específico de agua	Carga orgánica absoluta	Tratamiento
	(mg DQO L ⁻¹)	(L kg ⁻¹ c.p.s.)	(mg DQO kg ⁻¹ de c.p.s.)	
Proceso Ecomill®	129.000 -168.000	0,49	82.320	Riego Pulpa
Aguas remanentes	3.800–6.200	0,34	2.108	SMTA
Aguas de aseo	2.800–4.900	0,36	1.764	SMTA

CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó una Central Comunitaria para el Beneficio de Café, para una asociación de 123 caficultores, utilizando tecnologías desarrolladas en Cenicafé, sin generar vertimientos, con un bajo consumo específico de agua (1,19 L kg⁻¹ de c.p.s.), bajo requerimiento de energía eléctrica 0,1046 kW h kg⁻¹ de c.p.s., utilizado las aguas lluvias para el procesamiento.

Se encontró que al recibir café de diferentes altitudes aumenta la capacidad de la planta porque se tienen los picos de cosecha en épocas

diferentes. Consecuentemente, el día pico de una central en estas condiciones es menor que el que se ha considerado para construcciones de ese tipo.

El sistema de división de la masa de café en dos partes, para trabajar con despulpadoras dedicadas para los frutos grandes y pequeños, generó una disminución considerable en el daño mecánico causado al producto.

Las tecnologías limpias desarrolladas en Cenicafé funcionaron de la manera especificada en este tipo de construcción a gran escala.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Colciencias, al Comité de Cafeteros de Risaralda, a la Alcaldía de Belén de Umbria, a la Gobernación de Risaralda y muy especialmente a la Asociación de Productores de Café de Alta Calidad - Cuchilla del San Juan, por sus aportes al desarrollo de este proyecto.

LITERATURA CITADA

- González S., C.A., Sanz U., J.R. y Oliveros T., C.E. (2010). Control de caudal y temperatura de aire en el secado mecánico de café. *Cenicafé*, 61(4), 281-296.
- Guerrero A., J.D. (1992). *Determinación rápida de la calidad del café cereza*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1985). *NTC 2090: Maquinaria Agrícola. Despulpadoras de Café*. Bogotá: Icontec.
- Decreto 3930 (2010). Diario Oficial de la República de Colombia No. 47.873. Bogotá, Colombia, 25 de octubre de 2010.
- Oliveros T., C.E., Sanz U., J.R., Montoya R., E.C. y Moreno C., E.L. (2009). Dispositivo de bajo impacto ambiental para limpieza y clasificación de café en cereza. *Cenicafé*, 60(3), 229-238.
- Oliveros T., C.E., Tibaduiza V., C.A., Montoya R., E.C., Sanz U., J.R. y Ramírez G., C.A. (2014). Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café en proceso con fermentación natural. *Cenicafé*, 65(1), 44-56.
- Parra C., A., Roa M., G., Oliveros T., C.E. y Sanz U., J.R. (2018). *Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino*. Manizales: Cenicafé.
- Peñuela M., A.E., Pabón U., J.P., Rodríguez V., N. y Oliveros T., C.E. (2010). Evaluación de una enzima pectinolítica para el desmucilaginado del café. *Cenicafé*, 61(3), 241-250.
- Roa M., G., Oliveros T., C.E., Álvarez G., J., Ramírez G., C.A., Sanz U., J.R., Dávila A., M.T., Álvarez H., J.R., Zambrano F., D.A., Puerta Q., G.I. y Rodríguez V., N. (1999). *Beneficio ecológico del café*. Chinchiná: Cenicafé.
- Sanz U., J.R. y Oliveros T., C.E. (2017). *Calidad del café en cereza, Método CERPER-2 para centrales de beneficio y beneficiaderos comunitarios*. (Avance Técnico No. 481). Manizales: Cenicafé.
- Tibaduiza V., C.A., Ramírez G., C.A., Sanz U., J.R. y Oliveros T., C.E. (2018). *Análisis y diseño de beneficiaderos ecológicos comunitarios para café*. Manizales: Cenicafé.

EVALUACIÓN DE UN LAVADOR DE FLUJO HORIZONTAL PARA CAFÉ CON DEGRADACIÓN PREVIA DEL MUCÍLAGO

Carlos Eugenio Oliveros Tascón*, Juan Rodrigo Sanz Uribe*, Rubén Darío Medina Rivera**

OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; MEDINA R., R.D. Evaluación de un lavador de flujo horizontal para café con degradación previa del mucílago. Revista Cenicafé 70(1):30-43. 2019

En esta investigación se evaluó un equipo para el lavado del café, con bajo consumo de agua y de energía eléctrica, que podría ser empleado por pequeños productores que utilizan la fermentación natural. Se determinó el efecto de tres velocidades de giro del rotor y tres volúmenes específicos de agua en la remoción de mucílago, capacidad (kg h^{-1} de café lavado) y daño mecánico (%), bajo el diseño experimental completamente aleatorio, en arreglo factorial 3×3 . La unidad experimental estuvo conformada por 20 kg de café variedad Castillo® con mucílago degradado. En cada tratamiento se tuvieron siete unidades experimentales. Se observó que la remoción de mucílago es afectada por la velocidad de giro del rotor y el volumen específico de agua utilizado, pero no por su interacción. El daño mecánico a los granos no se afecta por la velocidad de giro ni el volumen específico de agua. La remoción de mucílago mayor del 96% se obtuvo con velocidad de giro del rotor de 300 r min^{-1} o con un volumen específico de agua de $0,7 \text{ L kg}^{-1}$ de café pergamino seco o más. El daño mecánico causado a los granos durante el lavado con el equipo varió entre 0,03% y 0,20%. Las aguas de lavado resultantes se adicionaron a la pulpa logrando su retención total, evitando la generación de vertimientos. Con el nuevo equipo se lava el café con menor consumo específico de energía eléctrica (1 kWh t^{-1} de café lavado), comparado con las tecnologías empleadas en Colombia, Ecomill® y Becosub.

Palabras clave: Café lavado, consumo de agua, energía, fermentación, daño mecánico.

EVALUATION OF A HORIZONTAL FLOW COFFEE WASHER WITH PREVIOUS MUCILAGE DEGRADATION

This research evaluated a low-water and low-energy consumption coffee washing equipment that may be used by small producers who use natural fermentation. The three-speed effect of the rotor and three specific volumes of water in mucilage removal (response variable), capacity (kg.h^{-1} of washed coffee) and mechanical damage (%), under a completely randomized experimental design in a 3×3 factorial arrangement. The experimental unit consisted of 20 kg of Castillo® variety coffee with degraded mucilage. Each treatment had seven experimental units. Mucilage removal was affected by the rotation speed of the rotor or by the specific volume of water supplied, but not by the interaction of these two variables. The grain mechanical damage is neither affected by the rotation speed nor by the specific volume of water, nor by the interaction between them. Mucilage removal $>96\%$ was obtained with a rotation speed of 300 r.min^{-1} or with a specific volume of water equal or higher than 0.7 L.kg^{-1} of dry parchment coffee. The grain mechanical damage varied between 0.03% and 0.20%. The resulting waters were added to the pulp to obtain total retention and avoid spilling. This new equipment allows to wash coffee with lower energy consumption (1 kWh.kg^{-1} of washed coffee) compared to technologies used in Colombia.

Keywords: Washed coffee, water consumption, energy, fermentation, mechanical damage.

*Investigador Principal e Investigador Científico III. Disciplina de Poscosecha, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

**Investigador Científico II. Disciplina de Biometría, Cenicafé.

En el proceso de beneficio húmedo del café se retiran de los frutos dos estructuras, la pulpa y el mucílago, que en variedad Colombia representan el 44,8% y 14,85%, respectivamente (Montilla *et al.*, 2008), antes de iniciar el proceso de secado. Para retirar el mucílago se emplean medios bioquímicos, enzimáticos y mecánicos, principalmente (Clarke y Macrae, 1987; Cleves, 1998; Coste, 1993; Menchu, 1973; Peñuela, Oliveros y Sanz, 2010; Wintgens, 2004).

En la fermentación natural el mucílago se degrada por efecto de enzimas (pectinasas y pectasas) y bacterias pectolíticas que están presentes en los frutos de café (Avallone, Guyot y Micheaux-Ferriere, 1999; Sivetz y Foot, 1963; Wintgens, 2004). Posteriormente, el mucílago degradado se retira de los granos mediante el lavado con agua limpia.

La remoción completa del mucílago con agua limpia, antes del secado, es necesaria para evitar daños en la calidad del café que pueden presentarse por fermentaciones no controladas y por la presencia del defecto fermento (Puerta, 2015).

Para el lavado del café en Colombia se utilizan las siguientes tecnologías:

Tanque con agitación manual. Empleado especialmente por pequeños productores de café. Los tanques pueden ser fabricados en mampostería, acero inoxidable o en polietileno de densidad media. La masa de café se cubre varias veces con agua limpia y se agita manualmente. El menor consumo específico de agua (4,17 L kg⁻¹ de café pergamino seco-c.p.s.) se obtiene utilizando cuatro enjuagues, en un tanque con bordes redondeados, denominado tanque tina. En el primer enjuague se retira el 66% de la materia orgánica del mucílago y entre el primero y el segundo el 90% (Zambrano e Isaza, 1994).

Canal de correteo. El café se transporta con agua desde el tanque de fermentación hasta un canal abierto, con sección de 0,3 a 0,4 m de ancho, altura de 0,4 a 0,5 m y longitudes desde 5 a 10 m, dependiendo de la capacidad requerida (Roa *et al.*, 1999). Se suministra agua al canal de correteo y con una paleta se agita manualmente la masa de café, generando corrientes que arrastran los granos, permitiendo separarlos en diferentes tramos del canal, por sus diferencias en densidad. El consumo específico de agua es mayor a 20 L kg⁻¹ de cps. En el canal de correteo se pueden lavar y clasificar 1.500 kg h⁻¹ de café, con consumo de agua de 28 a 35 L kg⁻¹ c.p.s. (Wilboux, 1963).

Canal semi-sumergido. Con esta tecnología se utiliza una bomba para transportar el café hasta un canal con ranuras transversales en el fondo, separadas 50 cm. Los granos de mayor densidad (de mejor calidad), se sedimentan en los primeros tramos del canal, cayendo por las primeras ranuras a unas tolvas. Los flotes y gran parte de la pulpa son retirados del canal semisumergido. Con esta tecnología pueden procesarse hasta 15.000 kg h⁻¹ de café lavado, con consumo de agua de 6,4 L kg⁻¹ de c.p.s. sin recircular (Roa *et al.*, 1999).

Ecomill®. Se utiliza para lavar café con mucílago previamente degradado mediante la fermentación natural o con aplicación de enzimas pectinolíticas (Oliveros *et al.*, 2013; Oliveros *et al.*, 2014; Oliveros *et al.*, 2011; Peñuela *et al.*, 2010). El proceso de fermentación se realiza en tanques diseñados para permitir la descarga del café cuando esté listo para iniciar el lavado, sin emplear agua. Mediante un transportador de tornillo sinfin el café se lleva hasta un lavador de flujo vertical ascendente, en el cual se retira del 96% al 97% del mucílago presente, con consumo específico de agua de 0,35 a 0,55 L kg⁻¹ de c.p.s. Las aguas residuales del lavado (ARL)

se adicionan a la pulpa, reteniendo el 100% de su volumen y controlando el 100% de la contaminación causada por ellas. Se diseñaron tres modelos con capacidades de 500, 1.500 y 3.000 kg h⁻¹ de café lavado.

Para retirar el mucílago, sin degradación previa, en Colombia se utiliza la tecnología Becosub (Roa *et al.*, 1999). El mucílago del café recién despulpado es desprendido al someter los granos a esfuerzos principalmente cortantes, a colisiones entre ellos y fricciones con diferentes partes del equipo, en un dispositivo de flujo vertical ascendente. El consumo específico de agua varía entre 0,7 y 1,0 L kg⁻¹ de cps. Las ARL se mezclan con la pulpa, con un promedio de retención del 60% de su volumen y un control del 90% de la contaminación causada por estas (Roa *et al.*, 1999). Se diseñaron modelos con capacidades de 120, 240, 400 y 1.000 kg h⁻¹ de café lavado.

En la Tabla 1 se presenta la información de los equipos empleados para remover mucílago del café con desmucilaginado mecánico (Becosub 300) y con degradación del mucílago mediante la fermentación natural (Ecomill[®] 500).

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 1 con las tecnologías Becosub 300 y Ecomill[®] 500 se reduce el consumo específico de agua con relación al tanque tina, canal de correteo y canal semi-sumergido en 88,0%, 97,5% y 92,2%, respectivamente.

La tecnología Ecomill[®]500 presenta ventajas con respecto a Becosub en la reducción del consumo de agua y de energía, en 50,0% y 76,0%, respectivamente. Adicionalmente, con el Ecomill[®] se logra controlar el 100% de la contaminación causada por las aguas del lavado del café (Oliveros *et al.*, 2014).

A pesar de las ventajas técnicas y ambientales observadas con la tecnología Ecomill[®] su adopción en Colombia es reducida, debido principalmente a su alto costo. En esta investigación se evaluó un equipo diseñado para el lavado de café que podría ser empleado por pequeños productores que utilizan la fermentación natural. Se evaluó el efecto de la velocidad de rotación del rotor del lavador y del volumen específico de agua en la remoción de mucílago, la capacidad y el daño mecánico causado a los granos.

Con esta investigación, se tuvo como objetivo evaluar el efecto de la velocidad de giro del rotor y del caudal específico de agua, en el desempeño de un lavador diseñado para café con degradación previa del mucílago.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. Esta investigación se desarrolló en el Centro Nacional de Investigaciones de Café–Cenicafé, localizado en Manizales (Caldas), altitud de 1.310 m, con promedios de temperatura y humedad relativa de 21,5°C y 79,5%, respectivamente, y precipitación anual de 2.662 mm.

Tabla 1. Desempeño de tecnologías utilizadas en el lavado del café en Colombia.

Tecnología	Consumo de agua	Consumo de energía	Fuente
	(L kg ⁻¹ de c.p.s.)	(kWh t ⁻¹ de café lavado)	
Becosub 300	1,0	16,7	Roa <i>et al.</i> (1999)
Ecomill [®] 500	0,5	4,0	Oliveros <i>et al.</i> (2013)

Descripción del equipo. En los ensayos se utilizó el equipo presentado en la Figura 1, conformado por:

Un tanque con capacidad para 250 L, utilizado generalmente para almacenamiento de agua, fabricado en polietileno de densidad media, con un cono truncado con inclinación de 60° colocado en su fondo para permitir la descarga por gravedad del café con mucílago degradado, en “punto” de lavado (Figura 1a). El tanque, con capacidad para 200 kg de café despulpado, está soportado en una estructura metálica independiente del lavador.

Un lavador con flujo de café horizontal (Figura 1b), con descargas axial del café

lavado y radial de las aguas de lavado. El café es transportado hasta el lavador por un tornillo sinfin ubicado en la base de la tolva del equipo. El rotor con agitadores similares a los utilizados en los equipos Ecomill® (Oliveros *et al.*, 2014) gira concéntricamente en una carcasa con perforaciones circulares, para permitir la expulsión de las ARL a medida que son desprendidas de los granos. El agua es suministrada al lavador en la parte superior de la carcasa, por medio de una bomba sumergible empleada en acuarios (Sanz, Oliveros, López, Mejía y Ramírez, 2007) (Figura 1c). El lavador está soportado en una estructura metálica con ruedas para facilitar su desplazamiento hasta la descarga del tanque.



Figura 1. Equipo utilizado. a. Vista general; b. Lavador; c. Suministro de agua.

Para el accionamiento del equipo en los ensayos se utilizó un motor de 736 W conectado al eje del lavador por medio de una transmisión de potencia, de poleas y banda. Para obtener las velocidades deseadas en el eje del lavador (300, 400 y 500 r min⁻¹) se empleó un variador de frecuencia.

Metodología. En esta investigación de tipo explicativa, se evaluó el efecto de tres velocidades de giro del rotor del lavador y tres volúmenes específicos de agua en la remoción de mucílago (variable de respuesta), capacidad (kg h⁻¹ de café lavado) y daño mecánico a los granos (%), bajo el diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial 3x3, conformando los tratamientos presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Tratamientos considerados en la evaluación del lavador.

Tratamiento	Velocidad de giro del rotor (r min ⁻¹)	Volumen específico de agua (L kg ⁻¹ de c.p.s.)
1	300	0,5
2	300	0,7
3	300	1,0
4	400	0,5
5	400	0,7
6	400	1,0
7	500	0,5
8	500	0,7
9	500	1,0

La unidad experimental estuvo conformada por 20 kg de café Variedad Castillo® en punto de lavado, obtenido de café cereza con separación de flotes antes del despulpado, en máquina Jotagallo 4½, separación de pulpa y frutos sin despulpar en zaranda circular con aberturas de 8 mm y empleo del Fermaestro®,

para determinar la finalización del proceso de fermentación (Peñuela *et al.*, 2013), las unidades experimentales se asignaron aleatoriamente a los tratamientos, de acuerdo con el diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial. Para cada tratamiento se tuvieron siete unidades experimentales.

Para la obtención de los caudales específicos de agua (L min⁻¹), correspondientes a los volúmenes específicos propuestos, se tuvo en cuenta el flujo de café lavado en la descarga del lavador y su equivalente en café pergamino seco, utilizando el factor reportado por Montilla *et al.* (2008). Para la medición de la velocidad de giro del rotor se utilizó un tacómetro marca METEK modelo 1716, con escala de 0 a 10.000 r min⁻¹ y resolución de 1 r min⁻¹ (Figura 2).

El flujo de café a través del lavador fue controlado por el alimentador de tornillo sinfín utilizado y su capacidad de transporte dependió principalmente de sus dimensiones (diámetro externo e interno, y paso), la velocidad de giro y la eficiencia de llenado. El café en punto de lavado es un material altamente viscoso, que presenta fuerte adherencia entre granos y las paredes y ductos por donde fluye, limitando e inclusive impidiendo el flujo desde la tolva hasta el alimentador. Experimentalmente se determinó la capacidad de transporte del alimentador con velocidades de giro de 300, 400 y 500 r min⁻¹. En la Figura 3 se presenta el comportamiento del tornillo sinfín del lavador con las velocidades de rotación consideradas. Se observa que la capacidad de transporte del alimentador varía linealmente con su velocidad de rotación en el intervalo 300 a 500 r min⁻¹, descrita por el modelo lineal presentado (R² = 0,96). Esta información se utilizó para definir el caudal de agua requerido en cada ensayo de cada tratamiento y obtener los volúmenes específicos presentados en la Tabla 3.



Figura 2. Medición de velocidad de giro del rotor del lavador.

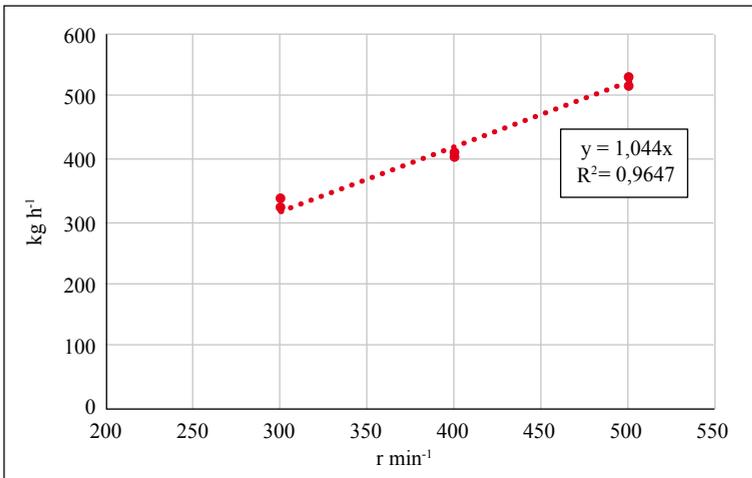


Figura 3. Capacidad de transporte del alimentador del lavador (kg h⁻¹ de café con mucilago degradado en el proceso de fermentación natural).

Tabla 3. Caudal de agua a utilizar en los tratamientos.

Tratamiento	Velocidad de giro del rotor (r min ⁻¹)	Caudal de agua (L min ⁻¹)
T1	300	1,2
T2	300	1,6
T3	300	2,3
T4	400	1,4
T5	400	2,0
T6	400	2,9
T7	500	1,8
T8	500	2,6
T9	500	3,6

A partir de las dimensiones del tornillo sinfín alimentador del lavador (diámetros externo e interno, y paso), la velocidad de rotación y la densidad aparente del café, 830,21 kg m⁻³ (Montilla *et al.*, 2008), se estimó la capacidad de transporte teórica. Con estos valores y la capacidad de transporte obtenida, experimentalmente se registró un coeficiente de llenado promedio para el tornillo sinfín alimentador de 0,33 (D.E. 0,032), valor bajo, característico de materiales que se adhieren a las superficies dificultando su flujo a través de tolvas.

En cada unidad experimental se obtuvo la siguiente información: capacidad del equipo en cinco muestras tomadas en la descarga del lavador, cada 15 s (Figura 4); porcentajes de mucílago inicial y final del café en muestras compuestas de 1,0 kg, tomadas antes y después de pasar el café por el lavador mecánico; y daño mecánico antes y después de pasar por el lavador en las muestras anteriores, separando y pesando los granos que presentarán a simple vista daño mecánico (granos trillados, mordidos o aplastados).

Para la medición de la potencia requerida en el eje del lavador en las mejores condiciones de operación, velocidad de giro y volumen específico de agua, se utilizó un transductor óptico de torque fabricado por Sensor Technology, referencia E200-ORT-12, con rango de 100 N m y exactitud $\pm 0,25\%$, y el software TorqueView® (Figura 5).

Para la variable de respuesta y las variables complementarias se obtuvieron los promedios y la variación de cada tratamiento. El ANAVA se realizó bajo el diseño experimental completamente aleatorio, en arreglo factorial

3x3 (tres velocidades de giro del rotor y tres caudales específicos de agua), al nivel del 5%. Si el ANAVA mostraba efecto de la interacción se seleccionaba la mejor combinación de velocidad de giro del rotor por caudal específico de agua, de acuerdo con la prueba de contraste al 5%. En el caso de no existir efecto de la interacción, se evaluó el efecto de cada uno de los factores por separado, y en el caso de existir efecto se definió la tendencia lineal o cuadrática, según prueba F al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tiempo para alcanzar la degradación del mucílago mayor del 95%, empleando el Fermaestro®, fue de 18 h en todos los ensayos. El café utilizado presentó contenido promedio de mucílago de 18,9% (C.V. 18,8%), con valores mínimo y máximo de 13,6% y 22,9%, respectivamente. Este valor, inferior a los promedios para café recién despulpado, reportados para café variedad Colombia, por Montilla *et al.* (2008) del 27,0% y por Peñuela *et al.* (2010) del 28,0%, se debe a la remoción parcial de mucílago que ocurre durante el proceso de fermentación a medida



Figura 4. Medición en el lavador de la descarga de café.

que es degradado y evacuado del tanque. Similar resultado fue reportado por Oliveros *et al.* (2014).



Figura 5. Dispositivo experimental utilizado para la medición de torque y potencia durante el lavado de café.

A medida que la masa de café avanza en el interior del lavador es sometida al efecto de la fuerza centrífuga que se genera por el giro del rotor. Debido a ello, el mucílago degradado comienza a separarse y a ser expulsado a través de las perforaciones de la carcasa a medida que avanza en el interior del lavador. El agua que se adiciona facilita la separación del mucílago de la superficie de los granos y su expulsión, al disminuir la viscosidad. La mayor remoción de mucílago degradado ocurre en los primeros 2/3 del lavador (Figura 6). El mucílago que todavía no ha sido degradado es removido por efecto de esfuerzos cortantes que actúan en su superficie, por fricción y por colisiones entre granos y partes internas del lavador, especialmente en el último tercio (Oliveros *et al.*, 2011; Oliveros *et al.*, 2014).

Cerca a la descarga de café se suministra agua limpia con el fin de aumentar la remoción de mucílago y obtener un producto como se observa en la Figura 7.



Figura 6. Remoción de mucílago en el lavador.

Para la variable de respuesta (remoción de mucílago), el ANAVA ($p \leq 0,05$) no mostró efecto de la interacción volumen específico de agua x velocidad de giro del rotor del lavador (Figura 8a), pero sí de los factores por separado (efectos simples).

Los resultados obtenidos para la variable de respuesta se presentan en la Tabla 4.

Se observó una tendencia lineal decreciente para la velocidad de rotación (Figuras 8a y 8b), esto es, mayor remoción de mucílago con la menor velocidad de giro de rotor y tendencia cuadrática para el volumen específico de agua (Figura 8c). Se observa que el volumen específico de agua tiene mayor efecto en la remoción de mucílago, siendo más alto con valores de 0,7 y 1,0 L kg⁻¹ de cps. Este resultado podría atribuirse al aumento en el flujo de café que ingresa al lavador cuando aumenta la velocidad de giro del rotor, debido a que el sinfín alimentador está colocado en el mismo eje y como se observa en la Figura 3, el flujo de café aumenta al incrementar la velocidad de giro del alimentador. Cuando esto ocurre el mucílago adicional que ingresa con el café al lavador no alcanza a ser retirado del equipo.

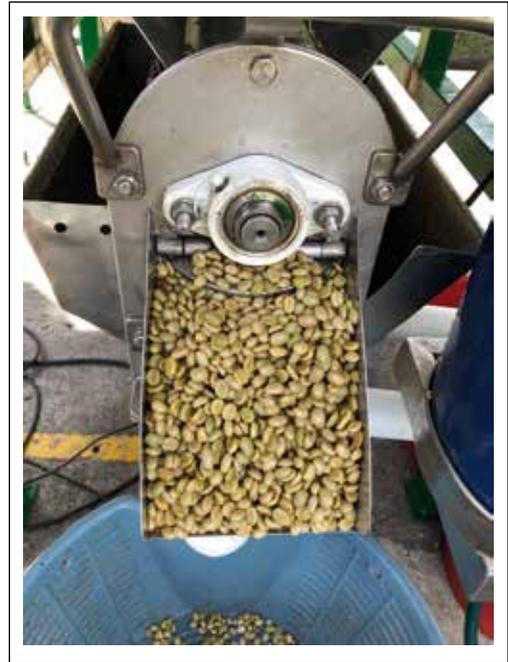


Figura 7. Café lavado obtenido con el nuevo equipo.

Los promedios variaron entre 92,76% (D.E. 1,50%) y 98,77% (D.E. 0,55%). Teniendo en cuenta la remoción de mucílago antes del lavado, durante el proceso de fermentación, con volumen específico de

Tabla 4. Promedios y Desviación Estándar (D.E.) para la variable remoción de mucílago, con el volumen específico de agua (L kg⁻¹ de cps) y la velocidad de giro del rotor del lavador.

Volumen específico de agua (L kg ⁻¹ de c.p.s.)	Velocidad de giro del rotor del lavador (r min ⁻¹)						Promedio (%)	D.E. (%)
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.		
	300		400		500			
0,5	95,40	0,83	92,76	1,50	93,51	2,69	93,89	2,08
0,7	97,69	1,45	97,11	0,87	96,89	1,60	97,23	1,32
1,0	98,76	1,27	98,77	0,55	97,94	1,18	98,49	1,07
Promedio (%)	97,28		96,21		96,11			
D.E. (%)	1,84		2,78		2,66			

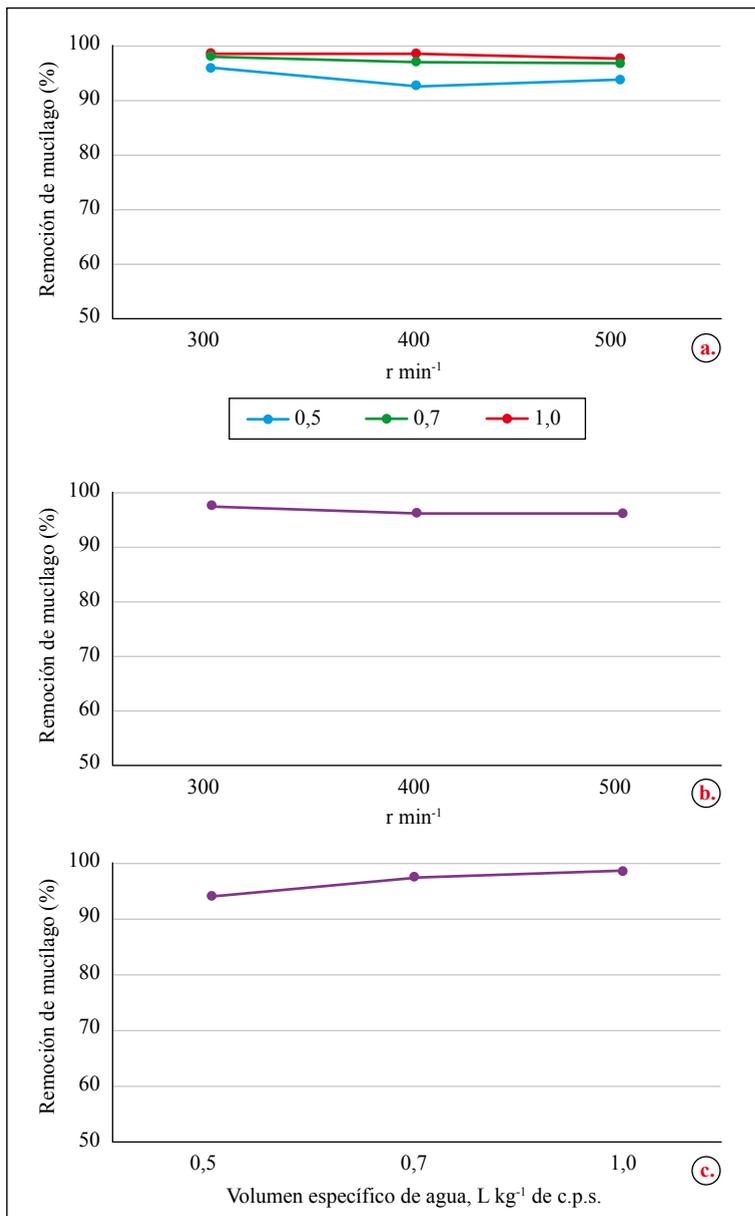


Figura 8. Efecto de la velocidad de giro del eje del lavador y del volumen específico de agua en la remoción de mucílago. **a.** y **b.** Tendencia de la velocidad de rotación; **c.** Tendencia para el volumen específico del agua.

0,7 L kg^{-1} de c.p.s. y 300 r min^{-1} en el eje del rotor puede obtenerse remoción total de mucílago superior al 97% y, adicionalmente, lograr la retención total del volumen de

aguas de lavado al adicionarlas a la pulpa (Oliveros *et al.*, 2014) (Oliveros *et al.*, 2013), como se observa en la Figura 9, evitando la generación de vertimientos.



Figura 9. Aplicación a la pulpa de las aguas resultante del lavado del café con el nuevo equipo. **a.** Drenajes después de 24 h; **b.** Retención total con adición a la pulpa de los drenajes a las 36 h.

El ANAVA ($p \leq 0,05$) no mostró efecto de la interacción volumen específico de agua x velocidad de rotación en la variable flujo de café lavado. Este resultado se explica teniendo en cuenta que el flujo de café a través del lavador depende principalmente de la rotación del tornillo sinfín del alimentador (Figura 10). El flujo de café varió entre $260,5 \text{ kg h}^{-1}$ (D.E. $27,55 \text{ kg h}^{-1}$) y $370,33 \text{ kg h}^{-1}$ (D.E. $33,52 \text{ kg h}^{-1}$ de café lavado), que se alcanza con velocidad de giro del alimentador de 500 rpm. Los resultados obtenidos para esta variable se presentan en la Tabla 5.

El daño mecánico promedio causado a los granos por el equipo varió entre 0,03% (D.E. 0,05%) y 0,20% (D.E. 0,41%), Tabla 6. El ANAVA ($p \leq 0,05$) no mostró efecto de los factores por separado ni de la interacción volumen específico de agua x velocidad de rotación, lo que indica que el daño mecánico no depende del equipo ni de su operación, en las condiciones consideradas en esta investigación.

El daño mecánico causado a los granos de café en el proceso de beneficio, principalmente, es debido a la tecnología empleada y su estado, a la calibración y a la presencia de

frutos verdes y secos que llegan con el café al beneficiadero.

El comportamiento de la potencia en el eje del lavador operado con velocidad de giro del rotor de 300 r min^{-1} y volumen específico de agua de $0,7 \text{ L kg}^{-1}$ de cps se presenta en la Figura 11. Se observan condiciones estables de operación a los 100 s de iniciado el proceso de lavado. A partir de allí ocurren variaciones en la potencia, entre 80 y 156 W, atribuibles a fluctuaciones en el flujo de café que ingresa al lavador, ocasionadas por el tipo de alimentador empleado, de tornillo sinfín. El promedio de la potencia obtenida en la operación del lavador, en 11 lotes de café diferentes, fue $134,6 \text{ W}$ (D.E. $8,05 \text{ W}$).

En la Tabla 7 se presenta la información de energía específica, consumo específico de agua y daño mecánico de tecnologías desarrolladas para retirar el mucílago del café, con y sin degradación previa del mucílago. El menor consumo específico de energía en el lavado del café se obtiene con el nuevo equipo ($1,0 \text{ kWh t}^{-1}$ de café lavado). El consumo específico de agua (L kg^{-1} de cps) con el nuevo equipo es superior al observado en la tecnología Ecomill®

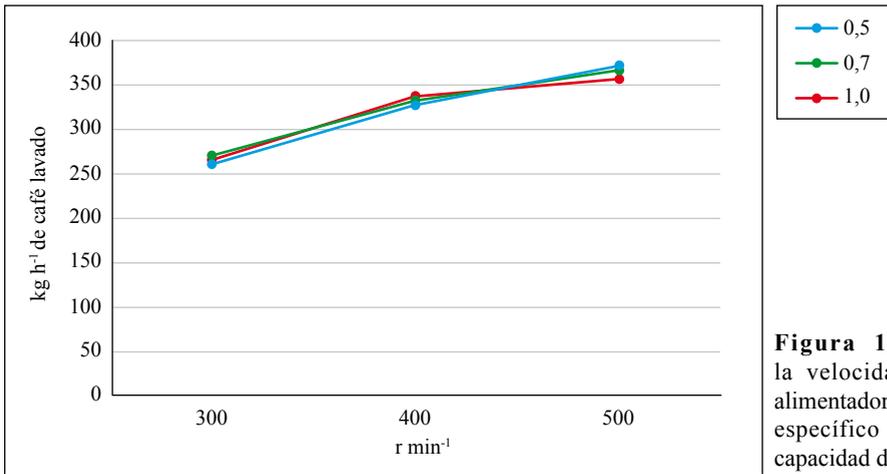


Figura 10. Efecto de la velocidad de giro del alimentador y del volumen específico de agua en la capacidad del lavador.

Tabla 5. Promedios y Desviación Estándar (D.E.) para la variable flujo de café lavado, con el volumen específico de agua ($L\ kg^{-1}$ de cps) y la velocidad de giro del rotor del lavador evaluados.

Volumen específico de agua ($L\ kg^{-1}$ de c.p.s.)	Velocidad de giro del rotor del lavador ($r\ min^{-1}$)						Promedio (%)	D.E. (%)
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.		
	300		400		500			
0,5	260,50	27,55	326,42	35,70	370,33	33,52	319,08	32,26
0,7	269,30	27,40	332,53	32,87	365,81	49,24	322,55	36,50
1,0	266,30	32,96	336,96	33,65	356,47	58,68	319,91	41,76
Promedio (%)	265,37		331,97		364,20			
D.E. (%)	28,15		32,64		46,17			

Tabla 6. Promedios y Desviación Estándar (D.E.) para la variable daño mecánico causado a los granos durante el lavado, con el volumen específico de agua ($L\ kg^{-1}$ de cps) y la velocidad de giro del rotor del lavador evaluados.

Volumen específico de agua ($L\ kg^{-1}$ de c.p.s.)	Velocidad de giro del rotor del lavador ($r\ min^{-1}$)						Promedio (%)	D.E. (%)
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.		
	300		400		500			
0,5	0,16	0,27	0,03	0,08	0,13	0,24	0,11	0,19
0,7	0,09	0,16	0,07	0,15	0,20	0,41	0,12	0,24
1,0	0,09	0,14	0,03	0,05	0,10	0,26	0,07	0,15
Promedio (%)	0,11		0,04		0,14			
D.E. (%)	0,19		0,09		0,30			

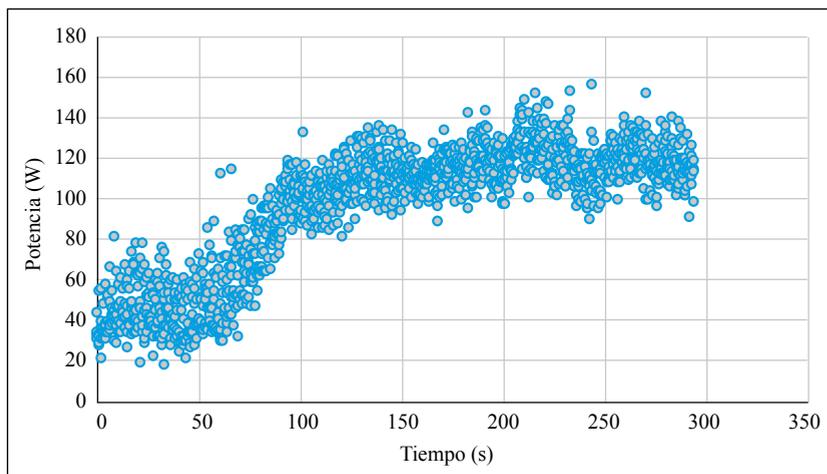


Figura 11. Comportamiento de la potencia en el eje del lavador a 300 r min⁻¹ y 0,7 L kg⁻¹ de café pergamino seco.

Tabla 7. Desempeño de tecnologías utilizadas en el lavado del café.

Equipo	Energía específica	Consumo específico de agua	Daño mecánico	Fuente
	(kWh t ⁻¹ de café lavado)	(L kg ⁻¹ de c.p.s.)	(%)	
Becolsub 300	16,7	1	<0,20	Oliveros <i>et al.</i> (1998)
Ecomill® 500	4,0	0,5	0,30	Oliveros <i>et al.</i> (2013)
Nuevo	1,1	0,7	0,03 - 0,20	Esta investigación

500 (28,5%) e inferior al Becolsub 300 (30%). El daño mecánico causado a los granos con las tres tecnologías está entre 0,03% y 0,3%.

Puede concluirse que:

- La tecnología evaluada permite remover al menos el 97% del mucílago presente en el café despulpado, con degradación previa mediante la fermentación natural. Los mejores resultados se obtienen con velocidad de giro del rotor de 300 r min⁻¹ o volumen específico de agua de 0,7 L kg⁻¹ de c.p.s. o más. El daño mecánico causado a los granos durante el lavado con el equipo varía entre 0,03% y 0,20%.
- La remoción de mucílago es afectada por la velocidad de giro del rotor o el volumen

específico de agua utilizado, mas no por la interacción velocidad de giro x volumen específico de agua. El flujo de café lavado es afectado por la velocidad de giro únicamente. El daño mecánico a los granos no es afectado ni por la velocidad de giro y el volumen específico de agua, ni por la interacción velocidad de giro x volumen específico de agua utilizado.

- Con la nueva tecnología se lava café con menor consumo específico de energía (1,0 kWh t⁻¹ de café lavado) que con la tecnología Ecomill®500, en la cual se emplean 4,0 kWh t⁻¹ de café lavado).
- Las aguas residuales del lavado del café (288 L t⁻¹ de café cereza) pueden secarse utilizando energía solar o adicionar a la pulpa en proporción de 1,5:1 (1,5 kg de pulpa

por 1,0 L de aguas residuales de lavado) para controlar el 100% de la contaminación causada por ellas.

- Con relación al lavado en tanque tina, con la nueva tecnología se logra la reducción en el consumo específico de agua de 83,2%, control del 100% de la contaminación causada por las aguas de lavado y empleo de energía mecánica en lugar de energía humana para obtener igual rendimiento (300 a 350 kg h⁻¹ de café lavado).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Cenicafé, especialmente a los señores Ricardo Grisales y Javier Velásquez por el apoyo recibido en la construcción y evaluación del equipo.

LITERATURA CITADA

- Avallone, S., Guyot, B., y Micheaux-Ferriere, N. (1999, Agosto). *Cell wall polysaccharides of coffee bean mucilage. Histological characterization during fermentation*. Trabajo presentado en XVIII Colloque Scientifique International sur le Café, Helsinki, Finlandia (p. 463-470). París: ASIC.
- Clarke, R., y Macrae, R. T. (1987). *Coffee Vol 2*. Amsterdam: Elsevier Applied Science.
- Cleves S., R. (1998). *Tecnología en beneficiado de café. (2a Ed.)*. San José Costa Rica: Cléves y Faith.
- Coste, R. (1993). *Coffee: The plant and the product*. Londres: MacMillan Press.
- Menchu E., J. (1973). *Manual práctico de beneficios de café*. (Vol. 13). Guatemala, Guatemala: Asociación Nacional de Café. Subgerencia de Asuntos Agrícolas.
- Montilla P., J., Arcila P., J., Aristizábal L., M., Montoya R., E.C, Puerta Q., G.I., Oliveros T., C.E. y Cadena G., G. (2008). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. *Cenicafé*, 59(2), 120-142.
- Oliveros T., C.E., Sanz U., J.R. Montoya R., E.C. y Ramírez G., C.A. (2011). Equipo para el lavado ecológico del café con mucilago degradado con fermentación natural. *Revista de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Universidad de los Andes*, 33, 61-67.
- Oliveros T., C.E., Sanz U., J.R., Ramírez G., C.A., y Tibaduiza V., C.A. (2013). *ECOMILL: tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café*. (Avance Técnico No. 432). Manizales: Cenicafé.
- Oliveros T., C.E., Tibaduiza V., C.A., Montoya R., E.C., Sanz U., J.R. y Ramírez G., C.A. (2014). Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café en proceso con fermentación natural. *Cenicafé*, 65(1), 44-56.
- Peñuela M., A.E., Oliveros T., C.E. y Sanz U., J.R. (2010). Remoción del mucilago de café a través de fermentación natural. *Cenicafé*, 61(2), 159-173.
- Peñuela M., A.E., Pabón U., J.P. y Sanz U., J.R. (2013). *Método fermaestro: Para determinar la finalización de la Fermentación del mucilago de café*. (Avance Técnico No. 431). Manizales: Cenicafé.
- Peñuela M., A.E., Pabón U., J.P., Rodríguez V., N. y Oliveros T., C.E. (2010). Evaluación de una enzima pectinolítica para el desmucilaginado del café. *Cenicafé*, 61(3), 241-251.
- Puerta Q., G.I. (2015). *Buenas prácticas para la prevención de los defectos de la calidad del café: fermento, reposado, fenólico y mohoso*. (Avance Técnico No. 461). Manizales: Cenicafé.
- Roa M., G., Oliveros T., C.E., Álvarez G., J., Ramírez G., C.A., Sanz U., J.R., Dávila A., M.T., Álvarez H., J.R., Zambrano F., D.A., Puerta Q., G.I. y Rodríguez V., N. (1999). *Beneficio ecológico del café*. Chinchiná: Cenicafé.
- Sanz U., J.R., Oliveros T., C.E., López P., U., Mejía G., C. y Ramírez G., C.A. (2007). *Paleta plástica para lavar café con menor esfuerzo*. (Avance Técnico No. 361). Manizales: Cenicafé.
- Sivetz, M. y Foot, H.E. (1963). *Coffee processing technology*. Westport: The AVI publishing Company.
- Wilbaux, R. (1963). *Coffee processing*. (Boletín no oficial de trabajo N° 20). Roma: FAO.
- Wintgens, J. (2004). *Coffee: Growing, processing, sustainable production. A guidebook for Growers, Processors. Traders and Researchers*. Wienheim: Wiley-VCH Verlag.
- Zambrano F., D.A., y Isaza H., J.D. (1994). Lavado del café en los tanques de fermentación. *Cenicafé*, 45(3), 106-118.

EVALUACIÓN DE PROGENIES F4RC1 DE (CATURRA x *Coffea canephora*) x CATURRA

Hernando Alfonso Cortina Guerrero*

CORTINA G., H. A. Evaluación de Progenies F4RC1 de (Caturra x *Coffea canephora*) x Caturra. Revista Cenicafé 70(1):44-64. 2019

Para obtener líneas resistentes a la roya del caféto (*Hemileia vastatrix*) se evaluaron 45 progenies F4RC1 de (Caturra X *C. canephora*) x Caturra. Como testigos susceptibles a la roya se utilizaron las variedades Caturra y San Bernardo, y como resistente la variedad Castillo®. Se evaluó la roya, la altura de planta, la frecuencia de frutos vanos y de granos caracol, el tamaño del grano y la producción durante cuatro años. De las progenies, 38 fueron resistentes a la roya (moda y mediana igual a 0). La altura de las progenies fue estadísticamente igual a la variedad Castillo®. El análisis de varianza para frutos vanos fue altamente significativo, pero solo una progenie tuvo más vanos que la variedad Castillo®. El análisis de varianza y la prueba de Dunnett para granos caracol mostró diferencias y 18 progenies con más caracoles que la variedad Castillo®. Estas progenies no han recuperado totalmente la fertilidad. Se registraron 25 progenies con tamaño de grano significativamente igual a Castillo®. Los análisis de varianza para la producción por año y para el promedio de los cuatro, fueron altamente significativos, pero no se encontraron progenies diferentes de la variedad Castillo®. En conclusión, se ha ampliado la base genética de *C. arabica*, especialmente la resistencia a la roya, y se han seleccionado siete progenies resistentes, con promedios de 153 cm de altura a los 24 meses, frutos vanos de 5,1%, granos caracol 11,2%, 72% de café supremo y producción anual de 2,5 kg/planta de café pergamino seco. Estas darán lugar a líneas para evaluación en ensayos regionales.

Palabras clave: Introgresión, hibridación interespecífica, robustas, resistencia a roya, retrocruzamiento.

EVALUATION OF F4RC1 PROGENIES OF (CATURRA x *Coffea canephora*) x Caturra

In order to obtain lines resistant to coffee rust (*Hemileia vastatrix*), 45 F4RC1 progenies (Caturra X *C. canephora*) x Caturra were evaluated. Caturra and San Bernardo varieties were used as susceptible control and Castillo® variety was used as resistant control. Rust resistance, plant height, frequency of empty beans and peaberries, bean size, and production were evaluated for four years. Thirty-eight progenies were resistant to rust (mode and median equals 0). The height of the progenies was statistically equal to that of Castillo® variety. The analysis of variance for empty beans was highly significant, but only one progeny had higher percentage than Castillo® variety. The analysis of variance and the Dunnett test for peaberries showed differences and 18 progenies had higher peaberries than the Castillo® variety. Such progenies have not fully recovered fertility. Twenty-five progenies showed grain size significantly equal to Castillo® variety. The analyses of variance for the production per year and for the average of the four years were highly significant, but there were no differences in the progenies compared to Castillo® variety. In conclusion, the genetic base of *C. arabica*, especially the resistance to rust, has been increased and there are 7 selected resistant progenies, which have an average height of 153 cm at 24 months, empty beans of 5,1%, peaberries of 11.2%, bean size of 72% of supreme coffee and yearly production of 2.5 kg/plant of parchment coffee, which originate lines for evaluation in regional trials.

Keywords: Introgression, interspecific hybridization, robust, resistance to rust, back cross.

*Investigador Sénior. Disciplina de Mejoramiento Genético, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

De las 103 especies del género *Coffea* (Davis *et al.*, 2006), solamente se cultivan dos: *Coffea canephora* Pierre, que es una especie diploide ($2n=2x=24$), autoincompatible, variable y productiva, que produce los cafés amargos (robustas y conilón); y *Coffea arabica* L., que es autógama y única especie tetraploide ($2n=4X=48$), que produce los cafés suaves.

En Colombia 542.743 cafeteros, cultivan 911.238 hectáreas de café, todas de la especie arábica (IGAC y Federación de Cafeteros de Colombia, 2017), con una producción de 13,6 millones de sacos para el 2018 (Federación Nacional de Cafeteros, 2019).

La roya del café, causada por *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome, es la principal enfermedad del café, defolia las plantas y afecta la producción y la calidad de la cosecha (Castillo y Moreno, 1987; Eskes, 1989). En Colombia, las pérdidas pueden llegar al 30% de la producción (Gaitán *et al.*, 2013). La presencia de una película de agua para la germinación de las esporas, las lluvias nocturnas (Gómez, 1984), las temperaturas entre 16 y 28°C y el bajo brillo solar (Rivillas *et al.*, 2011; Gaitán *et al.*, 2013), características comunes de la zona cafetera colombiana, favorecen la enfermedad.

En los países cultivadores de café de América, predominan variedades susceptibles a esta enfermedad derivadas por selección, mutación o cruzamiento, de las variedades Típica y Borbón. Sobre estas variedades, ocurren con frecuencia epidemias con grandes pérdidas económicas. Por el contrario, en Colombia las variedades resistentes se siembran desde la liberación en 1983 de la variedad Colombia (Castillo y Moreno, 1988), con la cual se inició la sustitución paulatina de la variedad Caturra, predominante, y de la variedad Típica. A la variedad Colombia le siguieron las variedades Tabi (Moreno, 2002) y Castillo® (Alvarado *et*

al., 2005). Sin embargo, hasta el 2006, el área con estas variedades solo alcanzaba el 29%, pero en los años siguientes la sustitución se aceleró, alcanzando en el 2016 el 74% del área cafetera (IGAC y Federación de Cafeteros de Colombia, 2017), esto impulsado por la epidemia de roya de los años 2008 al 2011 (Cristancho *et al.*, 2012) que, junto con La Niña, redujeron dramáticamente la producción.

Todas estas variedades, además de la variedad Cenicafé 1 (Flórez *et al.*, 2016), fueron seleccionadas a partir del cruzamiento entre la variedad Caturra y el híbrido de Timor (HT) CIFC 1343, una introducción del antiguo Centro Internacional de las Royas del Café (CIFC), en Portugal. El HT es una población resistente a la roya, encontrada en la isla de Timor, descendiente de un cruzamiento natural entre *C. arabica* y *C. canephora*. En otros países cafeteros de América también se han desarrollado variedades resistentes a esta enfermedad, la mayoría a partir de cruzamientos de las variedades Caturra o Villa Sarchí (mutantes de porte bajo de la variedad Borbón) con las introducciones del HT CIFC 832/1 o CIFC 832/2.

La resistencia a la roya en Colombia, y en introducciones de origen similar en los países de América, representa un gran riesgo de epidemia, especialmente con el aumento en el área sembrada con variedades resistentes a la roya. Por lo que buscar fuentes de resistencia en los robustas o en otras especies, es una alternativa. En esa dirección, Mahe *et al.* (2007) en Nueva Caledonia, evaluaron 14 híbridos naturales entre *C. arabica* y *C. canephora* con una muestra representativa de las razas de roya del CIFC, y encontraron que ocho eran resistentes a todas; y en Brasil, incorporaron genes de *C. canephora*, en la variedad Icatú de *C. arabica*, a través del cruzamiento entre la variedad Borbón y una selección duplicada de *C. canephora* robusta ($2n=4x=44$). Las F1, fueron

retrocruzadas a la variedad Mundo Novo (Típica x Borbón) de *C. arabica*. Entre las progenies de este cruzamiento se hicieron selecciones y nuevos retrocruzamientos, obteniéndose líneas de alto rendimiento, resistentes a la roya y a los nematodos (Carvalho *et al.*, 1983). Posteriormente, del cruzamiento de Icatú con Catuai, liberaron la variedad Catuai, de porte bajo y resistente a la roya (Matiello *et al.*, 2005).

Por su parte, en Cenicafé se desarrolla un proyecto de mejoramiento de café por hibridación interespecífica, para incorporar características agronómicas, especialmente de resistencia a la roya, en las variedades cultivadas de *C. arabica* (Cenicafé, 2016, 2017 y 2018). Para este proyecto, se han utilizado las introducciones de *C. canephora* de la Colección Colombiana de Café, que fueron evaluadas y seleccionadas en el país por sus características agronómicas, y por su resistencia a la roya en el CIFC, donde fueron clasificadas en el grupo fisiológico A, resistente a las razas de roya identificadas en este centro (Rodríguez, Bettencourt y Rijo, 1975). Además, Castro y Cortina (2012), encontraron que estas selecciones eran resistentes a la llaga macana o cáncer del tronco (*Ceratocystis colombiana* Van Wyk & Wingf y *Ceratocystis papillata* Van Wyk & Wingf.), una enfermedad vascular de importancia en Colombia, a la que son susceptibles las variedades comerciales.

El cruzamiento se hizo tomando como madre una variedad comercial de *C. arabica*, generalmente Caturra, la cual es de porte bajo y productiva, de alta calidad en taza, pero susceptible a la roya; y como padre, una selección de *C. canephora*. Los híbridos (F1) de este cruzamiento (3X), que son casi estériles, se retrocruzaron a la variedad Caturra, obteniéndose las plantas F1RC1, y por autofecundación y selección, las F2RC1, F3RC1 y F4RC1 (Orozco, 1989).

Este método fue utilizado en la década de 1930 en Indonesia, para obtener líneas productivas adaptadas a zonas bajas (Eskes, 1989). En Brasil obtuvieron plantas RC1 resistentes a la roya, provenientes de *C. canephora* conilón (Eskes Braghini y Levy, 1987). En India a partir del cruzamiento entre Robusta (S.274) y la variedad Kent, se obtuvo la selección S.2828 (Sln.6), una F3RC2 liberada en 1970 (Srinivasan *et al.*, 2000), de buen rendimiento y calidad en taza similar a arábica (Prakash *et al.*, 2005).

Alvarado y Cortina (1997) evaluaron 65 progenies F4RC1 obtenidas por Orozco, descendientes de la introducción Robusta Centro CV5. Las plantas F4RC1 seleccionadas, son mantenidas en el banco de germoplasma, donde conservan su resistencia. También han sido cruzadas con germoplasma etíope para desarrollar variedades (Cenicafé, 2016 y 2017).

Dentro del mismo proyecto se han obtenido nuevas progenies a partir de otros progenitores de *C. canephora*. En este artículo se presentan los resultados de la evaluación de las nuevas progenies F4RC1, con el objetivo de seleccionar los mejores y llevarlos a pruebas regionales para su liberación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Progenies. Se sembraron 45 progenies F4RC1. Los progenitores F3RC1, fueron seleccionados en el experimento Meg0652 y las F2RC1 en el experimento MEG0639. Estas F2 descienden de cinco progenies F1RC1, seleccionadas en diferentes experimentos provenientes de cruzamientos de Caturra con selecciones de varias introducciones *C. canephora*. En algunas progenies se conocen las selecciones utilizadas: BP 359 Can I. 93 (17 progenies), BP358 Can I. 239 y BP.46 can I.131 (siete progenies). Pero en otras, la semilla F1RC1 fue

recolectada masalmente sobre las plantas F1 de varios cruzamientos. Si bien la polinización fue libre, por las plantas F1 rodeadas de plantas de Caturra, el progenitor masculino muy probablemente es esta variedad. Las introducciones BP (*Besoekisch Proefstation*), son del programa de mejoramiento de Indonesia y fueron seleccionadas por su resistencia a la roya (Tabla 1).

Las progenies F1RC1, F2RC1 y F3RC1 fueron evaluadas por características agronómicas y por resistencia a la roya. Adicionalmente, en la generación F3RC1, las progenies fueron evaluadas por resistencia a la llaga macana (Cortina y Castro, 2015).

Los progenitores F3RC1 seleccionados tuvieron resistencia a la roya, con calificaciones máximas entre 0 y 2; producción promedio anual de 4,4 kg/planta de café pergamino seco (c.p.s.), altura alrededor de 154 cm a los 25 meses, tamaño promedio de grano de 66,0% de café supremo y baja frecuencia de frutos vanos, con promedio de 7,6% (Tabla 2).

Diseño experimental. Se utilizó un diseño completamente al azar con dos repeticiones y 48 genotipos (45 progenies y tres variedades), la unidad experimental fue un surco de 12 plantas, de las cuales diez fueron efectivas. Como testigos susceptibles a la roya (*H. vastatrix*), se sembraron las variedades Caturra y San Bernardo, y como resistente la variedad Castillo®.

El experimento se sembró en la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé, en la vereda La Quebra (Chinchiná, Caldas), con ubicación N 04°58' y O 75°39', a 1.381 m de altitud, con un promedio de precipitación anual de 2.556 mm, 1.816 horas de brillo solar al año, humedad relativa de 78% y temperatura de 20,8°C.

Manejo agronómico. Las semillas se dispusieron para su germinación en septiembre de 2008, posteriormente las chapolas se llevaron a bolsas (17cm x 25cm) en diciembre del mismo año, y los colinos en el campo, en agosto del 2009. En el almácigo se sembraron 51

Tabla 1. Genealogía de las progenies F4RC1 de (Cat x *C. canephora*) x Caturra.

Retrocruzamiento	F1	F2	F3
Cat CV.2 (Cat CV.4 x BP.358-Canl.239)-ED.93	EY.012	MEG639.722	MEG652.114
Cat CV.2 (Cat CV.4 x BP.358-Canl.239)-ED.93	EY.012	MEG639.722	MEG652.116
Cat CV.2 (Cat CV.4 x BP.358-Canl.239)-ED.93	EY.012	MEG639.722	MEG652.119
Cat CV.2 (Cat CV.4 x BP.358-Canl.239)-ED.93	EY.012	MEG639.722	MEG652.325
Cat CV.2 (Cat CV.4 x BP.358-Canl.239)-ED.93	EY.012	MEG639.722	MEG652.328
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.601	MEG652.152
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.601	MEG652.160
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.601	MEG652.414
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.601	MEG652.418
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.602	MEG652.222
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.602	MEG652.223
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.602	MEG652.224
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.602	MEG652.230

Continúa...

...continuación.

Retrocruzamiento	F1	F2	F3
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.602	MEG652.336
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.602	MEG652.337
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.602	MEG652.340
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.605	MEG652.46
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.605	MEG652.49
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.605	MEG652.492
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.605	MEG652.495
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.605	MEG652.496
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.041	MEG639.605	MEG652.499
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.026	MEG639.475	MEG652.28
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.026	MEG639.475	MEG652.441
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.026	MEG639.475	MEG652.442
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.026	MEG639.475	MEG652.444
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.026	MEG639.818	MEG652.101
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.026	MEG639.818	MEG652.110
[(Cat CV.4 x BP.46-Canl.131)-ED.117] x Cat***	FE.026	MEG639.818	MEG652.423
[(Cat x Can*)-EF**] x Cat***	FB.799	MEG639.704	MEG652.317
[(Cat x Can*)-EF**] x Cat***	FB.799	MEG639.704	MEG652.320
[(Cat x Can*)-EF**] x Cat***	FB.799	MEG639.704	MEG652.171
[(Cat x Can*)-EF**] x Cat***	FB.799	MEG639.704	MEG652.176
[(Cat x Can*)-EF**] x Cat***	FB.799	MEG639.704	MEG652.178
[(Cat x Can*)-EF**] x Cat***	FB.799	MEG639.708	MEG652.92
[(Cat x Can*)-EF**] x Cat***	FB.799	MEG639.708	MEG652.93
[(Cat x Can*)-EF**] x Cat***	FB.799	MEG639.708	MEG652.94
[(Cat x Can*)-EF**] x Cat***	FB.799	MEG639.708	MEG652.97
[(Cat x Can*)-EF**] x Cat***	FB.799	MEG639.708	MEG652.99
[(Cat x Can*)-EI**.] x Cat***	FB.1180	MEG639.410	MEG652.133
[(Cat x Can*)-EI**.] x Cat***	FB.1180	MEG639.410	MEG652.135
[(Cat x Can*)-EI**.] x Cat***	FB.1180	MEG639.410	MEG652.136
[(Cat x Can*)-EI**.] x Cat***	FB.1180	MEG639.410	MEG652.140
[(Cat x Can*)-EI**.] x Cat***	FB.1180	MEG639.410	MEG652.483
[(Cat x Can*)-EI**.] x Cat***	FB.1180	MEG639.410	MEG652.488

* = Varios progenitores de *C. canephora*

** = Varias plantas F1, sobre los cuales se recogió masalmente la semilla F1RC1

*** = Progenitor masculino, posiblemente a la variedad Caturra

progenies, pero se eliminaron seis por segregación en el porte, también fueron eliminadas las plantas anormales y las que no correspondían a las características de la progenie.

La distancia de siembra fue de 1,4 x 1,0 m (7.142 plantas/ha) y un tallo por sitio. En el primer año se reemplazaron las plantas muertas y las que se encontraban en mal estado. Debido a la acidez del suelo (pH = 4,6), se encaló al momento de la siembra con 100 g de cal dolomítica por planta en el hoyo; esta aplicación se repitió al primero y al segundo año de sembrados las plantas. La fertilización se hizo con urea o DAP, aplicados cada 4 meses hasta los 18 meses, y en la etapa productiva se hicieron aplicaciones trimestrales de nitrógeno, fósforo y potasio, siguiendo las recomendaciones de Cenicafé, en el aplicativo Siascafé¹. Las arvenses fueron controladas oportunamente, especialmente en el plato de la planta, los primeros años. Se controló la hormiga arriera con clorpirifos y el manejo de la broca se hizo con recolecciones oportunas e insecticida. No se controló roya, ni mancha de hierro (*Cercospora coffeicola*). En agosto de 2011, se inició la recolección, la cual se hizo periódicamente, llevando registros hasta diciembre de 2016.

Evaluación agronómica

Se evaluaron:

Altura de la planta. Este carácter es determinante de la densidad de siembra y de los ciclos de renovación del cultivo. Se midió a los 24 meses de sembradas las plantas en el campo, tomando la longitud desde la base del tallo hasta el ápice.

Características de fruto y grano. Las anomalías de los frutos y granos de café

se reflejan en mermas de la producción y de la calidad del producto (Castillo y Moreno, 1988). Los muestreos para determinar la frecuencia de estas características, se realizaron en los pases de la cosecha principal, durante los años de 2011 al 2014. Se midió la frecuencia de frutos vanos, como la proporción de frutos maduros y sanos que flotan de una muestra de 100 frutos. Para los granos caracol se contaron los granos redondeados en una muestra de 400 y se determinó el porcentaje.

El tamaño del grano determina la aceptación comercial y el precio del café. Una de las medidas del tamaño de grano es el porcentaje de café supremo, que es la proporción en peso de café verde retenido por una zaranda de orificios circulares de 17/64 de pulgada (Castillo y Moreno, 1988). Esta característica se evaluó en una muestra de 100 g.

Producción. Una de las limitaciones en el mejoramiento por hibridación interespecífica es la esterilidad de las líneas, que como consecuencias son de menor producción. Se determinó el peso de la producción de café cereza por planta por pase (frutos cosechados por pase de recolección) durante cuatro años, de agosto de 2011 a junio de 2015, entre 15 y 16 pases por año.

Resistencia a la roya. La transferencia de la resistencia de *C. canephora*, es un carácter del mayor interés. Según Eskes (1989), para determinar la resistencia a la roya en programas de mejoramiento, el uso de escalas es aconsejable, porque permite evaluar rápidamente sin perder mucha precisión. Se utilizó la Escala I de Eskes y Braghini (1981) que mide el número de ramas por planta, con lesiones de roya esporuladas, y va de 0 a 9 en forma ascendente. Se hicieron seis mediciones, de agosto de 2011 a mayo del 2015.

¹ www.cenicafe.org/servicios.

Tabla 2. Características de los progenitores F3RC1 de (Caturra x *C. canephora*) x Caturra.

Progenitor	Producción kg/planta/ año*	Frutos vanos (%)	Granos caracol (%)	Tamaño de grano (porcentaje de café supremo)	Altura a los 25 meses (cm)	Roya**
Meg0652.114	5,4	6,0	10,5	78,1	175	4
Meg0652.116	4,2	4,7	13,0	62,5	160	2
Meg0652.119	4,0	4,0	7,8	74,7	155	4
Meg0652.325	2,8	5,4	7,9	73,1	140	1
Meg0652.328	5,2	3,3	7,1	77,0	150	3
Meg0652. 46	3,2	10,8	16,5	66,4	145	2
Meg0652. 49	3,0	9,4	18,4	63,6	150	1
Meg0652.152	5,4	9,6	16,5	63,3	155	2
Meg0652.160	3,5	10,0	11,7	64,0	150	1
Meg0652.222	3,7	10,3	17,3	59,1	160	1
Meg0652.223	2,9	9,3	17,5	51,6	155	0
Meg0652.224	4,1	12,2	28,8	45,9	170	0
Meg0652.230	2,5	7,6	17,3	69,1	140	2
Meg0652.336	2,8	14,7	15,2	68,6	175	0
Meg0652.337	3,9	7,8	13,6	59,1	175	0
Meg0652.340	5,8	15,8	33,5	58,7	170	1
Meg0652.414	3,9	8,5	12,5	68,8	170	1
Meg0652.418	3,9	8,0	16,1	53,3	185	1
Meg0652.492	4,3	7,2	15,9	58,8	170	1
Meg0652.495	3,5	13,5	16,9	81,7	175	0
Meg0652.496	4,3	17,5	25,0	73,7	160	1
Meg0652.499	3,1	8,5	17,5	78,2	175	1
Meg0652.28	2,8	5,8	11,0	65,2	130	1
Meg0652.101	2,6	9,9	17,4	27,7	125	0
Meg0652.110	3,4	10,5	31,4	68,5	125	2
Meg0652.423	2,2	7,6	21,0	63,8	135	3
Meg0652.441	3,0	9,3	11,6	75,5	165	1
Meg0652.442	3,4	14,0	14,6	56,4	175	0
Meg0652.444	4,1	5,0	22,3	71,5	165	1
Meg0652.92	4,4	3,8	11,2	59,9	140	0
Meg0652.93	2,4	4,3	8,3	55,1	120	0

Continúa...

...continuación.

Progenitor	Producción kg/planta/ año*	Frutos vanos (%)	Granos caracol (%)	Tamaño de grano (porcentaje de café supremo)	Altura a los 25 meses (cm)	Roya**
Meg0652.94	2,3	5,7	8,6	58,4	110	1
Meg0652.97	3,6	8,7	8,0	75,2	140	1
Meg0652.99	2,4	7,6	9,1	36,6	140	0
Meg0652.171	5,1	3,8	8,8	59,2	150	2
Meg0652.176	3,9	2,8	10,3	83,7	145	1
Meg0652.178	3,4	3,3	11,7	75,5	160	3
Meg0652.317	3,4	2,1	11,1	80,2	155	3
Meg0652.320	2,6	6,8	13,2	69,5	145	2
Meg0652.133	4,1	5,0	8,4	77,1	150	1
Meg0652.135	2,4	1,0	5,3	71,5	140	0
Meg0652.136	1,9	4,7	9,9	83,1	145	0
Meg0652.140	4,5	6,7	9,1	73,7	160	1
Meg0652.483	3,7	4,6	10,0	73,3	180	1
Meg0652.488	3,2	4,8	9,4	75,0	160	2

* Café pergamino seco

** Máxima calificación de seis evaluaciones. Escala I de Eskes y Braghini.

Análisis de la información

Se revisó la información para las diferentes características de cada planta y su consistencia. Se descartaron las plantas con problemas de desarrollo y las muertas. Para el análisis de la altura de la planta se descartaron las plantas descopadas y las resemebradas.

Para la producción por planta se sumaron las producciones de cada pase durante un año, tomando como periodo de corte el mes de junio, que es el de menor producción en la zona, y llevándolo a café pergamino seco (c.p.s.), relación 5:1. Con la producción anual por planta y la producción media por año, lo mismo que para el crecimiento y las características de grano, se hizo análisis de varianza para un diseño completamente al azar, utilizando el

procedimiento GLM del programa estadístico SAS V 9.4, y cuando las diferencias fueron estadísticamente significativas ($F > 1,62$) se realizó prueba de Dunnett_{0,05}, con la variedad Castillo® como testigo. Para la roya se hicieron distribuciones de frecuencia por progenie, para cada una de las evaluaciones y para la calificación máxima por planta. Para la selección se consideraron aquellas progenies cuyas calificaciones máximas no superaran el grado tres en la escala.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Roya. Durante las evaluaciones la variedad Caturra tuvo una alta infección, con moda y mediana para las calificaciones máximas de 7 (Tabla 3), un grado propio de genotipos susceptibles (Moreno y Alvarado, 2000). Esto

muestra que durante el experimento hubo condiciones favorables para el desarrollo de la enfermedad.

En contraste, más del 75% de las plantas de las progenies no tuvieron roya en ninguna evaluación, y aunque en todas se observó la enfermedad, su incidencia en la mayoría de ellas, es decir, la frecuencia de plantas de la progenie en las que alguna vez se observó roya, fue inferior al 50,0%. La calificación máxima para el 80,0% de las plantas fue menor o igual a 2. La progenie menos resistente fue la MEG0652.423, en la cual todas las plantas tuvieron roya, y la mediana y la moda para la calificación máxima de roya fue 3. Hubo progenies muy resistentes, como las MEG0652.136, MEG0652.222 y MEG0652.28, en las que solo una o dos plantas mostraron roya, con calificación máxima de 1 (Tabla 3). Esto indica que estas progenies mantienen la resistencia de sus padres (Tabla 2) y, a su vez, de los progenitores diploide.

Los resultados también muestran el progreso de la selección para resistencia a la roya. En el experimento MEG0652, donde fueron seleccionados los progenitores F3RC1,

predominaron las plantas resistentes, aunque con presencia de roya y calificaciones máximas entre 1 y 4 (Cortina y Castro, 2015). En esta generación desarrollada a partir de estos progenitores con alta resistencia (Tabla 2), permanecieron sanas la mayoría de las plantas. Por su parte, en la variedad Castillo® solo tres de las 20 plantas, no mostraron roya, la moda fue 2 y la mediana 1, mostrando la vigencia de su resistencia. Aunque su incidencia sea marcadamente mayor a la de la mayoría de las progenies que tienen moda y mediana de cero (Tabla 3).

Alvarado y Cortina (1997) en los experimentos de evaluación en la misma generación, reportan que en el CIFC, 40 progenies segregaban plantas del grupo fisiológico A. Sin embargo, en el campo, la proporción de plantas sin roya y de progenies resistentes fue, en general, menor. Se clasificaron como resistentes a aquellas progenies con más del 75,0% de plantas con calificaciones máximas menores de 5, después de seis o más evaluaciones, durante de tres a cinco años; y usando la misma escala I de Eskes y Braghini (1981) clasificaron como resistentes a 48 de las 65 progenies. Solo una, la FK 205, nunca mostró roya.

Tabla 3. Calificación máxima de roya de las progenies F4RC1* de (Caturra x *C. canephora*) x Caturra.

Progenies	Número de plantas en cada grado de la escala I de Eskes y Braghini									Total	Moda	Mediana
	0	1	2	3	4	5	6	7	8			
MEG0652.337	19	1								20	0	0
MEG0652.483	19	1								20	0	0
MEG0652.136	18	2								20	0	0
MEG0652.336	18	1								19	0	0
MEG0652.93	17	3								20	0	0
MEG0652.28	17	2								19	0	0
MEG0652.97	17	2		1						20	0	0
MEG0652.222	17	1								18	0	0
MEG0652.340	16	1	1	1						19	0	0

Continúa...

...continuación.

**Número de plantas en cada grado de la escala I
de Eskes y Braghini**

Progenies	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total	Moda	Mediana
MEG0652.488	16	1	1							18	0	0
MEG0652.94	16	1								17	0	0
MEG0652.133	15	4								19	0	0
MEG0652.135	15	4		1						20	0	0
MEG0652.176	15	3	2							20	0	0
MEG0652.328	15	3		1	1					20	0	0
MEG0652.223	15	2	1	1		1				20	0	0
MEG0652.140	15	1	1							17	0	0
MEG0652.224	15	1				2	2			20	0	0
MEG0652.49	14	5		1						20	0	0
MEG0652.495	14	2	3	1						20	0	0
MEG0652.171	14	2	2		1					19	0	0
MEG0652.442	13	2	1							16	0	0
MEG0652.114	12	5	1	1		1				20	0	0
MEG0652.160	12	4	1	3						20	0	0
MEG0652.414	11	4			1		1	2	1	20	0	0
MEG0652.320	11	3	3	3						20	0	0
MEG0652.116	11	3	1	2				2		19	0	0
MEG0652.441	11	2	3		1					17	0	0
MEG0652.99	11	2	1							14	0	0
MEG0652.92	10	7	1	1			1			20	0	0
MEG0652.119	10	6	3							19	0	0
MEG0652.499	10	5	3			2				20	0	0
MEG0652.444	10	2	6	2						20	0	0
MEG0652.46	10	2	1	1	2	1				17	0	0
MEG0652.325	10	2		3		1	2	2		20	0	0
MEG0652.152	9	3	3				1	2	1	19	0	1
MEG0652.230	9		2	1	1	3				16	0	0
MEG0652.492	8	5	1	2			2	2		20	0	1
MEG0652.496	8	3	1	2		3	1		1	20	0	1
MEG0652.110	8	2	5	1	1		3			20	0	2
MEG0652.178	7	6	4	2		1				20	0	1
MEG0652.101	4	5	5	2	2	1				20	1	2
MEG0652.418	4	5	4	2	2	1		1	1	20	1	2
V. Castillo®	3	6	5	5	1					20	1	2
MEG0652.317	2	3	8	4	2	1				20	2	2
San Bernardo		2	6	4	5					20	2	3
MEG0652.423		1	5	6		1	1	3	2	20	3	3
V. Caturra						2	5	5	5	20	7	7

* Máximo de 6 evaluaciones desde agosto de 2011 a mayo de 2015.

En Brasil, Matiello, Almeida y Carvalho (2005) reportan ataques de roya en poblaciones de Icatú, con infecciones que llegan al 50%, aunque algunas líneas como la IAC2944-859-190, son resistentes. A pesar de que todas las líneas de la variedad Catucaí, un cruce natural de Icatú, son atacadas en mayor o menor grado por la roya, muchas de ellas son resistentes, al no mostrar una pérdida acentuada de hojas. Mientras que, en India, Sreenivasan *et al.* (1993), encontraron de 85,0% a 100,0% de plantas resistentes, en progenies de híbridos entre *C. arabica* x *C. canephora* duplicado; y que la selección SIn 2828, ha mostrado en el campo, alta tolerancia a la roya.

En su mayoría, las progenies evaluadas en este experimento heredan la resistencia de las accesiones de *C. canephora*, BP 48, BP 358 y BP 359, mientras que la resistencia a la roya, de todas las variedades liberadas en Colombia, derivan su resistencia del HT CIFC 1343 (Castillo y Moreno, 1988; Moreno, 2002; Alvarado *et al.*, 2005; Flórez *et al.*, 2016). Esta diferencia en los progenitores es de la mayor importancia, y si bien, no se tiene la certeza de que son otros genes, ya que en el HT, la resistencia también proviene de *C. canephora*, el origen de las introducciones y la diferencia en la distribución de la reacción a roya permite inferir, como ya lo habían sugerido Cortina y Castro (2015), que en las progenies resistentes se encuentran genes o combinaciones de genes diferentes a los de las líneas derivadas del HT 1343 (SH5 a SH9), componentes de las variedades Colombia, Tabí, Castillo y Cenicafé 1, que en Colombia comienzan a ser atacadas (Moreno y Alvarado, 2000); o a los de la variedad Costa Rica 95, seleccionada del cruzamiento de Caturra x HT 832/1 (Aguilar, 1995), que también han registrado fuertes ataques en Colombia (Cortina *et al.*, 2012); y además difieren de

los *C. canephora* Centro CV5 (Alvarado y Cortina, 1997).

Estas nuevas combinaciones de genes de resistencia son de gran valor para enfrentar las nuevas razas de roya y respaldan la afirmación de Eskes y Kushalappa (1989), de que los híbridos de *C. arabica* con especies diploides, son la principal fuente para la obtención de variedades de café con resistencia a la roya.

Crecimiento

Altura de planta. La altura promedio y la desviación estándar de las progenies $151 \pm 12,9$ cm (Tabla 4), fue similar a la de las variedades Castillo® ($151 \pm 10,2$ cm) y Caturra ($153 \pm 7,7$ cm). No se observó segregación por porte alto (ct ct) El análisis de varianza fue altamente significativo entre progenies ($p < 0,001$), pero según la prueba de Dunnett_{0,05}, solo la progenie MEG0652.418 fue más alta que la variedad Castillo®.

Como se espera, las progenies en esta generación fueron más homogéneas que las evaluadas en la generación anterior, donde algunas progenies fueron significativamente más altas o bajas que el testigo (Cortina y Castro, 2015). Aunque los *C. canephora* robusta son de mayor porte que la variedad Caturra, la dominancia de este gen -Ct, Ct- (Krug y Carvalho 1951), el segundo cruzamiento y la selección, llevaron rápidamente a homogenizar las progenies para el porte, de modo que tanto los progenitores como las progenies fueron de porte bajo, si bien en ambas generaciones se observó variación. Esto coincide con lo indicado por Alvarado y Cortina (1997) que, aunque no presentan la altura de las progenies evaluadas, dicen que su altura y morfología son similares a los de la variedad Caturra.

Tabla 4. Altura promedio y desviación estándar (D.E.) a los 24 meses, de las progenies F4RC1 de (Cat x *C.canephora*) x Cat.

Progenies	Promedio (cm)	D.E. (cm)	
San Bernardo	115,8	16,8	IC
MEG0652.46	138,3	11,4	-
MEG0652.101	139,2	10,4	-
MEG0652.97	141,0	9,9	-
MEG0652.94	142,1	8,4	-
MEG0652.99	142,5	10,1	-
MEG0652.336	143,9	6,3	-
MEG0652.423	144,8	8,5	-
MEG0652.492	145,8	8,2	-
MEG0652.325	146,8	11,0	-
MEG0652.140	146,9	12,0	-
MEG0652.317	147,5	7,7	-
MEG0652.176	148,3	11,5	-
MEG0652.92	148,5	11,5	-
MEG0652.496	148,8	12,3	-
MEG0652.488	150,5	5,2	-
MEG0652.110	151,0	12,7	-
MEG0652.230	151,1	8,4	-
MEG0652.135	151,3	9,2	-
MEG0652.444	152,0	8,9	-
MEG0652.222	152,8	8,0	-
MEG0652.495	153,0	9,4	-
MEG0652.441	153,7	10,1	-
MEG0652.337	154,0	9,7	-
MEG0652.483	154,3	12,1	-
MEG0652.136	154,5	10,9	-
MEG0652.49	154,5	7,2	-
MEG0652.320	154,8	10,6	-
MEG0652.171	155,3	7,5	-

Continúa...

...continuación.

Progenies	Promedio (cm)	D.E. (cm)	
MEG0652.160	155,3	10,5	-
MEG0652.133	155,5	8,1	-
MEG0652.93	155,8	7,7	-
MEG0652.442	156,3	9,6	-
MEG0652.499	158,2	6,9	-
MEG0652.178	158,9	7,6	-
MEG0652.414	159,3	10,4	-
MEG0652.119	159,5	6,0	-
MEG0652.116	159,7	11,6	-
MEG0652.28	162,5	6,8	-
MEG0652.114	163,2	9,9	-
MEG0652.224	163,7	9,4	-
MEG0652.223	164,5	5,4	-
MEG0652.328	164,8	6,8	-
MEG0652.340	164,8	7,2	-
MEG0652.152	165,5	7,6	-
MEG0652.418	165,8	15,7	SC
V. Castillo	151,0	10,2	-
V. Caturra	152,8	7,7	-
Promedio	152,6	12,9	

IC= Más baja que la variedad Castillo® según Dunnett_{0,05}

SC= Más alta que la variedad Castillo® según Dunnett_{0,05}

Granulometría

Frutos vanos. Los frutos vanos son producidos por el aborto tardío del óvulo fertilizado, que detiene el crecimiento del endospermo, pero no de la cavidad locular. Los frutos tienen apariencia normal, pero pueden contener una o ambas cavidades vacías (Castillo y Moreno, 1988). El promedio de frutos vanos del experimento fue de 7,8% (Tabla 5), similar al de los progenitores,

ligeramente menor que el de la variedad Castillo® (8,1%) y un poco mayor que el de la variedad Caturra (5,7%). El análisis de varianza fue altamente significativo ($p < 0,0001$), y la prueba de Dunnett_{0,05}, mostró diferencias significativas entre la progenie MEG0652.496 y la variedad Castillo®. Al igual que en la generación anterior, la mayoría de las progenies tuvieron frecuencia de frutos vanos similares a las de los testigos (Cortina y Castro, 2015).

De acuerdo con Castillo y Moreno (1988), estos frutos vanos son frecuentes en híbridos interespecíficos y en autoploidos, sin embargo, la baja frecuencia observada en este experimento, muestra que la gran mayoría de las progenies han superado los problemas de esterilidad asociadas a los híbridos interespecíficos.

Al respecto Alvarado y Cortina (1997) afirman que la esterilidad del híbrido triploide disminuye rápidamente con el retrocruzamiento y con cada generación de autofecundación, debido tanto a la selección natural en poblaciones en segregación, gamética o cigótica, como a la selección artificial; recuperándose rápidamente la fertilidad, la autocompatibilidad y la morfología de la variedad Caturra.

Respaldan esta afirmación Herrera *et al.* (2002), quienes determinaron por citometría de flujo, el contenido relativo de ADN de seis progenies F1RC1 (diez plantas/ progenie) de Caturra X (Caturra x *C. canephora*), encontrando que este varió alrededor del

progenitor recurrente, la media de todas las plantas no fue significativamente diferente ($p=0,398$) del estimado para *C. arabica*, y las progenies fueron estadísticamente iguales ($p>0,05$) a arábica, excepto una. Además, al estudiar la segregación en las F1RC1, usando 12 microsatélites, encontraron una selección severa, en contra de la introgresión de material genético de *C. canephora* en *C. arabica* por la vía de los triploides.

Alvarado y Cortina (1997) también encontraron baja frecuencia de frutos vanos entre sus progenies, de 2,0% a 9,8%, con una alta proporción de progenies con porcentajes menores del 5%; además, reportan baja frecuencia en plantas seleccionadas de híbridos interespecíficos obtenidos por esta vía y conservadas en el banco de germoplasma de café de Cenicafé. Por otra parte, Fazuoli *et al.* (1983), en plantas F2RC2 de Icatú, tuvieron porcentajes de frutos vanos de alrededor del 15%, siendo este porcentaje uno de los mayores inconvenientes en algunas poblaciones de Icatú.

Tabla 5. Características de fruto y grano de las progenies F4RC1 de (Caturra x *C. canephora*) x Caturra.

Progenie	Frutos vanos (%)		Granos caracol (%)		Café supremo (%)	
MEG0652.136	8,3	-	12,0	-	78,5	-
V. Castillo®	8,1	-	9,1	-	77,9	-
MEG0652.135	4,6	-	10,7	-	77,0	-
MEG0652.133	4,2	-	9,8	-	75,6	-
MEG0652.317	6,3	-	13,2	-	75,4	-
MEG0652.114	6,9	-	12,1	-	74,3	-
San Bernardo	5,5	-	11,3	-	73,5	-
MEG0652.499	7,4	-	18,1	SC	72,7	-
MEG0652.483	5,3	-	11,6	-	71,6	-
MEG0652.488	5,0	-	11,5	-	70,5	-
MEG0652.140	5,1	-	12,5	-	70,4	-
MEG0652.178	5,4	-	15,0	-	68,9	-
MEG0652.176	6,4	-	15,0	-	68,2	-

Continúa...

...continuación.

Progenie	Frutos vanos (%)		Granos caracol (%)		Café supremo (%)	
MEG0652.325	5,9	-	9,6	-	65,3	-
MEG0652.495	9,8	-	16,7	SC	64,8	-
MEG0652.49	8,4	-	16,6	SC	64,1	-
MEG0652.97	6,7	-	12,2	-	63,1	-
MEG0652.93	4,7	-	10,0	-	63,0	-
MEG0652.119	5,9	-	10,1	-	62,6	-
MEG0652.336	8,3	-	9,8	-	62,4	-
MEG0652.230	8,4	-	16,8	-	61,8	-
MEG0652.441	7,1	-	13,0	-	61,5	-
MEG0652.46	9,6	-	13,3	-	61,2	-
MEG0652.442	8,7	-	15,8	-	61,0	-
MEG0652.328	10,3	-	19,2	SC	60,0	IC
MEG0652.28	8,1	-	15,9	SC	59,9	IC
MEG0652.171	6,8	-	16,6	SC	57,6	IC
MEG0652.92	6,4	-	11,9	-	57,2	IC
MEG0652.222	8,9	-	22,5	SC	57,0	IC
MEG0652.152	7,2	-	15,8	-	55,7	IC
MEG0652.110	16,0	-	23,4	SC	55,4	-
MEG0652.496	17,4	SC	25,0	SC	55,2	IC
MEG0652.337	15,8	-	13,8	-	54,8	IC
MEG0652.444	6,6	-	20,5	SC	54,3	IC
MEG0652.320	7,8	-	18,8	SC	53,4	IC
MEG0652.423	7,8	-	20,5	SC	53,0	IC
MEG0652.94	5,4	-	11,0	-	51,7	IC
MEG0652.116	5,5	-	11,3	-	50,0	IC
MEG0652.223	8,1	-	22,5	SC	49,6	IC
MEG0652.414	7,3	-	15,3	-	49,7	IC
MEG0652.160	10,2	-	12,4	-	46,4	IC
MEG0652.492	8,2	-	19,5	SC	46,3	IC
MEG0652.418	6,3	-	17,4	SC	45,5	IC
MEG0652.99	7,8	-	12,7	-	45,2	IC
V. Caturra	5,7	-	8,6	-	45,2	IC
MEG0652.340	13,2	-	26,2	SC	43,6	IC
MEG0652.101	12,3	-	18,5	SC	43,5	IC
MEG0652.224	12,7	-	22,1	SC	27,5	IC
Promedio	7,8		15,2		60,3	

IC= Más baja que la variedad Castillo® según Dunnett_{0,05}

SC= Más alta que la variedad Castillo® según Dunnett_{0,05}

Granos caracol. Los granos caracoles se producen cuando uno de los óvulos aborta tempranamente, con atrofia de la cavidad locular. Como resultado, la semilla del otro lóculo se desarrolla tomando la forma redondeada del fruto (Castillo y Moreno 1988). El promedio de granos caracol del experimento fue de 15,2% (Tabla 5) similar al de los progenitores y mayor que el de las variedades Castillo® (9,1%) y Caturra (8,6%), que fueron las de menor frecuencia registraron para esta clase de granos. El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre progenies ($p < 0,0001$), y con la prueba de Dunnett_{0,05}, se encontró que 18 progenies eran superiores a la variedad Castillo®.

Alvarenga, Begazo, Cardoso y De Paula (1995) encontraron en progenies de Icatú, de generaciones avanzadas, frecuencias de frutos vanos inferiores al 5,0%, mientras que los granos caracol estaban entre 10,0% y 20,0%, como en este experimento. Mientras que Alvarado y Cortina (1997), encontraron una frecuencia de granos caracol entre 6,7% y 16,8%, con un promedio de 9,4%, inferior al registrado en este experimento, donde la mayoría de las progenies están dentro de los límites comerciales.

Basados en la frecuencia de frutos vanos y granos caracol, Alvarado y Cortina (1997) consideraron que en 20 de las 67 progenies F4RC1 derivadas del *C. canephora* centro Cv1, la gametogénesis y la fecundación era normal. En este experimento, en el que se evalúan progenies descendientes de varias introducciones de *C. canephora*, todavía hay algunas de baja fertilidad que se reflejan en la mayor proporción de granos caracol.

Tamaño de grano. El porcentaje de café supremo del experimento fue de 60,0%, similar al de los progenitores (66,0%), inferior al de

la variedad Castillo® (78,0%) y superior al de la variedad Caturra (45,0%). El tamaño de grano de estas progenies está más cerca de las variedades de *C. arabica*, que el de *C. canephora* (Tabla 5). El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre progenies ($p < 0,0001$), y con la prueba de Dunnett_{0,05}, se encontró que 25 progenies eran estadísticamente iguales al testigo.

En las F3RC1 estudiadas por Cortina y Castro (2015), el tamaño de grano fue menor al 50,0% de supremo, y pese a que eventualmente las condiciones ambientales pudieran explicar en parte esas diferencias, se observa un progreso notable en este carácter.

Las progenies F4RC1, provenientes del *C. canephora* centro CV1, tuvieron gran variación en el tamaño de grano, que fluctuó entre 31,3% que es un grano muy pequeño, y 87,0% similar a las variedades de grano grande, pero el promedio de los diferentes experimentos fluctuó alrededor del 60,0% (Alvarado y Cortina, 1997).

Las 25 progenies con tamaño de grano igual al testigo encontradas en este experimento, indica que este carácter, que para Owuor y Van der Vossen (1981) es una de las principales limitaciones en híbridos interespecíficos, ha sido recuperado.

Producción

En la Tabla 6 se registran las producciones por progenies, en cada una de los cuatro años de cosecha, así como el promedio. La mayor producción se obtuvo el primer año de cosecha, 3,0 kg de cereza/planta (343 @ ha⁻¹ de c.p.s.), y luego declinó ligeramente los siguientes dos años, 2,4 y 2,3 kg/planta de café cereza, respectivamente (276 y 263 @ ha⁻¹ de c.p.s.) y más acentuado el cuarto año, 1,9 kg/planta de café cereza (211 @

ha⁻¹ de c.p.s.). La producción de la variedad Castillo® estuvo en el promedio 2,3 kg/planta de café cereza (263 @ ha⁻¹ de c.p.s.), mientras que la variedad Caturra, afectada por la roya, tuvo una producción de 1,9 kg/planta de café cereza (217 @ ha⁻¹ de c.p.s.).

Los análisis de varianza para cada uno de los años y para el promedio de los cuatro, fueron altamente significativos ($p=0,0027$). No obstante, la prueba de Dunnett_{0,05}, no mostró diferencia de alguna de las progenies con la variedad Castillo®, en alguno de los años ni en el promedio. Esto muestra que estas progenies de origen interespecífico, han recuperado la producción del progenitor recurrente. En consecuencia, las progenies de las plantas seleccionadas serán evaluadas regionalmente.

La mayoría de las progenies F4RC1 evaluadas por Alvarado y Cortina (1997) también tuvieron producciones por planta y estimadas por hectárea, estadísticamente iguales al testigo, variedad Colombia, y afirman que no es frecuente obtener progenies de híbridos interespecíficos de alto rendimiento en altas proporciones. No obstante, la mayoría de las progenies F3RC1 evaluadas por Castro y Cortina (2015) tuvieron producciones similares a los testigos.

En contraste, Owuor y Van der Vossen (1981) reportaron bajos rendimientos en progenies de primero y segundo retrocruzamiento de híbridos interespecíficos; mientras que en Brasil, Matiello *et al.* (2005), señalan que la mayoría de las selecciones de Icatú son menos productivas que las variedades comerciales, pero que la variedad Catucaí, tiene líneas de alto potencial de rendimiento.

Selección

La gran mayoría de las progenies son resistentes a la roya, todas tienen el gen Caturra, aunque

algunas, son significativamente más altas que las variedades comerciales, lo que limita su utilización como variedades. La gran mayoría tiene baja frecuencia de frutos vanos, pero no ocurre lo mismo con los granos caracol, cuya frecuencia está por encima de los aceptados comercialmente en algunas progenies. Unas pocas tuvieron producciones menores que las variedades comerciales.

Estas progenies introgresadas pertenecen ya a la diversidad del germoplasma de *C. arabica*. Deben evaluarse para otras características de interés y usarse como progenitores en mejoramiento por hibridación intraespecífica, para mejorar los caracteres en que son deficientes o como fuentes de otros caracteres, como la resistencia a la llaga macana (Cortina y Castro, 2015). Esto se ha venido haciendo con algunas de las selecciones F3RC1 y F4RC1, derivadas del *C. canephora* Centro CV1 que fueron cruzadas con introducciones etíopes o con líneas avanzadas de Caturra x Híbrido de Timor (Cenicafé, 2016), y de las que 11 progenies han sobresalido por sus características agronómicas y por su resistencia a la roya del café (Cenicafé, 2017).

Pero lo más importante es la selección de siete progenies (Tabla 7) de excelentes características: resistentes a la roya, promedio de altura de planta a los 25 meses de 153 cm, frecuencia de frutos vanos de 5,1% y de granos caracol de 11,2%, tamaño de grano de 72% de café supremo y producción anual de 2,5 kg/planta de c.p.s. Estas progenies serán sembradas en evaluaciones regionales antes de su liberación como variedades o componentes de variedades para el país.

En este estudio se concluye que partiendo de cruzamientos y retrocruzamientos, sin duplicación, entre variedades de la especie *C. arabica* y accesiones seleccionadas de

la especie diploide *C. canephora* se ha ampliado la base genética de *C. arabica*, y probablemente se han transferido nuevos genes o combinaciones de genes de resistencia a la roya.

Las progenies de híbridos interespecíficos, evaluadas en este experimento, pueden usarse como progenitores donantes de resistencia y

otros caracteres en cruzamientos con variedades o líneas destacadas.

Dentro de estas progenies F4RC1, se han seleccionado siete muy resistentes y con características agronómicas comparables a las de las variedades comerciales, para evaluar su descendencia en pruebas regionales y decidir su liberación como variedades (Tabla 7).

Tabla 6. Producción anual de las progenies F4RC1 de (Caturra x *C. canephora*) x Caturra.

Progenies	Kilogramos de café pergamino seco por planta al año (2011 a 2014)				Promedio 2011-2015
	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	
MEG0652.325	4,68	3,47	2,60	3,04	3,45
MEG0652.320	3,67	2,86	3,07	3,11	3,17
MEG0652.152	3,48	3,74	2,99	1,96	3,04
MEG0652.119	2,85	4,12	2,52	2,41	2,97
MEG0652.49	3,59	3,62	2,37	2,11	2,92
MEG0652.176	2,44	3,36	2,62	2,95	2,84
MEG0652.495	3,82	3,27	2,34	1,93	2,84
MEG0652.28	3,22	3,52	3,06	1,44	2,81
MEG0652.488	4,64	1,90	2,46	2,21	2,80
MEG0652.171	2,86	3,02	2,59	2,42	2,72
MEG0652.441	3,27	2,24	3,57	1,80	2,72
MEG0652.178	2,51	3,36	2,54	2,39	2,70
MEG0652.140	3,68	3,02	2,31	1,79	2,70
MEG0652.340	2,96	3,29	2,24	2,16	2,66
MEG0652.114	3,79	2,29	3,05	1,53	2,66
MEG0652.444	2,50	2,56	3,78	1,81	2,66
MEG0652.328	3,02	2,45	2,25	2,75	2,62
MEG0652.499	3,36	2,66	2,58	1,76	2,59
MEG0652.223	3,32	2,32	2,84	1,88	2,59
MEG0652.160	2,94	3,05	2,19	2,10	2,57
MEG0652.93	3,61	1,96	2,54	2,12	2,56

Continúa...

...continuación.

Kilogramos de café pergamino seco por planta al año (2011 a 2014)					
Progenies	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	Promedio 2011-2015
MEG0652.317	2,56	2,75	2,50	2,34	2,54
MEG0652.92	2,69	2,27	2,16	2,97	2,52
MEG0652.135	4,00	1,91	2,61	1,43	2,48
MEG0652.423	2,65	2,33	2,22	2,29	2,37
MEG0652.483	3,48	1,67	2,11	2,15	2,35
MEG0652.414	2,78	2,55	2,43	1,58	2,33
V. Castillo®	3,40	2,10	2,14	1,46	2,28
MEG0652.442	2,70	2,50	2,43	1,43	2,27
MEG0652.101	2,25	2,37	2,48	1,86	2,24
MEG0652.496	2,24	2,94	1,93	1,82	2,23
MEG0652.230	2,52	1,72	2,38	2,07	2,17
MEG0652.224	2,42	2,48	1,87	1,84	2,15
MEG0652.492	3,01	2,55	1,48	1,47	2,13
MEG0652.99	2,74	1,58	2,93	1,24	2,12
MEG0652.222	3,00	1,85	1,68	1,65	2,04
MEG0652.133	3,22	1,59	1,79	1,57	2,04
MEG0652.418	2,38	2,61	2,01	1,09	2,02
MEG0652.116	2,37	2,57	1,76	1,14	1,96
MEG0652.97	2,32	1,84	2,07	1,54	1,94
MEG0652.94	2,84	1,29	2,22	1,40	1,94
V. Caturra	2,67	1,00	2,43	1,49	1,90
MEG0652.336	2,78	1,44	1,69	1,21	1,78
MEG0652.337	3,15	1,38	1,01	1,43	1,74
MEG0652.110	2,68	1,90	1,39	0,80	1,69
MEG0652.136	2,08	1,39	1,41	1,32	1,55
MEG0652.46	1,87	1,48	1,44	1,20	1,50
San Bernardo	2,71	0,61	1,51	0,96	1,45
Promedio	3,00	2,41	2,30	1,85	2,39

Tabla 7. Características de las progenies F4RC1 seleccionadas.

Progenie	Altura 25 meses (cms)	Frutos vanos (%)	Granos caracol (%)	Café supremo (%)	Producción (kg/planta al año de c.p.s.)	Roya mediana
MEG0652.488	150	5,0	11,5	70,5	2,8	0
MEG0652.140	145	5,1	12,5	70,4	2,7	0
MEG0652.114	162	6,9	12,1	74,3	2,7	0
MEG0652.93	156	4,7	10,0	63,0	2,6	0
MEG0652.135	151	4,6	10,7	77,0	2,5	0
MEG0652.483	154	5,3	11,6	71,6	2,4	0
MEG0652.133	156	4,2	9,8	75,6	2,0	0
Promedio	153	5,1	11,2	71,8	2,5	

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero agrónomo Jhon Félix Trejos y demás colaboradores de la Estación Experimental Naranjal. A los colaboradores de la disciplina de Mejoramiento Genético, especialmente a la doctora María del Pilar Moncada y a los señores Luis Enrique Chanchí, Jhon Esteban Quintero y Jairo Jaramillo. Al doctor Ricardo Acuña y a la estadística Lina Díaz.

LITERATURA CITADA

- Aguilar, V.G.J. (1995). *Varietad Costa Rica 95*. San José: ICAFE.
- Alvarado A., G. y Cortina G., H.A. (1997). Comportamiento agronómico de progenies de híbridos triploides de *Coffea arabica* var. Caturra X (Caturra X *Coffea canephora*). *Cenicafé*, 48(2), 73-91.
- Alvarado A., G., Posada S., H.E. y Cortina G., H.A. (2005). *Castillo: Nueva variedad de café con resistencia a la roya*. (Avance Técnico No. 337). Manizales: Cenicafé.
- Alvarenga A., de P., Begazo J.C.E.O., Cardoso, A.A. y Paula, J.F. de (1995). Avaliação de progenies de café Icatú, em Vicosa, Minas Gerais. *Revista Ceres*, 42(243), 516-527.
- Carvalho, A., Costa, W.M. da y Fazuoli, L.C. (1983). Auto-incompatibilidade, produtividade, ocorrência

de sementes do tipo Moca e Muda Anormais no café Icatú. *Bragantia*, 42, 157-169.

- Castillo Z., J. y Moreno R., L.G. (1988). *La Variedad Colombia: Selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del café*. Chinchiná: Cenicafé.
- Castro C., B.L. y Cortina G., H.A. (2012). Evaluación de resistencia a *Ceratocystis colombiana* y *Ceratocystis papillata* en genotipos de café. *Cenicafé*, 63(2), 36-43.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café (2016). *Informe Anual. Mejoramiento Genético*. Manizales: Cenicafé.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café (2017). *Informe Anual. Mejoramiento Genético*. Manizales: Cenicafé.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café (2018). *Informe Anual. Mejoramiento Genético*. Manizales: Cenicafé.
- Cortina G., H.A.; Moncada B., M. del P. y Herrera P., J.C. (2012). *Varietad Castillo®: Preguntas frecuentes*. (Avance Técnico No. 426). Manizales: Cenicafé.
- Cortina G., H.A. y Castro C., B.L. (2015). Evaluación de híbridos interespecíficos de *Coffea arabica* x *Coffea canephora* con resistencia a *Hemileia vastatrix* y *Ceratocystis colombiana*. *Cenicafé*, 66(2), 17-29.
- Cristancho A., M.A.; Roza P., Y.I., Escobar O., C., Rivillas O., C.A. y Gaitán B., A.L. (2012). Outbreak of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) in Colombia. *New Disease Reports*, 25(19), 204.
- Davis, A.P., Govaerts, R., Bridson, D.M. y Stoffelen, P. (2006). An Annotated Taxonomic Conspectus of the Genus *Coffea* (Rubiaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 152, 465-512.

- Eskes, A.B. y Toma-Braghini, M. (1981). Assesment methods for resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk y Br). *Plant Protection Bulletin*, 29, 56-66.
- Eskes, A.B., Toma-Braghini, M. y Levy, F.A. (1987). Utilizacao de triploides para transferir resistencia a *Coffea canephora* cv Kouillou para o cultivar Catuaí de *C. arabica*. Comportamento das geracoes F1 e BC1. En *Congreso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras: 1-4 de diciembre de 1987*. (p. 80-82). Campinas : Ministério da Indústria e do Comércio-Instituto Brasileiro do Café.
- Eskes, A.B. (1989). Resistance. En A.C. Kushalappa y A.B. Eskes (Eds.), *Coffee Rust: Epidemiology, Resistance and Management* (p. 171-291). Boca Ratón: CRC Press.
- Fazuoli, L.C., Carvalho, A., Costa, W.M. Da; Nery, C., Pereira L., C.R. y Santiago, M. (1983). Avaliação de progênies e seleção no cafeeiro Icatu. *Bragantia*, 42, 179-189.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2019). *Producción de café de Colombia cerró en 13,6 millones de sacos*. Recuperado de https://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/sala_de_prensa/detalle/produccion_de_cafe_de_colombia_cerro_en_136_millones_de_sacos/
- Flórez R., C.P., Maldonado L., C.E., Cortina G., H.A., Moncada B., M. Del P., Montoya R., E.C., Ibarra R., L.N., Unigarro M., C.A., Rendón S., J.R. y Duque O., H. (2016) *Cenicafé 1: Nueva variedad de porte bajo, altamente productiva, resistente a la roya y al CBD, con mayor calidad física del grano*. (Avance Técnico No. 469). Manizales: Cenicafé.
- Gaitán B., A.L., Rivillas O., C.A., Castro C., B.L., Cristancho A., M.A. (2013). Manejo integrado de enfermedades. En: *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura*. Vol. 2. (p 143-178). Chinchiná: Cenicafé.
- Gómez G., L. (1984). Película de agua sobre las hojas de los cafetos. *Cenicafé*, 35(4), 94-101.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Federación de Cafeteros de Colombia (2017). Atlas Cafetero de Colombia. (p. 29). Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Herrera P., J.C., Combes, M.C., Cortina G., H.A., Alvarado A., G. y Lashermes, P. (2002). Gene introgression into *Coffea arabica* by way of triploid hybrids (*C. arabica* x *C. canephora*). *Heredity*, 89(6), 488-494.
- Krug, C.A. y Carvalho, A. (1951). The genetics of *Coffea*. *Advances in Genetics*, 4, 127-158.
- Mahe, L., Varzea, V.M.P., Le Pierres, D., Combes, M.C. y Lashermes, P. (2007). A new source of resistance against coffee leaf rust from new-Caledonian natural interspecific hybrids between *Coffea arabica* and *Coffea canephora*. *Plant Breeding*, 126(6), 638-641.
- Matiello, J.B., Almeida S.R. y Carvalho C.H. (2005). Resistant Cultivars to coffee leaf rust. En Zambolim, E.M. y Varzea, V.M.P. *Durable resistance to coffee leaf rust*. (p. 443-450). Viçosa: Universidad Federal de Viçosa.
- Moreno R., L.G. (2002). Nueva variedad de café de porte alto resistente a la roya del cafeto. *Cenicafé*, 53(2), 132-143.
- Moreno R., L.G. y Alvarado A., G. (2000). *La variedad Colombia: Veinte años de adopción y comportamiento frente a nuevas razas de la roya del cafeto*. (Boletín Técnico No. 22). Manizales: Cenicafé.
- Orozco C., F.J. (1989, agosto). *Utilización de los híbridos triploides en el mejoramiento genético del café*. Ponencia presentada en XIII Colloque Scientifique International sur le Café, Paipa, Colombia (p- 485-495). Paris: ASIC.
- Owuor, J.B.O. y Van Der Vossen, H.A.M. (1981). Interspecific hybridization between *Coffea arabica* L. and tetraploid *C. canephora* P. ex Fr. I. Fertility in hybrids and back crosses to *C. arabica*. *Euphytica*, 30, 861-866.
- Prakash N. S., Ganesh D. y Bhat S. S. (2005). Population dynamics of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk. Et Br.) and recent advances in rust research in India. En E.M. Zambolim, V.M.P. Varzea. *Durable resistance to coffee leaf rust*. (p. 411-442). Viçosa: Universidad Federal de Viçosa.
- Rivillas O., C.A., Serna G., C.A., Cristancho A., M.A. y Gaitán B., A.L. (2011). *La roya del cafeto en Colombia: Impacto, manejo y costos del control*. (Boletín Técnico No. 36). Manizales: Cenicafé.
- Rodrigues Jr., C.J., Bettencourt, A.J. y Rijo, L. (1975). Races of the pathogen and resistance to coffee rust. *Annual Review of Phytopathology*, 13, 49-70.
- Sreenivasan M.S., Santa Ram A. y Prakash N.S. (1993, junio). *Tetraploid inter-specific hybrids in Coffee breeding in India*. Ponencia presentada en XV Colloque Scientifique International sur le Café, Montpellier, Francia (p 226-233). Paris: ASIC.
- Srinivasan C.S., Prakash N.S., Padma J., Sureshkumar V.B. Y Subbalakshmi. (2000). Coffee cultivation in India. En T. Sera, C.R. Soccol, A. Pandey y S. Roussos (Eds.) *Coffee Biotechnology and Quality*. Trabajo presentado en Proceedings of the 3rd International Seminar on Biotechnology in the Coffee Agro-Industry, Londrina, Brasil (p. 17-26). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ANDISOLES EN LA REGIÓN CAFETERA COLOMBIANA

Luz Adriana Lince Salazar*, Siavosh Sadeghian Khalajabadi*

LINCE S., L.A.; SADEGHIAN K., S. Variabilidad espacial de las propiedades físicas de Andisoles en la región cafetera de Colombia. *Revista Cenicafé* 70(1):65-80. 2019

Las propiedades físicas del suelo presentan variabilidad espacial, formada tanto por las características intrínsecas como por los cambios generados por el manejo. Dado que el tema es de importancia para la agricultura, se llevó a cabo una investigación tendiente a evaluar dicha variabilidad por el método determinístico y geoestadístico, en dos lotes de suelos provenientes de cenizas volcánicas, ubicados en el departamento de Quindío (Colombia). En cada lote se demarcó 1,0 ha y se tomaron muestras de suelo en forma de red, cada 10 m, y se evaluaron las siguientes propiedades: arenas, limos y arcillas, retención de humedad a capacidad de campo-CC y punto de marchitez permanente-PMP, densidad real-DR y aparente-DA, estabilidad de agregados al agua-EAA, conductividad hidráulica-CH y resistencia a la penetración-RP. La mayoría de las propiedades presentaron distribución normal y coeficientes de variación de bajo a medio. La variabilidad espacial de las propiedades fue diferente en ambos lotes, lo cual se atribuyó a la influencia de la geomorfología, pues en el lote con geomorfología heterogénea, cinco propiedades presentaron tendencia espacial, dos efecto Nugget, y en dos la predicción no fue confiable, mientras que en el lote más homogéneo tres propiedades presentaron tendencia y las siete restantes se ajustaron a modelos teóricos con resultados confiables, por lo cual el sistema de muestreo en retícula en lotes de topografía heterogénea no fue el más adecuado para estudios con fines geoestadísticos, además, el método determinístico resultó útil para exponer la variabilidad espacial de las propiedades que no cumplieron los supuestos geoestadísticos.

Palabras clave: Geoestadística, geomorfología, Kriging, método determinístico, rango, tendencia espacial.

SPATIAL VARIABILITY OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF ANDISOLS IN THE COLOMBIAN COFFEE ZONE

The soil physical properties show spatial variability due to the intrinsic characteristics and the changes generated by soil management. Since this is important for agriculture, a research was carried out in order to evaluate that variability by the deterministic and geostatistical method in two plots of soils coming from volcanic ash and located in the Department of Quindío-Colombia. In each farm, 1.0 ha was delimited and soil samples were taken in a grid pattern every 10 m. Sand, silt and clay, humidity retention to field capacity (FC) and wilting point (WP), particle density (DP) and bulk density (DB), aggregates stability (AS), hydraulic conductivity (HC) and penetration resistance (PR) were evaluated. Most of the properties showed normal distribution and coefficients of variation from low to intermediate. The spatial variability of the properties was different in both plots, which was attributed to the influence of the geomorphology because in the plot with heterogeneous geomorphology, 5 properties showed spatial tendency, 2 showed Nugget effect, and in 2 the prediction was not reliable. In the most homogeneous plot, 3 properties showed spatial tendency and the remaining 7 were adjusted to theoretical models with reliable results. Therefore, the sampling grid system in plots with heterogeneous topography was not the most appropriate for studies with geostatistical purposes. Besides, the IDW method was useful to expose the spatial variability of the properties that did not meet the geostatistical assumptions.

Keywords: Geostatistics, geomorphology, Kriging, deterministic method, range, spatial tendency

*Investigador Científico I e Investigador Científico III, respectivamente. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

Las propiedades físicas del suelo desempeñan un papel fundamental en la producción de los cultivos, especialmente la textura-T y la densidad aparente-DA (Do Nascimento *et al.*, 2019), las cuales en conjunto con la materia orgánica-MO son indicadores frecuentes de aireación, compactación, capacidad de almacenamiento de agua-CAA (Pachepsky y Park, 2015), y hacen parte de los controladores de nitrificación y mineralización (Schjonning *et al.*, 2003); además, la resistencia a la penetración-RP, la conductividad hidráulica-CH, la distribución de agregados, la infiltración y la estabilidad de agregados al agua-EAA, sirven para identificar las condiciones del suelo para el desarrollo de raíces, percolación y susceptibilidad a la erosión (Haruna *et al.*, 2018).

Algunas propiedades físicas, tales como DA, RP, CH y EAA son el resultado de la interacción de propiedades primarias como la T y profundidad del horizonte A, que dependen en su mayoría del material parental y el clima, con características químicas como MO, bases intercambiables (Bronick y Lal, 2005) y la acción antrópica (Kinoshita *et al.*, 2017); por tal razón, cambios en manejo (Jacobs *et al.*, 2004), material parental, topografía, clima o sus interacciones, generan variabilidad espacial del suelo (de Moraes *et al.* 2016; Silva *et al.*, 2015).

Una forma de evaluar la variabilidad espacial es a través de la geoestadística, técnica que utiliza algo semejante a la interpolación por media móvil ponderada (Bohling, 2007) y se basa en la teoría de regionalización de variables, con un nivel de confianza determinado (Wilding y Drees, 1983), a diferencia de los métodos determinísticos, como el inverso del peso de la distancia-IDW, que predicen partiendo del supuesto de que el valor en un punto no muestreado puede ser aproximado como un promedio ponderado de los valores en puntos situados a una cierta distancia de referencia

(Mitasova, 2008); sin embargo, ambos métodos permiten visualizar y cuantificar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo a nivel de lote y cuenca (Glendell *et al.*, 2014).

Con geoestadística se pueden analizar y predecir valores de una variable que está distribuida en el espacio de una forma continua, mediante las herramientas de análisis exploratorio de datos, análisis estructural, semivariograma y predicción o Kriging (Bohling, 2007). De estas herramientas, las dos primeras se utilizan para verificar los supuestos geoestadísticos, la distribución normal de los datos, la no tendencia y la estacionariedad, es decir, cuando el análisis estructural indica que los valores aumentan o disminuyen progresivamente en cierta dirección, es indicio de una tendencia, lo que rompe el supuesto de estacionariedad, el cual implica que el nivel promedio de la variable debe ser constante en todos los puntos del área de interés (Giraldo, 2002). Una tercer herramienta es el semivariograma, que permite determinar parámetros importantes de la distribución espacial de la variable, tales como: i) efecto Nugget, el cual indica que la variabilidad se presenta a una distancia inferior a la de muestreo o que hay errores de medición o pobre precisión analítica, ii) Sill que representa el máximo valor que alcanza el semivariograma cuando la variable es estacionaria, y iii) rango de variabilidad que define la distancia a la cual el semivariograma se estabiliza y representa la distancia a la cual la propiedad de interés se relaciona espacialmente, para ello se emplea el modelo teórico (pepita puro, gaussiano, potencia, esférico, lineal y exponencial) que más se ajuste al variograma experimental (Goovaerts, 1999).

Los rangos de variabilidad reportados para las propiedades físicas del suelo, utilizados en la agricultura para definir planes de muestreo de suelos o para evaluar el impacto de una

actividad (Goovaerts, 1999), en su mayoría son altamente contrastantes, tanto a nivel regional como a nivel de lote. Algunos rangos reportados en diferentes países son: para DA, 8 m en Sri Lanka (Rosemary *et al.*, 2017), y en Colombia 105 m (Vargas *et al.*, 2015), 349 m (Ramírez-López *et al.*, 2008) y 95 m (Jaramillo *et al.*, 2008); para DR, 10.000 m en Cuba (Medina *et al.*, 2017), y en Colombia 11 m (Ramírez-López *et al.*, 2008) y 185 m (Vargas *et al.*, 2015); para arena-A, 9.000 m en Cuba (Medina *et al.*, 2017), 24 m en Brasil (Santos *et al.*, 2017) y 155 m en Colombia (Vásquez *et al.*, 2010); para limo-L, 7.000 m en Cuba (Medina *et al.*, 2017) y 258 m en Colombia (Vargas *et al.*, 2015); para arcilla-Ar, 21 m en Brasil (Santos *et al.*, 2017) y 109 m en Colombia (Vásquez-Polo *et al.*, 2010); para CH, 5.700 m en Turquía (Erşahin *et al.*, 2017) y 93 m en Colombia (Vargas *et al.*, 2015); para RP, 86 m en Brasil (Andrade *et al.*, 2018), y en Colombia 594 m (Vásquez *et al.*, 2010), 375 m (Ramírez-López *et al.*, 2008) y 14 m (Jaramillo *et al.*, 2008).

Los rangos de variabilidad de las propiedades físicas asociados a investigaciones a nivel de lote en el cultivo de café, indican que hay dependencia espacial y que conocer dicho parámetro resulta útil al generar recomendaciones de manejo (Andrade *et al.*, 2018; Salamanca *et al.*, 2018). En el caso de Andrade *et al.* (2018), en Brasil, para RP evaluada en diferentes sitios del sistema productivo como en profundidades, reportaron rangos mayores para los sitios por donde transita el tractor y en las calles del cultivo (181 y 155 m, respectivamente), en comparación con lo reportado bajo el dosel del árbol (86 m), esto para una profundidad del perfil entre 0,1 y 0,2 m, y atribuyen los resultados al manejo del cultivo. En el caso de Salamanca *et al.* (2018), en Colombia, se centraron en DA, en suelos de tipo andisol e

inceptisol, y sus resultados mostraron rangos que difieren hasta en 195 m, en evaluaciones a 5 cm de profundidad del perfil, y en 10 m, en evaluaciones a 0,1 y 0,2 m, y atribuyen las variaciones a la geomorfología y al manejo del cultivo.

Dado que el conocer la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo permite mejorar el manejo del sistema productivo, ya que con esta información pueden elaborarse diseños de muestreos sensibles y aceptables, definir zonas homogéneas para manejo y que los antecedentes en cultivo de café en Colombia son pocos, se realizó una investigación tendiente a evaluar dicha variabilidad en suelos de origen volcánico donde se cultiva café en Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el año 2011 en dos fincas cafeteras (Tabla 1), ubicadas en el departamento de Quindío, región central de Colombia. En cada finca se seleccionó un lote con café Variedad Castillo[®], con edades entre 26 y 36 meses, a plena exposición solar, con densidades de siembra de 7.000 plantas/ha y manejo recomendado por Cenicafé.

En cada lote, con la ayuda de un GPS de precisión, se demarcó aproximadamente 1,0 ha y se tomaron tres tipos de muestras de suelo en forma de red, cada 10 m (Figura 1), estas fueron: i) muestras disturbadas, tomadas con palín en cuatro puntos circundantes al sitio georreferenciado, a una profundidad de 20 cm; ii) muestras disturbadas, en las mismas condiciones que el anterior tipo, pero a 5 cm de profundidad; iii) muestras sin disturbar, tomadas con un cilindro de acero de 25 cm³ en cuatro puntos circundantes al sitio georreferenciado, a 15 cm de profundidad. Al mismo tiempo, se realizó *in situ* la prueba de resistencia a la penetración, con un penetrómetro de impacto.

En las muestras tipo i se evaluaron: carbono orgánico-CO (Walkley-Black), textura en términos de porcentaje de A, L y Ar (bouyoucos), DR (picnómetro), retención de humedad a capacidad de campo-CC y punto de marchitez permanente-PMP (ollas de presión de Richards a 0,033 y 1,5 MPa, respectivamente). En las de tipo ii se evaluó la EAA (tamiz húmedo de Yoder) y en las de tipo iii se evaluó la DA (cilindro de Coile) y CH (permeámetro de cabeza constante).

Las muestras tipo i y iii se tomaron en la profundidad en que se encuentra la mayor concentración de raíces de la planta de café (20 cm), debido a que las propiedades evaluadas con dicha muestra están directamente relacionadas con el desarrollo de la planta de café, y la muestra tipo ii se tomó en la parte superficial, debido a que la EAA se relaciona con la erosión del suelo y por ello se evalúa en los primeros centímetros del perfil. Para las propiedades CO, T, CC, PMP y DR, se realizó una repetición por sitio, ya que la muestra analizada estuvo conformada por cuatro muestras tomadas en los puntos circundantes al sitio georreferenciado, cada 0,5 m en forma de cuadrado; para las propiedades DA y EAA se realizaron tres repeticiones, con muestras tomadas a una distancia de 0,5 m, en forma de triángulo; para la CH se tuvieron cuatro repeticiones con muestras tomadas a una distancia de 0,5 m en forma de cuadro, y para la RP tres repeticiones hasta una profundidad de 0,6 m, en forma de triángulo.

El análisis geoestadístico se realizó con las herramientas de exploración, análisis estructural, construcción del semivariograma y predicción. La etapa de exploración de los datos se realizó con el *software* Statgraphics y se tuvo en cuenta la normalidad, evaluada con curtosis y sesgo, la cual según George y Mallery (2010) debe presentar valores

entre 2 y -2 para ser normal; en los casos en los cuales no se cumplió el supuesto se extrajeron los datos extremos hasta lograr la normalidad. Una vez lograda la distribución normal, se realizó la estadística descriptiva que incluyó media, mínimo, máximo, coeficiente de variación (C.V.), asimetría y curtosis, para ello se empleó el *software* Statgraphics. El C.V. se interpretó según lo recomendado por Warrick y Nielsen (1980), así: C.V. $\leq 12\%$ se interpreta como variabilidad baja, de $12 < C.V. \leq 60\%$ como variabilidad media y C.V. $> 60\%$ como variabilidad alta.

El supuesto de estacionariedad espacial se comprobó con el *software* ArcGis10.3.1, mediante la herramienta de análisis geoestadístico y las funciones de análisis de datos para tendencias y diagramas de Voronoi, como lo sugieren Kamble y Aggrawal (2011), y se tomó como valor de cálculo la opción simple. Los semivariogramas también se realizaron con el Software ArcGIS 10.3.1, con la misma herramienta y la función geoestadistical wizard, en la que se seleccionó el método Kriging, del tipo ordinario de predicción y las variables no fueron sometidas ni a transformación ni a remoción de tendencia. Posterior a ello, se procedió con cálculo de Nugget real y Sill parcial real, con tamaño de lag de 10 m (distancia de muestreo), 12 lags, con un número máximo de vecinos cercanos de cinco (según el análisis de los diagramas de Voronoi), se aplicaron los cuatro modelos teóricos más comunes para las propiedades de interés, que según Goovaerts (1999) son gaussiano, esférico, circular y exponencial, y se seleccionó el de menor error cuadrático medio (RMS). Con la información anterior se generaron los mapas de variabilidad espacial y se clasificaron en cuatro clases mediante la opción de intervalo geométrico, con el *software* ArcGIS 10.3.1, herramienta análisis geoestadístico y clasificación.

Las herramientas de construcción del semivariograma se aplicaron a todas las variables, inclusive aquellas que no cumplieron con los supuestos de tendencia y estacionariedad; con aquellas que cumplieron los supuestos de normalidad y estacionariedad se prosiguió hasta generar el mapa de predicción por Kriging ordinario, mientras que para las variables que no cumplieron los supuestos geoestadísticos, la información resultante de los semivariogramas se empleó para generar los modelos de interpolación por el método determinístico – IDW, con el menor error, extrayendo de este el número máximo y mínimo de vecinos, tipo de sector, valor de semieje mayor y menor, los cuales según Glendell *et al.* (2014) son igualmente válidos que los geoestadísticos.

La dependencia espacial en términos de la relación porcentual Nugget/Sill (variabilidad

aleatoria/variabilidad total), evaluada para las propiedades que siguieron la ruta geoestadística, se interpretó según Cambardella (1994), quien considera que si es menor a 25% es fuerte, entre 25 y 75 % media y mayor a 75% débil.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades analizadas presentaron valores similares en los dos lotes (Tabla 1), a excepción de la CH que fue mayor en el lote de Buenos Aires, y la CC y PMP que fueron más altos en el Cortijo. Lo anterior se puede deber a que los contenidos de CO fueron mayores en El Cortijo (Tabla 2), lo que favorece la capacidad de almacenamiento de agua y, por ende, disminuye la CH (Stock y Downes, 2008). En cuanto al coeficiente de variabilidad, en los dos lotes las variables A, DA, DR y EAA presentaron valores bajos (< 12 %), y

Tabla 1. Características de los sitios seleccionados.

Característica	Fincas	
	Buenos Aires	El Cortijo
Ubicación del muestreo		
Municipio	Armenia	Armenia
Vereda	El Caimo	Mesopotamia
Coordenadas	4°29'01''N, 75°42'00'' W	4°34'50'' N, 75°38'43'' W
Características químicas del suelo*		
pH	5,23	5,07
CO (%)	6,41	12,03
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	2,35	1,32
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,74	0,41
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,26	0,42
Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,71	1,06
P (mg kg ⁻¹)	66,85	15,03
Unidad cartográfica FNC**	Chinchiná	Quindío
Material parental	Ceniza volcánica	Ceniza volcánica
Taxonomía	Typic melanudands	Typic hapludands

* Propiedades evaluadas siguiendo las recomendaciones de muestreo de suelos de Cenicafé y análisis descrito por Carrillo (1985); ** FNC (1986).

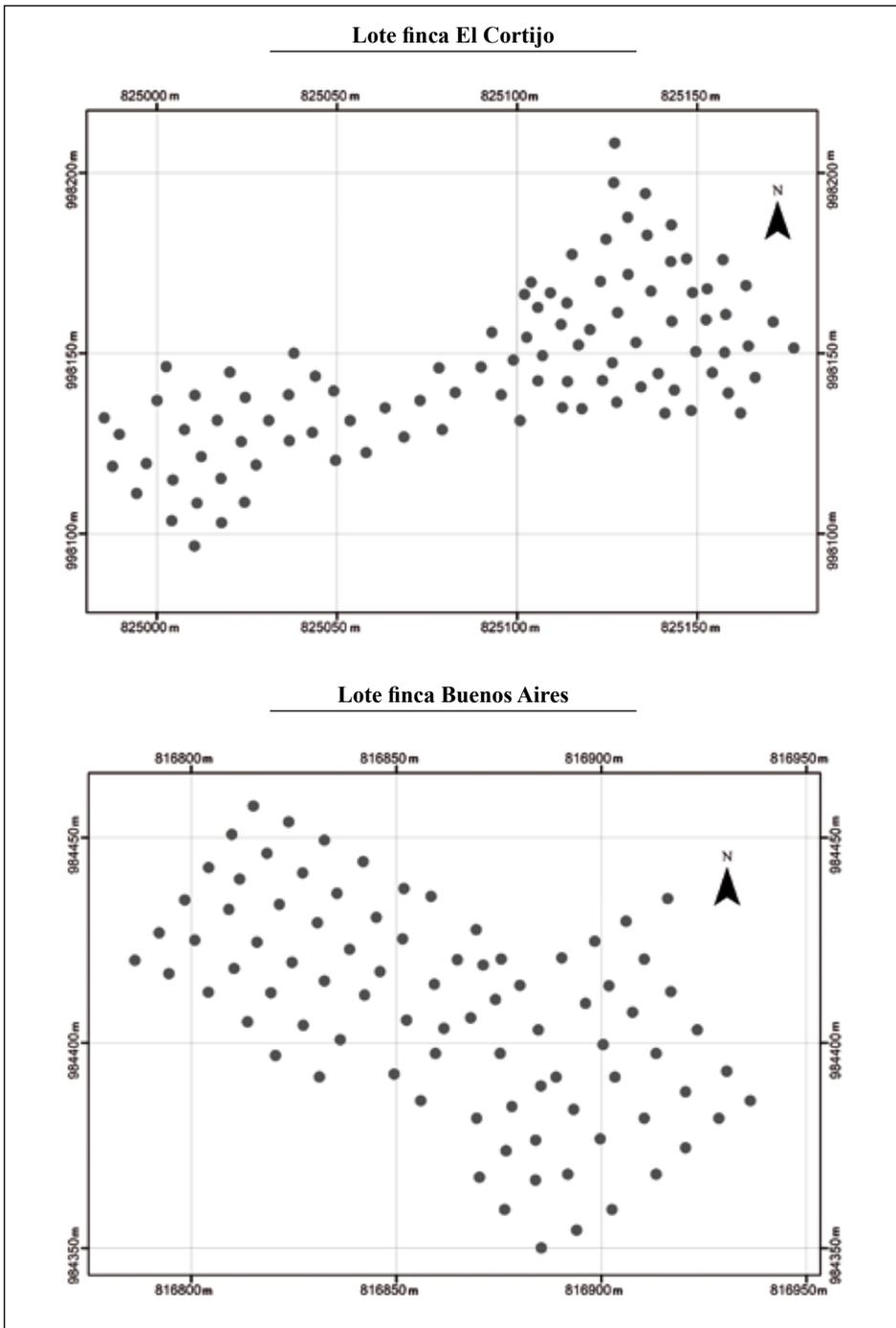


Figura 1. Puntos de muestreo en los lotes seleccionados.

RP, CC y PMP valores medios (12% – 60%). La única variable que presentó coeficiente de variación alto (> 60%) fue la CH, lo cual es común para esta propiedad (Bagarello *et al.*, 2019), ya que es extremadamente sensible a la forma de muestreo y análisis (Ilek *et al.*, 2019) y a las características hidrológicas del suelo (Reynolds *et al.*, 2000).

El análisis exploratorio de los datos indicó que las variables CH y EAA en ambos lotes, la CC en el lote de la finca El Cortijo y la DA en el lote de la finca Buenos Aires, no

presentaron distribución normal, y para alcanzarla se extrajeron seis datos extremos de CH, dos de EAA y uno de CC, para la finca El Cortijo, y dos datos extremos de DA, dos de CH y uno de EAA para la finca Buenos Aires. La presencia de valores extremos y alto coeficiente de variación para la CH se relacionan con las muestras utilizadas en el análisis, las cuales al presentar fragmentos de roca o de plantas, alteran la macroporosidad (Ilek *et al.*, 2019), además de ser afectada por las variaciones en la densidad aparente y la distribución del tamaño de las partículas (Guatibonza *et al.*, 2009).

Tabla 2. Estadística descriptiva de las propiedades físicas del suelo, para los dos lotes analizados.

Propiedad	n	Media	Mínimo	Máximo	C.V.(%)	Curtosis	Asimetría
Finca El Cortijo							
A (%)	97	57,19	50,00	65,00	6,96	-1,07	-0,20
L (%)	97	22,91	17,00	30,00	15,35	-1,02	0,43
Ar (%)	97	19,93	16,00	22,00	6,99	0,13	-0,89
DA (g cm ⁻³)	100	0,73	0,63	0,91	8,25	-0,15	0,67
DR (g cm ⁻³)	100	2,33	2,18	2,47	2,88	-0,79	0,01
CH (cm h ⁻¹)	94	0,11	0,01	0,42	86,81	1,60	1,43
EAA (DMP, mm)	98	3,06	2,75	3,21	3,17	0,86	-0,88
RP (MPa)	100	0,64	0,41	1,00	19,60	-0,06	0,43
CC (% gravimétrico)	99	48,45	31,75	68,44	14,29	0,31	0,50
PMP (% gravimétrico)	100	23,66	19,66	45,26	17,72	0,03	0,58
Finca Buenos Aires							
A (%)	92	66,12	58,00	75,00	5,09	0,92	0,20
L (%)	92	18,41	14,00	24,00	12,00	0,11	0,48
Ar (%)	92	15,54	7,00	21,00	16,20	1,77	-0,80
DA (g cm ⁻³)	90	0,96	0,81	1,20	7,37	1,11	0,82
DR (g cm ⁻³)	92	2,48	2,32	2,61	2,96	-0,73	-0,56
CH (cm h ⁻¹)	90	0,73	0,24	1,80	48,63	1,94	1,46
EAA (DMP, mm)	91	2,84	2,26	3,12	6,49	0,96	-1,13
RP (MPa)	92	0,46	0,27	0,69	16,36	0,14	0,04
CC (% gravimétrico)	92	29,04	18,37	39,60	17,26	-0,74	-0,08
PMP (% gravimétrico)	92	17,24	8,57	22,91	18,73	-0,01	-0,70

A: arenas; L: limos; Ar: arcillas; DA: densidad aparente; DR: densidad real; CH: conductividad hidráulica saturada; EAA: estabilidad de los agregados al agua; RP: resistencia a la penetración - impedancia; CC: retención de humedad a capacidad de campo 0,033 MPa; PMP: retención de humedad a punto de marchitez permanente 1,5 MPa.

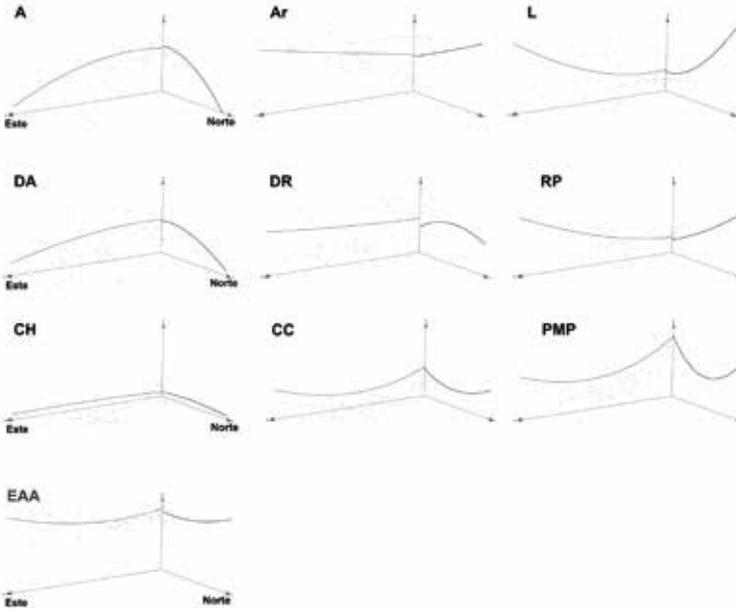
Con relación a la tendencia espacial, las variables que no presentaron tendencia y, por ende, cumplieron los supuestos geoestadísticos fueron Ar, CH, EAA y RP, en ambos lotes; la DR en el lote de El Cortijo, y en el lote de Buenos Aires, L y PMP. Las propiedades para el lote de El Cortijo que presentaron tendencia a aumentar fueron A, DA y CH en dirección Suroeste, L y RP al Noreste, Ar al Norte y DR al Centro, y las que presentaron tendencia a disminuir fueron EAA, CC y PMP al Centro del lote. De estas variables las que presentaron tendencia más pronunciada fueron A, L, DA, CC y PMP, en contraste con DR y Ar (Figura 2). Para el lote de la finca Buenos Aires, las propiedades que tendieron a incrementar su valor fueron A en dirección al centro del lote, RP al Sur Centro Oeste, L al Norte, DA AL Noroeste, DR y CH al Noreste y EAA y PMP al Sureste, y las que presentaron tendencia a disminuir fueron Ar y CC en dirección al centro del lote. Las variables con tendencia pronunciada fueron A, CC, DR y DA, en contraste con L y Ar (Figura 2). Estos resultados indican que la dependencia espacial para L y PMP, puede estar más afectada por la topografía que las demás propiedades, ya que esta solo se presentó en el lote de El Cortijo con topografía más heterogénea que Buenos Aires (Figura 3), lo cual se relaciona con lo mencionado por Kerry y Oliver (2011) al indicar la influencia de la geomorfología en la variabilidad de las propiedades del suelo. La tendencia presente en A, DA y CC, concuerdan con reportado por Jaramillo *et al.* (2008), que para estudios de variabilidad espacial a nivel de lote reportaron tendencias para estas y otras propiedades, sin embargo, Salamanca *et al.* (2018) no reportaron tendencia espacial para DA en lotes de café, por lo cual lograron aplicar herramientas geoestadísticas a esta variable y alcanzar rangos de variabilidad entre 93 y 288 m, e indicaron que esto se debe al manejo y la topografía.

De acuerdo con el análisis estructural de las propiedades mencionadas, la distribución de estas se ajusta a los modelos teóricos de semivariograma esférico y circular, a excepción de DR y CH en el lote de la finca El Cortijo, que ajustaron a Pepita puro.

Las propiedades exhibieron variabilidades diferentes en los lotes, para el lote de la finca El Cortijo, que presenta una topografía ondulada, las Ar, EAA y RP se ajustaron a semivariogramas con dependencia espacial débil y media, es decir, que las propiedades cambian de valor a distancias cortas y medias, y la DR y CH a pepita puro, lo que según Nielsen y Wendroth (2003) se da porque no se logró detectar la correlación entre las muestras; además, los resultados registrados para las propiedades A y EAA, pueden ser imprecisos, debido a que el valor del efecto pepita fue superior al 50% de la meseta (Figura 4), según lo sugerido por Giraldo (2002).

Para el lote de la finca Buenos Aires, con topografía plana a inclinada, las siete propiedades que cumplieron los supuestos geoestadísticos se ajustaron a semivariogramas teóricos esférico y circular, con dependencia especial fuerte y media (cambios de valor a distancias medias y grandes). La diferencia en la variabilidad en los dos lotes, en términos de modelos, dependencia espacial y confiabilidad de los resultados, posiblemente se debe a los contrastes geomorfológicos, donde en el lote de Buenos Aires por ser más plano y homogéneo en comparación con el lote de El Cortijo, las propiedades variaron a mayores distancias y todas se ajustaron a modelos teóricos con resultados confiables. En contraste, en el lote El Cortijo, más irregular y con mayor pendiente, las propiedades variaron a distancias cortas y medias, posiblemente debido a que estas geoformas facilitaron el arrastre y la acumulación de partículas por la acción del agua, y como lo proponen Kerry y

Lote finca El Cortijo



Lote finca Buenos Aires

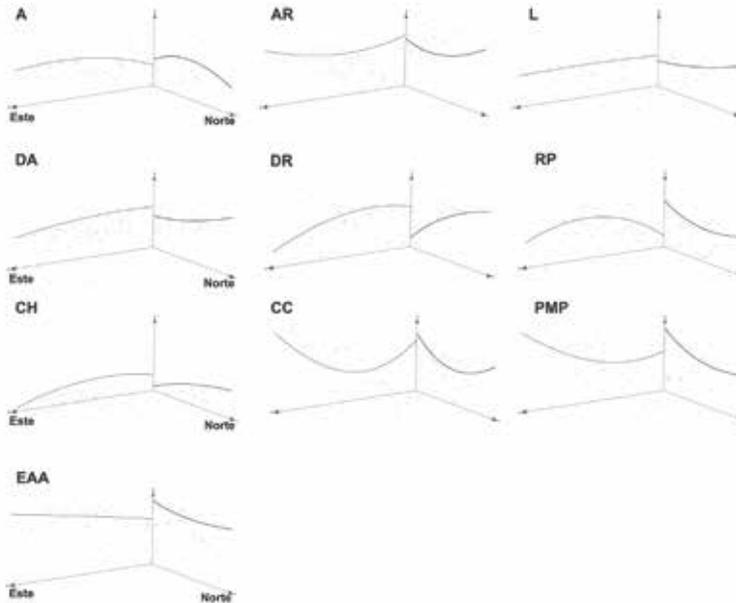


Figura 2. Tendencia espacial de las propiedades evaluadas. A: arenas; L: limos; Ar: arcillas; DA: densidad aparente; DR: densidad real; CH: conductividad hidráulica saturada; EAA: estabilidad de los agregados al agua; RP: resistencia a la penetración-impedancia; CC: retención de humedad a capacidad de campo 0,033 MPa; PMP: retención de humedad a punto de marchitez permanente 1,5 MPa.

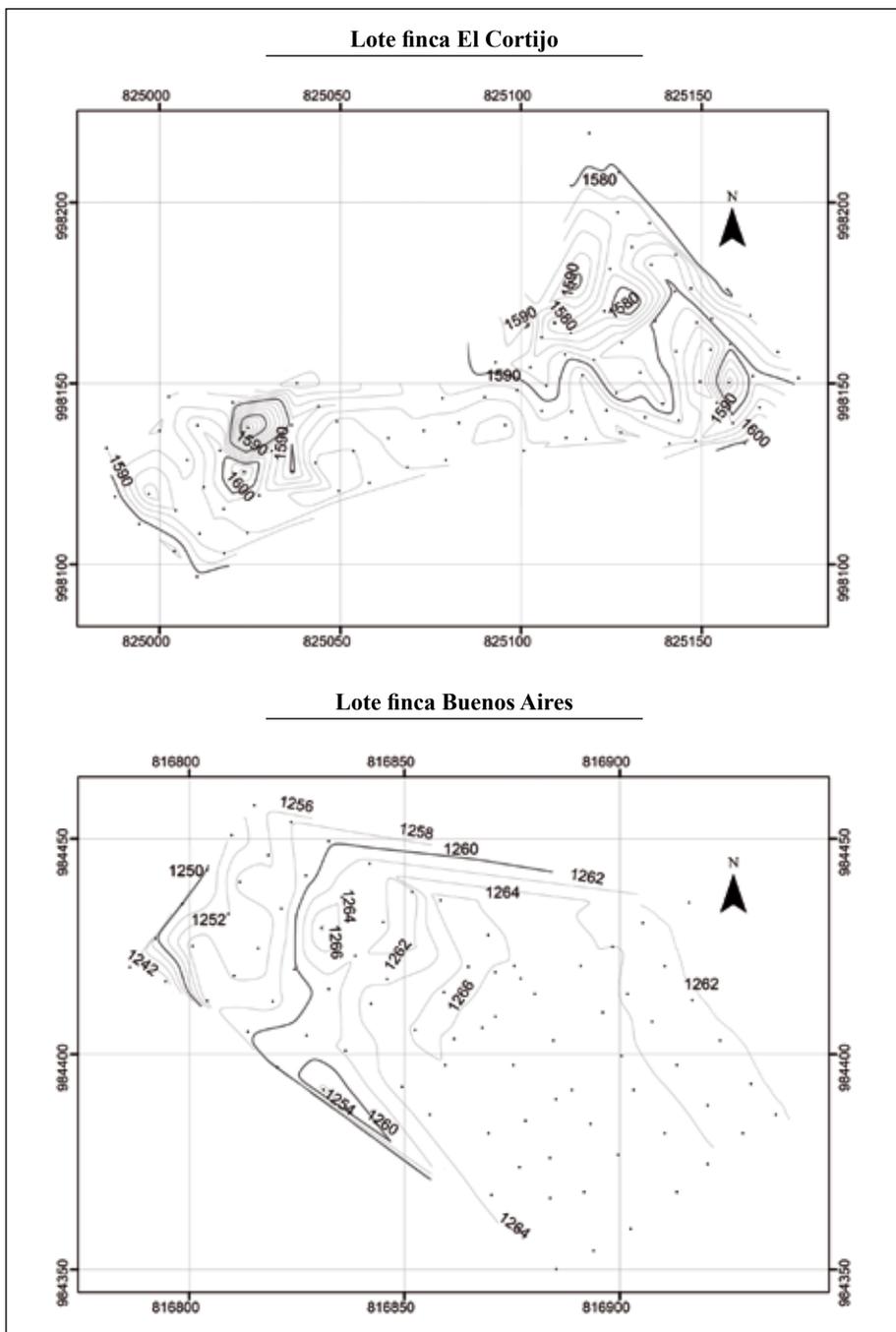


Figura 3. Representación topográfica* de los lotes analizados. a) Finca El Cortijo. b) Finca Buenos Aires.

*Mapas de curvas a nivel con cotas principales cada 10 m y secundarias cada 2 m, realizados con los datos de altitud tomados con GPS en cada punto de muestreo y el *software* ArcGIS 10.3.1, herramientas 3D Analyst y Cartography Tools.

Oliver (2011) la geomorfología se relaciona directamente con la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y debe tenerse en cuenta en el diseño de modelos de muestreo.

Los rangos óptimos de muestreo (Tabla 3, Figura 4) para el lote de El Cortijo variaron entre 16,28 y 103,10 m para EAA y RP, respectivamente, valores coherentes con las condiciones del lote. Para el caso de la EAA, el resultado obtenido se atribuye a la geomorfología que afecta la variabilidad de la materia orgánica (Salamanca *et al.*, 2018) y, por ende, la de EAA (Annabi *et al.*, 2017), con respecto a RP, se atribuye al manejo del lote, que al no ser mecanizado no genera compactaciones diferenciales entre calles y el dosel del árbol, como sucede en cultivos de café en Brasil (Andrade *et al.*, 2018). Para el lote de Buenos Aries, los rangos variaron entre 16,75 y 123,74 m para CH y RP, respectivamente; en cuanto

a la CH, las tendencias registradas pueden explicarse por la estrecha relación de este con Ar (Bagarello *et al.*, 2019), que presentó un rango muy similar (18,85 m); en cuanto a RP, coincide con el valor del lote de El Cortijo y se le atribuyen las mismas explicaciones. En general, los rangos encontrados en el estudio se asemejan en distancia, a los reportados por varios autores (Kılıç *et al.*, 2004; Jaramillo *et al.*, 2008; Kazemi *et al.*, 2008; Guatibonza *et al.*, 2009), pero se consideran bajos en comparación con resultados de estudios realizados en áreas y distancias de muestreo hasta diez veces superiores a las del presente estudio (Hengl *et al.*, 2004; Annabi *et al.*, 2017; Medina *et al.*, 2017; Erşahin *et al.*, 2017). Las diferencias en mención pueden deberse a que en estudios a nivel de lote se detecta una variabilidad causada por el manejo y unidades geomorfológicas detalladas, y no se alcanza a detectar la variabilidad regional.

Tabla 3. Modelos teóricos ajustados a los semivariogramas para las propiedades evaluadas.

Propiedad del suelo	Nugget	Range	Sill	Modelo	RMS	Dependencia espacial
Finca El Cortijo						
Ar (%)	1,668	29,964	0,046	Circular	1,360	Débil
DR (g cm ⁻³)	0,004	—	0,000	Nugget	0,068	—
CH (cm h ⁻¹)	0,008	—	0,000	Nugget	0,096	—
EAA (mm)	0,005	16,281	0,005	Esférico	0,098	Débil
RP (MPa)	0,007	103,10	0,010	Circular	0,094	Media
Finca Buenos Aires						
L (%)	1,835	34,734	3,685	Esférico	1,916	Media
Ar (%)	1,209	18,852	5,087	Circular	2,106	Fuerte
CH (cm h ⁻¹)	0,013	16,751	0,117	Circular	0,336	Fuerte
EAA (mm)	0,006	21,646	0,029	Esférico	0,166	Fuerte
RP (MPa)	0,003	123,743	0,004	Circular	0,064	Media
CC (% grav)	6,324	70,649	36,608	Circular	3,441	Fuerte
PMP (% grav)	2,432	69,415	16,132	Esférico	2,516	Fuerte

L: limos; Ar: arcillas; DR: densidad real; CH: conductividad hidráulica; EAA: estabilidad de los agregados al agua; RP: resistencia a la penetración; CC: retención de humedad a capacidad de campo 0,033 MPa; PMP: retención de humedad a punto de marchitez permanente 1,5 MPa; RMS: error cuadrático medio.

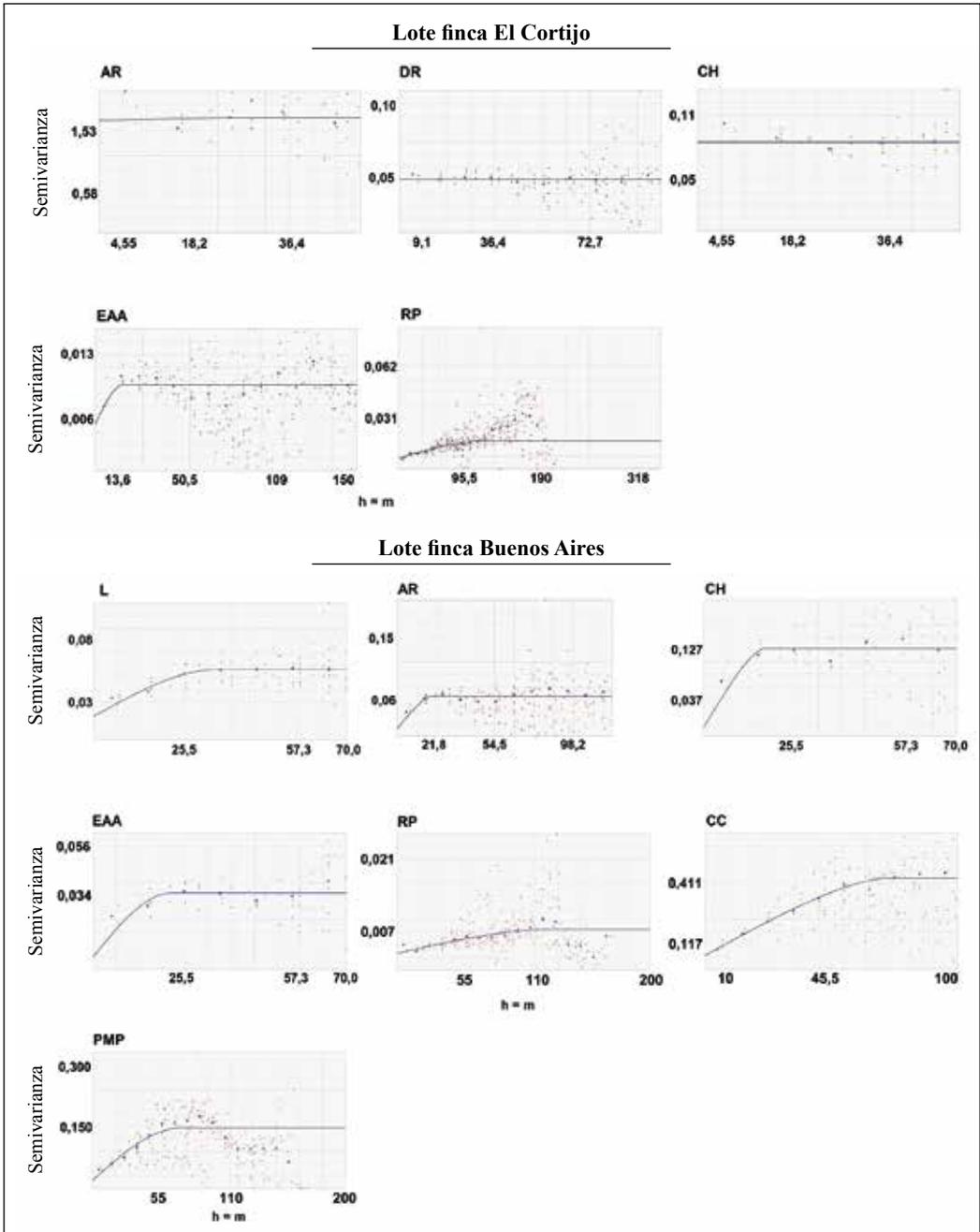


Figura 4. Semivariogramas para las propiedades físicas del suelo evaluadas. A: arenas; L: limos; AR: arcillas; DA: densidad aparente; DR: densidad real; CH: conductividad hidráulica saturada; EAA: estabilidad de los agregados al agua; RP: resistencia a la penetración-impedancia; CC: retención de humedad a capacidad de campo 0,033 MPa; PMP: retención de humedad a punto de marchitez permanente 1,5 MPa.

Una medida para solucionar la detección de la variabilidad a diferentes escalas es realizar estudios con muestreos a diferentes distancias (Rosemary *et al.*, 2017; Goovaerts, 1999), que según este estudio para lotes de geomorfología heterogénea debe ser inferior a los 10 m.

La representación gráfica de la variabilidad espacial en mapas se logró mediante Kriging ordinario para Ar, DR, CH, EAA, y RP, en el lote de El Cortijo; para L, Ar, CH, EAA, RP, CC y PMP en el lote de Buenos Aires; por método IDW para A, L, DA, CC y PMP en El Cortijo, y para A, DA y DR en Buenos Aires. Las distancias de semieje empleadas en el método IDW se presentan en la Tabla 4. Los resultados muestran que los dos métodos, Kriging e IDW, permiten visualizar y cuantificar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo a nivel de lote (Figura 5), tal como lo proponen Glendell *et al.* (2014). Sin embargo, al comparar los RMS de L en Buenos Aires por Kriging, con el de L en El Cortijo por

IDW, el de CC en Buenos Aires por Kriging con el de CC en El Cortijo por IDW, y el RMS de PMP en Buenos Aires por Kriging con el de PMP en El Cortijo por IDW, se encontró que en todos los casos los RMS del Kriging son menores y las espacializaciones son más definidas por este método que por el IDW (Figura 5), por lo cual se considera que siempre y cuando las variables cumplan los supuestos es mejor predecir la variabilidad por el método geoestadístico, de lo contrario, cualquier método determinístico puede funcionar, lo que debe evitarse es realizar transformaciones Log (Log, ResLog) o residual, para ajustar el comportamiento de las variables y cumplir los supuestos geoestadísticos, ya que según Wilding y Dress (1983) esto es riesgoso, porque la media tiende a cero, debido a que los datos toman valores positivos y negativos. La especialización de las variables por Kriging (Figura 5) muestra que la propiedad de mayor rango (RP) presentó menos áreas homogéneas que una de rango menor (Ar).

Tabla 4. Parámetros empleados en la especialización IDW.

Propiedad del suelo	Semieje	RMS
Finca El Cortijo		
A (%)	100,730	2,575
L (%)	90,037	2,361
DA (g cm ⁻³)	54,479	0,048
CC (% grav)	73,608	5,119
PMP (% grav)	18,466	3,857
Finca Buenos Aires		
A (%)	20,448	2,582
DA (g cm ⁻³)	42,399	0,054
DR (g cm ⁻³)	68,297	0,055

A: arenas; L: limos; Ar: arcillas; DA: densidad aparente; DR: densidad real; CC: retención de humedad a capacidad de campo 0,033 MPa; PMP: retención de humedad a punto de marchitez permanente 1,5 MPa. RMS: Error cuadrático medio.

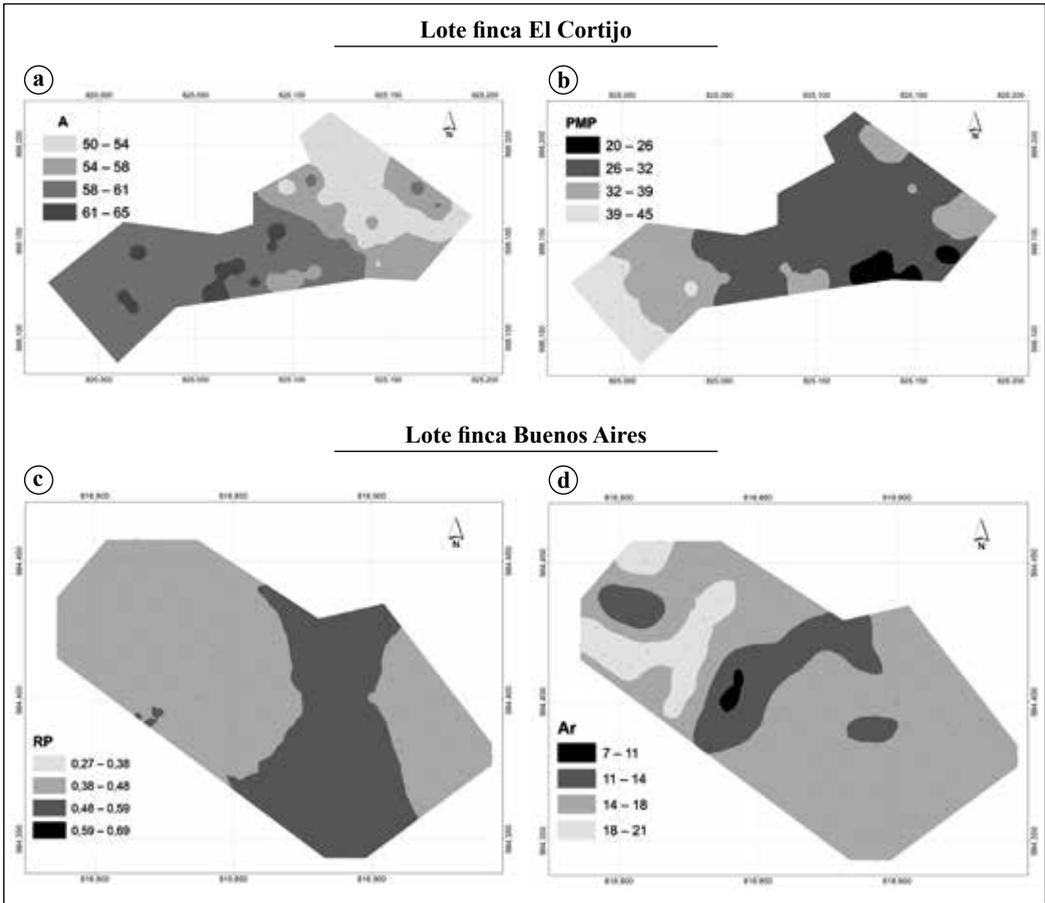


Figura 5. Mapas de variabilidad de propiedades físicas del suelo. A: arenas, %; PMP: retención de humedad en porcentaje gravimétrico a punto de marchitez permanente 1,5 MPa; RP: resistencia a la penetración MPa; Ar: arcillas, %.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo depende de la naturaleza de estas y cambia según la geomorfología. Al respecto, el rango fue mayor para RP que Ar, CH y EAA, y la tendencia fue más pronunciada se registró para A, CC, CH, DR y DA, en comparación con las otras propiedades analizadas.

La selección del método para evaluar la variabilidad depende de la distribución

espacial de cada propiedad y los supuestos geoestadísticos. Cuando estos supuestos no se cumplen y, en consecuencia, el método geoestadístico no permite estudiar la variabilidad, el método determinístico puede ser útil.

AGRADECIMIENTOS

Los autores presentan sus agradecimientos a los caficultores propietarios y administradores

de las fincas donde se realizó la investigación, al Comité Departamental de Cafeteros del Quindío, a los integrantes de la disciplina de suelos de Cenicafé y a los colaboradores Anderson Artunduaga y Santiago Arango.

LITERATURA CITADA

- Andrade, A.D., Faria, R.O., Alonso, D.J.C., Ferraz, G.A., Herrera, M.A.D., Da Silva, F.M. (2018). Spatial variability of soil penetration resistance in coffee growing. *Coffee Science*, 13(3), 341-348.
- Annabi, M., Raclot, D., Bahri, H., Bailly, J.S., Gomez, C. y Le Bissonnais, Y. (2017). Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia. *Catena* 153, 157-167.
- Bagarello, V., Baiamonte, G. y Caia, C. (2019). Variability of near-surface saturated hydraulic conductivity for the clay soils of a small Sicilian basin. *Geoderma*, 340, 133-145.
- Bohling, G.C. (2007). *Introduction to Geostatistics*. (Open File Report No. 26). Kansas: Kansas Geological Survey.
- Bronick, C.J. y Lal, R. (2005). Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil and Tillage Research*, 81(2), 239-252.
- Cambardella, C.A. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa. *Journal of Soil Science Society of American*, 58(5), 1501-1511.
- Carrillo, I.F. (1985). *Manual de laboratorio de suelos*. Chinchiná: Cenicafé.
- Erşahin, S., Aşkin, T., Tarakçıoğlu, C., Özenç, D.B., Korkmaz, K., Kutlu, T. y Bilgili, B.C. (2017). Spatial variation in the solute transport attributes of adjacent Typic Haplusteps, Mollic Ustifluvents, and Lithic Ustipsamments. *Geoderma*, 289, 107-116.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1986). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Quindío*. Bogotá: FNC.
- Ferguson, R.B., Lark, R.M. y Slater, G.P. (2003). Approaches to management zone definition for use of nitrification inhibitors. *Soil Science Society of America Journal*, 67(3), 937-947.
- George, D. y Mallery, M. (2010). *SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference, 17.0 update* (10a ed.). Boston: Pearson.
- Giraldo, R. (2002). *Introducción a la Geoestadística. Teoría y Aplicación*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística.
- Glendell, M., Granger, S.J., Bol, R. y Brazier, R.E. (2014). Quantifying the spatial variability of soil physical and chemical properties in relation to mitigation of diffuse water pollution. *Geoderma*, 214, 25-41.
- Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89(1-2), 1-45.
- Guatibonza, M., Álvarez H., J.G. y Sanabria, J.E. (2009). Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tanguavita (Paipa, Colombia). *Agronomía Colombiana*, 27(2), 261-271.
- Haruna, S.I., Anderson, S.H., Nkongolo, N.V. y Zaibon, S. (2018). Soil hydraulic properties: Influence of tillage and cover crops. *Pedosphere*, 28(3), 430-442.
- Hengl, T., Gerard, B.M.H. y Stein, A. (2004). A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-Kriging. *Geoderma*, 120, 75-93.
- Hu, W., Chau, H.W., Qiu, W. y Si, B. (2017). Environmental controls on the spatial variability of soil water dynamics in a small watershed. *Journal of Hydrology*, 551, 47-55.
- Ilek, A., Kucza, J. y Witek, W. (2019). Using undisturbed soil samples to study how rock fragments and soil macropores affect the hydraulic conductivity of forest stony soils: some methodological aspects. *Journal of Hydrology*, 570, 132-140.
- Jacobs, J.M., Mohanty, B.P., Hsu, E.C. y Miller, D. (2004). SMEX02: Field scale variability, time stability and similarity of soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, 92(4), 436-446.
- Jaramillo, D., González, H. y Álvarez, F. (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-mecánicas de suelos de textura pesada. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 3(2), 10-19.
- Kamale, K.H. y Aggrawal, P. (2011). Geostatistical analyst for deciding optimal interpolation strategies for delineating compact zones. *International Journal of Geosciences*, 2(4), 585-596.
- Kazemi, H.V., Anderson, S.H., Goyne, K.W. y Gantzer, C.J. (2008). Spatial variability of

- bromide and atrazine transport parameters for a Udipsamment. *Geoderma*, 144(3), 545-556.
- Kerry, R. y Oliver, M.A. (2011). Soil geomorphology: Identifying relations between the scale of spatial variation and soil processes using the variogram. *Geomorphology*, 130(1-2), 40-54.
- Kiliç, K., Engin, Ö. y Fevzi, A. (2004). Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. *Soil and Tillage Research*, 76(1), 1-11.
- Kinoshita, R., Schindelbeck, R.R. y Van Es, H.M. (2017). Quantitative soil profile-scale assessment of the sustainability of long-term maize residue and tillage management. *Soil and Tillage Research*, 174(1), 34-44.
- Medina, H., Van Lier, Q.D.J., García, J. y Ruiz, M.E. (2017). Regional-scale variability of soil properties in Western Cuba. *Soil and Tillage Research*, 166(1), 84-99.
- Mitasova, H. (2008). Interpolation. En: Kemp, K. (Ed.) *Encyclopedia of geographic information science*. (p. 237-241). Thousand Oaks: SAGE Publication.
- Moraes, M.T. de, Debiassi, H., Carlesso, R., Franchini, J.C., Silva, V.R. da y Luz, F.B. da (2016). Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research*, 155, 351-362.
- Nascimento, D.M. do, Cavaliere-Polizeli, K.M.V., Silva, A.H. da, Favaretto, N. y Parron, L.M. (2019). Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. *Soil and Tillage Research*, 186(1), 292-299.
- Nielsen, D.R. y Wendroth, O. (2003). *Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation*. Reiskirchen: Catena Verlag.
- Pachepsky, Y. y Park, Y. (2015). Saturated hydraulic conductivity of US soils grouped according to textural class and bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 79(4), 1094-1100.
- Ramírez L., L., Reina S., A. y Camacho T., J.H. (2008). Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colombia. *Engenharia Agrícola Jaboticabal*, 28(1), 55-63.
- Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Brunke, R.R. y Drury, C.F. y Tan, C.S. (2000). Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2): 478-484.
- Rosemary, F., Indraratne, S.P., Weerasooriya, R. y Mishra, U. (2017). Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. *Catena*, 150, 53-61.
- Salamanca J., A., Lince, L.A. y Alzate S., N.A. (2018). Variabilidad espacial de la densidad aparente del suelo a nivel de lote en café. *Cenicafé*, 69(2), 47-59.
- Santos, E.O.D.J., Gontijo, I., Silva, M.B. da. y Partelli, F.L. (2017) Sampling design of soil physical properties in a Conilon coffee field. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41, e0160426. Epub April 27. 2017. doi.org/10.1590/18069657rbcs20160426.
- Schjønning, P., McBride, R.A., Keller, T. y Obour, P.B. (2017). Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. *Geoderma*, 286, 83-87.
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D. y Curi, N. (2015). Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic Latosol as affected by soil management. *Soil and Tillage Research*, 154, 103-113.
- Stock, O. y Downes, N.K. (2008). Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. *Soil and Tillage Research*, 99(2), 191-201.
- Valencia A., G. (1999). *Fisiología, nutrición y fertilización del café*. Chinchiná, Cenicafé-Agrosumos del Café.
- Vargas, R.D.P., Serrato, F. y Trujillo, A.T. (2015). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas-Huila. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 113-123.
- Vásquez P., J.R., Baena G., D. y Menjivar F., J.C. (2010). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. *Acta Agronómica*, 59(4), 449-456.
- Warrick, A.W. y Nielsen, D.R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. En D. Hillel (Ed.) *Applications of soil physics* (p. 319-344). New York: Academic Press.
- Wilding, L.P. y Drees, L.R. (1983). Spatial variability. En L.P. Wilding, N.E. Smeck and G.F. Hall (Eds.) *Pedogenesis and soil Taxonomy. I. Concepts and interactions*. (p. 83-116). Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

VARIABLES AGRONÓMICAS DETERMINANTES DE LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE CAFÉ EN FINCAS DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS¹

Humberto Araque Salazar*, Hernando Duque Orrego**

ARAQUE S., H.; DUQUE O., H. Variables agronómicas determinantes de la productividad del cultivo de café en fincas del departamento de Caldas. Revista Cenicafé 70(1):81-92. 2019

El presente estudio analizó las variables agronómicas determinantes en la producción del cultivo de café, que pueden ser intervenidas por los productores y que contribuyen a mejorar la productividad del cultivo. La investigación se desarrolló en fincas cafeteras del Departamento de Caldas que hicieron parte del programa de Gestión Empresarial del Comité Departamental de Cafeteros de Caldas, durante el año 2013. Se construyó una función de producción tipo Cobb–Douglas que permitió visualizar el peso de las variables agronómicas en la explicación de la productividad del cultivo; cinco de las variables estudiadas resultaron significativas por su efecto en las variaciones en la productividad del cultivo, siendo la más importante la densidad de siembra, expresada en número de árboles de café por hectárea cultivada. El trabajo aporta información de campo que permite ilustrar a los productores sobre el impacto que tienen las decisiones técnicas en la productividad en el largo plazo y a los extensionistas para fortalecer la transferencia de tecnología.

Palabras clave: Función de producción, densidad de siembra.

AGRONOMIC VARIABLES THAT DETERMINE THE PRODUCTIVITY OF COFFEE CROPS IN FARMS OF THE CALDAS DEPARTMENT

This study analyzed the agronomic variables that determine the productivity of coffee crops, which could be managed by coffee producers in order to increase crop productivity. This research was conducted at coffee farms in the Caldas Department that were part of the enterprise management program of the Committee of Coffee Growers of Caldas, during the year 2013. A modified Cobb–Douglas type production function was used because it allows to visualize the influence of the agronomic variables in the explanation of the crop productivity process. Five of the studied variables had significant influence because of their effect in the crop productivity variations; the most important was sowing density, expressed in number of coffee trees per planted hectare. The field work provides information that allows to explain to coffee producers the impact of technical decisions on productivity in the long term; it also allows to show such factor to extension agents in order to strengthen the technology transfer strategy of the growers.

Keywords: Production function, sowing density.

¹ Tesis de Grado para optar el título de Maestría en Administración. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

*Coordinador Programa, Comité Departamental de Cafeteros de Caldas.

**Gerente Técnico, Federación Nacional de Cafeteros–FNC.

La caficultura en Colombia se desenvuelve en un contexto de fuertes fluctuaciones en el precio del café, afectando negativamente a los productores y las zonas cafeteras. La caficultura es el principal renglón agrícola que soporta el ingreso para 560 mil productores, cuyas familias están constituidas por cerca de 2,7 millones de personas, ubicadas en 20 de los 32 departamentos del país (Ureña, 2013). La importancia social y económica que aún mantiene la caficultura en el país genera la necesidad de desarrollar estrategias para que las familias puedan ejercer su actividad económica de manera satisfactoria.

El precio de venta del café en Colombia lo determinan tres elementos: precio del café en la bolsa de Nueva York (Contrato C)², la prima de calidad que se paga al café colombiano y la tasa de cambio vigente. El precio de los fertilizantes, que es el agroinsumo principal, está atado a la cotización internacional de la urea, el potasio y el fósforo (FNC, 2014). Un productor de café no tiene posibilidad de intervenir en los elementos de la formación del precio, por lo cual, para mejorar su utilidad solo puede actuar en lograr una mejor productividad y en la optimización de los insumos de producción.

En el mundo agrícola se utilizan, indistintamente, los términos “productividad” y “rendimiento” para indicar las unidades de peso que se producen por hectárea, esta medición depende de tres factores: la fertilidad del suelo, la adaptación genética de la planta a las condiciones del clima o los suelos, y el impacto de la tecnología empleada (Machado, 2009). En un sentido amplio, la productividad se define comúnmente como una relación de una medida de volumen de producción a una medida de volumen de uso de insumos (Global Strategy, 2017). En su nivel más básico, la

productividad mide la cantidad producida por una unidad agrícola, dado un conjunto de recursos e insumos.

La búsqueda de la mayor productividad en la agricultura es una vía correcta, pues la productividad y la competitividad están estrechamente relacionadas: una mayor productividad puede conducir a una mayor competitividad de la unidad de producción, porque se produce más a partir de casi la misma cantidad de recursos. Esto significa que, con todo lo demás igual, el costo de producción por unidad de producción es menor, y los márgenes por unidad producida tenderán a ser mayores (Global Strategy, 2017).

Los factores que definen la producción agrícola son complejos de medir, especialmente los vinculados con la interacción “planta-medio ambiente” (Arcila, 2007), los cuales el productor no está en capacidad de modificar; sin embargo, los relacionados con las tecnologías de producción pueden ser intervenidos por el productor y, por lo tanto, pueden ser objeto de estudio para encontrar sus relaciones con la productividad.

Para estudiar estas relaciones se utilizan funciones de producción. De acuerdo con Patil (2012), la función de producción es una relación tecnológica que muestra, para un estado de conocimiento tecnológico, cuánto puede producirse con unas cantidades dadas de insumos. En este sentido la función expresa la relación tecnológica, factores y productor. En la agricultura la producción es la función de la tierra, el trabajo, el capital, la organización y la tecnología, entre otros.

Duque (2001) realizó un análisis económico de algunas prácticas y tecnologías

² Contrato C, determina las reglas, para trazar los cafés arábigos lavados, o cafés suaves como el que produce Colombia.

recomendadas por Cenicafé para el manejo del cultivo del café, las prácticas escogidas fueron consideradas clave, por el papel que desempeñan en: reducción de costos de producción, mejoramiento de la productividad, aumento de los ingresos de las fincas cafeteras, así como preservación de la calidad del café. Este estudio buscó difundir las ventajas de las tecnologías estudiadas presentando su viabilidad técnica y económica, con el objetivo de mejorar el desempeño económico de las fincas cafeteras, elevar su competitividad y contribuir al desarrollo rural de región cafetera.

Duque y Bustamante (2002) utilizando una función de producción tipo Cobb-Douglas, estudiaron variables asociadas a la producción de café, las cuales se agruparon en tres categorías: variables para describir las condiciones de producción de las fincas, variables para la descripción socioeconómica de los productores y variables relacionadas con los aspectos económicos y financieros de las fincas estudiadas. Es este estudio se construyeron tres modelos econométricos partiendo de la función tipo Cobb-Douglas, los cuales buscaban explicar las variaciones en la productividad del factor tierra, los costos unitarios de producción y el margen bruto por hectárea.

El modelo que explicó la productividad del factor tierra incluyó siete variables que resultaron significativas, disponibilidad de capital de trabajo, hectáreas cultivadas en café, edad promedio de los lotes, densidad de siembra promedio, mano de obra (jornales/ha), kilogramos de fertilizante aplicados por hectárea y porcentaje de la finca sembrada en café; la mayor respuesta en términos de

productividad por hectárea se relacionó con la densidad de siembra.

Para el presente estudio las variables seleccionadas con el fin de analizar su aporte a la explicación del fenómeno de la productividad del cultivo de café, fueron las de tipo tecnológico asociado al cultivo³. Se escogieron teniendo en cuenta tres criterios: que aparecieran en las investigaciones previas, específicamente las reportadas por, Leibovich y Barón (1996), Duque y Bustamante (2002) y Perdomo y Mendieta (2007); que hicieran parte de los avances tecnológicos para el cultivo de café generados por Cenicafé; que pudieran ser objeto de intervención por parte del agricultor, de tal manera que la información generada y los elementos encontrados en la investigación pudieran ser de utilidad para los caficultores participantes.

Con el objetivo de identificar el aporte de cada una de las variables tecnológicas al fenómeno de la productividad del cultivo de café, en este estudio se construyó una función de producción que relacionó la productividad del cultivo de café medida (@ año⁻¹ de c.p.s.) y las variables tecnológicas del sistema de producción, para lo cual se utilizó una función Tipo Cobb-Douglas.

De acuerdo con Debertin (1986), la función tipo Cobb-Douglas ha sido utilizada virtualmente para cualquier proceso de producción que involucre la transformación de insumos en productos, en la producción agrícola. Recientemente, Ghoshal y Goswani (2017), utilizaron esta función para analizar la eficiencia en la producción de arroz, en diferentes regiones de la India.

³ Se excluyeron de análisis del proceso de producción de café, las tareas de cosecha y postcosecha, por la dificultad para la recolección de la información en campo, que implicaría un tiempo muy largo de dedicación a esta labor por parte de los técnicos del Servicio de Extensión quienes son los encargados de la recolección de la información, haciendo inviable la realización del estudio.

Igualmente, Malacarne *et al.* (2017) estudiaron, bajo los criterios de la investigación de innovación inducida de Hayami y Ruttan, e incluyeron 129 países y para un marco de tiempo a 50 años, y explicaron el proceso de producción utilizando la función tipo Cobb-Douglas. Pudo probarse aún más las implicaciones del cambio técnico en la productividad de las variables: trabajo, tierra, fertilizantes y capital.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en el departamento de Caldas (Colombia), que está conformado por 27 municipios, de los cuales 25 derivan su economía de la producción de café (Figura 1).

En el estudio participaron caficultores de 22 de los 25 municipios cafeteros (Tabla 1),

destacándose que los tres municipios faltantes son los que tienen menores áreas cultivadas en café en el departamento.

Se estudiaron los cultivos de café de 336 fincas cafeteras, correspondientes al año 2013 (enero 1 a 31 diciembre), incluidas en el programa de Gestión Empresarial del Comité Departamental de Cafeteros de Caldas y que registraron costos en la herramienta “mis costos en la Web”⁴ u otros aplicativos, pero que en todos los casos utilizaron la misma captura de información y estructura de costos de producción.

Los caficultores de Caldas tomaron parte en este programa de manera voluntaria, digitando directamente la información en la herramienta (previa capacitación por parte del Servicio de

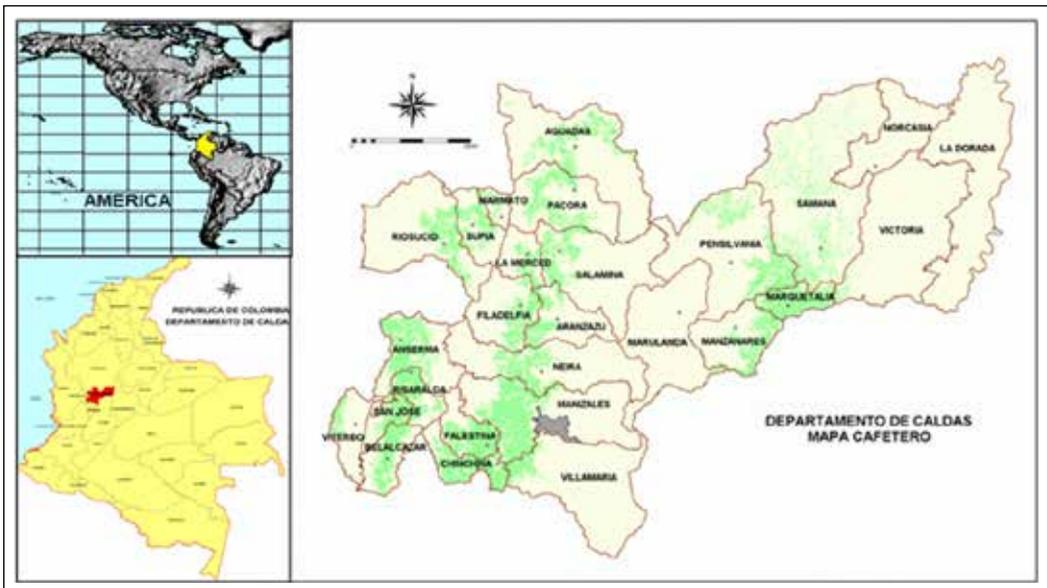


Figura 1. Zona donde se realizó el estudio.

⁴ El programa mis costos en la Web fue desarrollado por el Comité Departamental de Cafeteros de Caldas, y lo pone a disposición de los caficultores del departamento, para que registren sus costos. Algunos caficultores registran costos en herramientas distintas, pero los entregan al Comité para su consolidación.

Extensión del Comité de Cafeteros de Caldas), por lo cual su distribución no obedece a alguna regla específica, cualquier productor puede solicitar ingreso al programa. Por lo anterior, para este estudio las 336 fincas cafeteras no se considerarán como una muestra aleatoria y, por lo tanto, los resultados obtenidos representan únicamente la dinámica de esta población.

Tabla 1. Fincas participantes por municipio.

Municipio	No. de fincas
Aguadas	14
Anserma	16
Aranzazu	4
Belalcázar	5
Chinchiná	52
Filadelfia	5
La Merced	1
Manizales	56
Manzanares	12
Marquetalia	12
Neira	11
Pácora	17
Palestina	59
Pensilvania	7
Riosucio	9
Risaralda	21
Salamina	8
Samaná	5
San José	8
Supía	7
Villamaría	5
Viterbo	2
Total	336

La información económica y tecnológica se tomó de dos fuentes:

a) Sistema de información cafetera SICA,⁵ para las variables asociadas al componente tecnológico de la producción de café.

b) Base de datos consolidada por el Comité Departamental de Cafeteros, de las 336 fincas del programa mis costos en la Web y otros aplicativos que utilizan la misma estructura de costos, para las variables del componente económico de la producción de café.

Variables de respuesta

Las variables tecnológicas escogidas para estudiar el sistema de producción fueron: edad de los cafetales (años), densidad de los cafetales (plantas/hectárea), porcentaje del área cultivada en variedades resistentes a la roya (porcentaje), porcentaje del área cultivada en variedades susceptibles a la roya (porcentaje) y fertilización por hectárea (kg ha⁻¹ de fertilizante).

Construcción de la función de producción

Se construyó una función de producción que relacionó la productividad del cultivo de café medida como arrobas⁶ por año de café pergamino seco (@ año⁻¹ de c.p.s) y las variables tecnológicas del sistema de producción, para lo cual se utilizó una función Tipo Cobb-Douglas (Ecuación <1>).

$$Y_t = AKt^\alpha Lt^\beta \quad 0 < \alpha, \beta < 1 \quad <1>$$

⁵ Sistema de información geográfico de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, que permite georeferenciar las fincas cafeteras y la información de su caficultura, es actualizado por el Servicio de Extensión de la Federación de Cafeteros.

⁶ Una arroba de café pergamino seco, equivale a 12,5 kg.

Donde:

Y_t : producción

A : progreso técnico exógeno (constante de la función)

Kt : stock de capital (capital)

Lt : número de empleados en una economía (mano de obra)

α y β : representan las elasticidades parciales de las variables capital y mano de obra (Schotter,1996).

En el caso de la función tipo Cobb-Douglas, la suma de las elasticidades parciales pueden alcanzar un valor diferente a la unidad y por ello permite el ingreso de un mayor número de variables a la función.

Al ser una función exponencial, para linealizarla se tomaron logaritmos naturales en ambos lados de la ecuación, para transformarla en una función doble logarítmica (Debertin, 1986), la cual es lineal en sus parámetros. Para uso econométrico se incluyó el término e , el cual representó el error de la función; la expresión de la función que se utilizó para construir los modelos se representa en la Ecuación <2>.

$$\ln(Y) = \ln A + \beta_1 \ln(X_1) + \beta_2 \ln(X_2) \dots \beta_n \ln(X_n) + e \quad \langle 2 \rangle$$

Donde:

Y : productividad

X_n : variables tecnológicas

β : elasticidades parciales de variables

Para estimar los parámetros β se usó el método de regresión lineal, se empleó

el programa estadístico (SAS), como lo propone Olva (2009). En el análisis se consideraron para ser incluidas en el modelo, aquellas variables que presentaron un nivel de significancia menor o igual al 15%, por tratarse de un estudio de campo y con énfasis en caficultura comercial, que es ampliamente heterogénea. Adicionalmente, se tuvieron en cuenta los conceptos de heterocedasticidad, autocorrelación y multicolinealidad.

Una de las características destacables de la función transformada, es que permite conocer con facilidad las elasticidades parciales de cada variable (parámetros β). Esto significa que a mayor valor de un parámetro β , mayor elasticidad parcial y, por lo tanto, variaciones porcentuales en el valor de la variable tendrán mayor peso en la determinación en la productividad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se resalta la heterogeneidad en los tamaños de los predios participantes en el estudio, pues varió entre 0,33 hectáreas el de menor tamaño y 161 hectáreas para el de mayor tamaño.

En cuanto a la cantidad de fertilizante aplicada fue en promedio de 987,71 kg ha⁻¹ de fertilizante, con un coeficiente de variación de 43,37%, mediana de 941,61 kg ha⁻¹ de fertilizante, encontrándose que el 25% de las fincas aplican menos de 679,74 kg ha⁻¹ de fertilizante; en la Tabla 2 se presenta el análisis de los percentiles. Para cafetales en producción, Valencia (1992) en el Avance Técnico No.175 de Cenicafé sobre fertilización de cafetales, menciona que la dosis anual con fertilizantes simples es 1.000 kg ha⁻¹ y 1.400 kg ha⁻¹ con compuestos, los valores encontrados pueden indicar que se estuviera realizando una fertilización inadecuada (subfertilizando).

Tabla 2. Valor de los cuartiles para niveles de fertilización

Análisis de cuartiles para la fertilización (kg ha⁻¹ de fertilizante)	
Cuartil estimado	Valor
Min	171,828
Q1	679,74
Q2	941,617
Q3	1.300
Max	2.240

El porcentaje promedio de fincas sembradas con áreas en variedades resistentes a la roya del café fue del 83,46%, con un coeficiente de variación del 31,14%. De acuerdo con la información consignada en la Tabla 3, se indica que el 50% de las fincas tenían la totalidad de su área sembrada en variedades resistentes a la roya del café. El porcentaje promedio de fincas sembradas únicamente con variedades susceptibles a la roya fue del 16,53%.

Tabla 3. Valor de los cuartiles para porcentaje de variedad resistente

Análisis de cuartiles para porcentaje variedad resistente	
Cuartil estimado	Valor
Min	0
Q1	0,7731
Q2	1
Q3	1
Max	1

De estudios previos como el realizado por Duque (2005), se ha encontrado que la edad de los cafetales es una de las variables más importantes en determinar la productividad del cultivo. La edad promedio encontrada para la población de este estudio fue de 3,71 años, que es muy baja comparada con el promedio nacional, que para el momento del estudio estaba en 7,09 años. El coeficiente de variación fue del 40,43%. Al analizar los cuartiles que se presentan en la Tabla 4, se destaca que

75% de las fincas estudiadas tienen cafetales menores de 4,2 años.

Tabla 4. Cuartiles para la variable edad promedio de los cultivos.

Análisis de cuartiles para edad del cafetal (años)	
Cuartil estimado	Valor
Min	0,7
Q1	2,9
Q2	3,4
Q3	4,2
Max	16,66

La densidad de siembra del cultivo (expresada en el número de árboles de café sembrados en una hectárea de terreno), al igual que la edad, es considerada de gran importancia para la productividad del cultivo de café. La densidad promedio de las fincas del estudio fue de 6.643 árboles/ha, que es alta comparada con las 5.196 del resto del país, y corresponde a un avance de la región hacia las densidades óptimas (por encima de 7.000 plantas/ha), con un coeficiente de variación de 20,58%. La Tabla 5 muestra que únicamente 25% de la población tiene densidades inferiores a 5.622 árboles/ha.

Tabla 5. Cuartiles para la variable densidad de siembra.

Análisis de cuartiles para densidad de siembra (árboles/ha)	
Cuartil estimado	Valor
Min	3.830
Q1	5.622
Q2	6.517,5
Q3	7.559
Max	9.988

Modelo de productividad del cultivo de café

La variable de respuesta elegida para el modelo fue la productividad promedio por hectárea

de cada finca, definida como la producción de café expresada en arrobas de café pergamino seco. A partir del procedimiento utilizado se obtuvo un modelo en función de cinco variables que resultaron significativas (P valor $< 0,15$).

El modelo fue significativo (P valor $< 0,0000$) y presentó un R^2 de 0,497. Lo anterior indica que este modelo explica hasta el 49,7% de las variaciones en la productividad promedio por hectárea de las fincas, en función de las variaciones en las variables. En la Tabla 6 se presentan los valores de los parámetros β encontrados para las variables que resultaron significativas en el modelo.

Es importante destacar que el modelo no incluyó, como se mencionó anteriormente, por su dificultad o imposibilidad de ser intervenidas por los productores cafeteros, los aspectos biofísicos como clima y suelo, entre otros, y que por ser un proceso productivo agrícola deben tener impacto en la productividad.

Los coeficientes beta establecidos, corresponden a la elasticidad parcial de cada variable. Las máximas elasticidades parciales correspondieron a las variables: densidad del cafetal árboles/ha (1,03) y nivel de fertilización—kg ha-año⁻¹ de fertilizante (0,515), las dos con

coeficiente positivo, lo cual indica que estas variables son las que tienen mayor peso en la determinación de la productividad.

El estudio previo elaborado por Duque y Bustamante (2002), coincide con el resultado encontrado en el presente modelo, donde la densidad (árboles/ha) es la variable con mayor influencia en la productividad del café (mayor elasticidad parcial), elemento preponderante en los sistemas de producción de café y, por consiguiente, debe ser tenida en cuenta en las estrategias y programas para elevar la productividad del cultivo.

El modelo elaborado interrelaciona las variables tecnológicas, indicando qué variables resultan significativas y muestra la importancia y el peso de cada una de ellas en la explicación del fenómeno de la productividad, pero es importante tener en cuenta que se trata de un fenómeno biológico y como tal tiene restricciones.

A continuación, se analizan cada una de las variables que se incluyen en el modelo.

Densidad. Se entiende por densidad del cultivo de café, el número de árboles sembrados por unidad de área (árboles/ha), en el modelo

Tabla 6. Parámetros estimados para el modelo de productividad del cultivo de café.

Variable	Unidad medida variable	Nomenclatura para el modelo	Parámetro estimado	Error	t	$Pr>t$
		Intercepto	-7,853	1,294	-6,07	0,00000
Área en levante	Hectárea	alev	-0,072	0,0225	-3,214	0,00000
Edad del cafetal	Año	edad	0,0994	0,0744	1,336	0,00140
Nivel de fertilización	kg ha-año ⁻¹ de fertilizante	fert_ha	0,515	0,0517	9,967	0,01400
Porcentaje de variedad resistente	Porcentaje	Por_res	0,0309	0,055	0,0557	0,01500
Densidad del cafetal	Árboles/ha	dens	1,03	0,145	7,162	

se identifica que la mayor elasticidad parcial es la de esta variable, implica que, al aumentar porcentualmente la densidad de siembra, se logran los mayores aumentos porcentuales en la productividad.

Para el caso de la densidad se han realizado estudios que han permitido establecer la respuesta en productividad a densidad de siembra en Colombia. Duque (2005) reporta la Ecuación <3>.

$$Y=130,73 + 0,052647X - 0,000002359X^2 \quad <3>$$

Donde:

Y: producción en arrobas/ha

X: número plantas/ha

Esta función es de tipo cuadrático y se caracteriza por ser marginal decreciente, por lo tanto, al aumentar la densidad de siembra a partir de 2.500 árboles/ha hasta un poco más de 10.000 árboles, la productividad se incrementa, pero en forma decreciente, para luego comenzar a disminuir. Por lo tanto, la respuesta es no lineal y la respuesta llega a un punto en el cual se torna decreciente, como se mencionó anteriormente. Utilizando esta función se estimó el óptimo biológico y económico para la variable densidad de siembra, encontrando el óptimo biológico alrededor de 11.000 plantas/ha y el óptimo económico entre 9.400-9.800 plantas/ha (Arcila, 2007).

Es importante destacar que, aunque el modelo encontró la variable densidad como la más influyente en la productividad, esta tiene un límite biológico y económico, en consecuencia, los aumentos que se logren en densidad, que contribuyan a alcanzar los niveles óptimos, serán beneficios para la productividad, lo contrario la afectaría negativamente. Estos óptimos también están

sujetos a las condiciones ambientales y de manejo donde se encuentre el cultivo.

Edad. La variable edad de la plantación, medida en años, presenta una elasticidad parcial positiva, mostrando que tiene influencia directa en la productividad, lo que indicaría que aumentos porcentuales en la edad se reflejarían en aumentos porcentuales en la productividad. Para entender el impacto de esta variable se debe complementar la información obtenida en el modelo con las conclusiones de los estudios realizados por Mestre *et al.* (1994), quienes encontraron que la respuesta en productividad de acuerdo a la edad de la plantación se explica mediante funciones cuadráticas, que son además marginales decrecientes (Duque, 2001).

Lo anterior significa que durante el ciclo productivo se incrementa la producción, pero en forma decreciente, hasta alcanzar un máximo y luego comienza a disminuir. Duque en 2005, con información obtenida por Uribe (1965), en ocho cosechas y tres densidades de siembra, encontró el punto específico para cada densidad, en el cual el promedio de la producción era máximo, el punto varía para cada densidad de población. Para mantener altas productividades es necesario evitar la prolongación del ciclo del cultivo excesivamente, las plantaciones deben ser renovadas en el momento oportuno, según su densidad de siembra.

Área en levante. La variable área en levante, la cual corresponde a las áreas que están sembradas, pero no han entrado en producción, en general menores de 24 meses de edad, porque han sido renovadas, presentan un coeficiente con signo negativo, lo cual indica que, si las áreas en levante aumentan, la productividad total de la finca disminuye.

Para que una finca pueda mantener equilibrio técnico y económico en su sistema productivo,

y a la vez se evite el envejecimiento de sus plantaciones, debe existir un equilibrio entre el área en levante y área en producción. Arcila (2007), basado en los trabajos de Mestre y Ospina (1994), recomienda dividir el número total de plantas en grupos de igual tamaño según las características del cultivo (zona, densidad, luminosidad, etc), y cada año debe renovarse uno de ellos, las áreas correspondientes a este grupo de plantas son las áreas en levante.

Cuando no se cumple esta regla y se renueva un mayor número de plantas, se afectará negativamente la productividad, tal como lo indica el signo del coeficiente en el modelo; por el contrario, si no se realiza el proceso de renovación se envejecerá la plantación afectando negativamente la productividad.

Porcentaje de variedades resistentes. Esta variable mide la proporción del área en café sembrado con variedades resistentes a la roya, el modelo muestra un coeficiente con signo positivo, indicado que si se aumenta el porcentaje de variedades resistentes se tendrá un aumento porcentual en la productividad; el máximo aumento se daría cuando la totalidad del área se encuentre sembrada con variedades resistentes.

Lo anterior es concordante con estudios realizados sobre el impacto de la enfermedad de la roya del cafeto en la producción; se encontró que en ausencia de medidas de control, se presentaban reducciones hasta del 23,0% de la producción acumulada en un ciclo de cinco años (cuatro cosechas), pero también puede afectar la conversión de café cereza a pergamino seco (Rivillas *et al.*, 1999).

Niveles de fertilización. Esta variable, medida en kg ha^{-1} de fertilizante, mostró un coeficiente con un valor de 0,515, el segundo más alto después de la densidad y con valor positivo, indicando que si se dan aumentos

porcentuales en los niveles de fertilización se tendrá un aumento porcentual mayor en la productividad.

El crecimiento y el desarrollo de los cafetales y, por ende, su producción y rentabilidad, dependen en buena medida de una adecuada nutrición, la cual se logra cuando la planta dispone de cantidades suficientes y balanceadas de todos los nutrientes requeridos; adicionalmente, los cultivos correctamente alimentados ofrecen una mejor calidad del grano y son más resistentes a plagas, enfermedades, sequías y otras condiciones adversas (Sadeghian, 2013).

En promedio, la producción de café puede disminuir en más de 40,0% cuando no se realiza la labor de la fertilización (Sadeghian, 2010), valor concordante con el resultado obtenido por el modelo. Sin embargo, es necesario tener presente que, en los trabajos realizados sobre fertilización se ha encontrado respuesta positiva en producción hasta cierto límite, Duque (2005) para un estudio en el departamento del Quindío, afirma que la aplicación de nitrógeno se ajusta a una función polinomial del segundo grado (cuadrática) que es marginal decreciente.

El análisis de esta función contribuyó a concluir que para la aplicación de fertilizante existe un valor óptimo, por lo cual los aumentos en fertilización afectan positivamente la productividad, como lo sugiere el modelo, hasta que se alcance el valor óptimo; valores superiores no tendrán efecto y generan sobrecostos.

La herramienta técnica para hacer un adecuado manejo de la fertilización es el análisis de suelos, que conduce a la aplicación ajustada de los elementos deficientes en el suelo y contribuye a la racionalización de los insumos y reducción del costo de producción (Sadeghian, 2013).

El estudio realizado permite concluir que con el método de la función de producción se actualizó la información relacionada con la productividad del café en el departamento de Caldas. Los resultados obtenidos pueden redundar en recomendaciones prácticas para los productores del departamento, pero también de otras regiones cafeteras del país, en un sentido general, que les permita aumentar la productividad. De acuerdo con los resultados encontrados, se presentan las siguientes consideraciones finales:

El modelo encontrado para la productividad relaciona cinco variables que resultaron significativas: el área en levante medido en hectáreas, la edad de los cafetales medida en años, la densidad del cultivo medida en árboles/hectárea, porcentaje de área sembrado en variedades resistentes medido en porcentaje, nivel de fertilización medido en kilogramos fertilizante por hectárea al año.

El modelo de productividad del cultivo de café encontrado, explica el 49,7% de las variaciones en la productividad, resultado positivo, teniendo en cuenta que la información obedece a un ejercicio real de los caficultores participantes, en el marco de condiciones comerciales de producción de café. El modelo no contempló las variables ambientales que interactúan con la productividad del cultivo.

La variable que más aporta a la productividad por hectárea es la densidad de siembra (árboles/hectárea), que presentó la mayor elasticidad parcial y con signo positivo; este resultado concuerda con el modelo previo elaborado por Duque y Bustamante (2002).

La densidad de siembra puede ser intervenida por el productor. Sin embargo, el mejor momento para cambiar esta variable es durante las renovaciones por siembra o zoca del cultivo o en las siembras nuevas de

café. Teniendo en cuenta esta característica, los productores deben abordar el manejo de esta variable como de tipo estratégico para su empresa cafetera, y lo deben hacer con una visión de largo plazo, para evitar impactos negativos en la productividad.

La segunda variable con mayor aporte a la productividad es la fertilización. Esta variable tiene una característica destacable, que está relacionada con el hecho de que el productor la puede intervenir de manera inmediata, adoptando las recomendaciones técnicas de fertilización, generadas por la investigación y transferidas por el servicio de extensión rural; aunque la respuesta puede ser lenta, como ocurre con la corrección de la acidez.

El modelo también encontró a la variable edad del cafetal como significativa en la explicación de la productividad, presentado una elasticidad parcial con signo positivo; esta variable puede ser intervenida de manera inmediata para mejorar la productividad. Para la decisión del grado de intervención sobre esta variable debe tenerse en cuenta el impacto sobre las áreas en levante, las cuales en el modelo presentan elasticidad parcial con signo negativo, indicando que si aumentan reducen la productividad.

El modelo confirma las bondades de establecer variedades resistentes a la roya del café, la cual presenta elasticidad parcial con signo positivo, lo que indica que su incremento aporta al aumento de la productividad. Debido a que esta variable, al igual que la densidad de siembra, sólo puede intervenir en el momento de las renovaciones por siembra, es clave que se considere como una variable crítica para el éxito del negocio cafetero.

Debido a que las variables encontradas como significativas, por ejemplo, la variedad, no pueden modificarse en largos periodos de

tiempo, se requiere que el productor tenga un alto nivel de información y comprensión de las implicaciones sobre la productividad y, por lo tanto, sobre la rentabilidad del negocio. Lo anterior requiere que el productor evalúe las consecuencias en el largo plazo de las intervenciones que se realicen o dejen de realizarse sobre estas variables y su relación con la productividad y rentabilidad de la finca.

Las variables densidad y edad, al relacionarse con la productividad y vistas de manera independiente, tienen un comportamiento cuadrático y son marginales decrecientes. En este sentido, cualquier simulación que se haga con el modelo, debe respetar el rango de las variables, para la función encontrada.

LITERATURA CITADA

- Arcila, J. (2007). Factores que determinan la productividad del cafetal. En H.F. Ospina (Ed). *Sistemas de producción de café en Colombia* (pp.60-86). Chinchiná: Cenicafé.
- Debertin, D.L. (1986) *Agricultural production economics*. New York: University of Kentucky.
- Duque O., H. (2001). *Análisis económico de doce prácticas para mejorar el desempeño de las fincas cafeteras*. Chinchiná: Cenicafé.
- Duque O., H. (2005). *Cómo reducir los costos de producción en la finca cafetera*. Chinchiná: Cenicafé.
- Duque O., H., y Bustamante, F. (2002). *Determinantes de la productividad del café*. Chinchiná: Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2014). *Comportamiento de la industria cafetera colombiana*. Bogotá: FNC.
- Ghoshal, P. y Goswami, B. (2017) Cobb-Douglas production function for measuring efficiency in Indian agriculture: a region-wise analysis. *Economic Affairs*, 62(4), 573-579.
- Global Strategy. (2017). *Productivity and efficiency measurement in agriculture: literature review and gaps analysis*. (Technical Report Series GO-19-2017). Roma: GSARS.
- Leibovich, J. y Barón, C. (1996). *Determinantes de la productividad cafetera en finca*. Santafé de Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Economía, Centro de Estudios sobre Desarrollo Económico CEDE.
- Machado A., C. (2009a). El rezago productivo de la agricultura venezolana. *Debates IESA*, 14(3), 69-73.
- Machado A., C. (2009b). *Políticas públicas y desarrollo tecnológico agrícola en Venezuela*. En Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. No. 17 (p. 103-182). Caracas: Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat.
- Malacarne, J.H., Artz, G.M. y Orazem, P. (2017). *Agricultural production and technical change around the world, 1961-2010*. (Economics Working Paper 17024). Ames, IA: Iowa State University, Department of Economics.
- Mestre M., A., y Ospina O., H.F. (1994). *Estabilización de la producción en fincas cafeteras*. (Avance Técnico No. 200). Manizales: Cenicafé.
- Olva, H. (2009). *Análisis de la función de producción cobb-douglas y su aplicación en el sector productivo mexicano* (Tesis pregrado para optar al título de licenciado en estadística) Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Patil, A.K. (2012). *Agricultural Production and Productivity*. Karad, India: Sadguru Gadage Maharat College.
- Perdomo, J.A., y Mendieta, J.C. (2007). Factores que afectan la eficiencia técnica y asignativa en el sector cafetero colombiano: una aplicación con análisis envolvente de datos. *Desarrollo y Sociedad*, 60, 1-45.
- Rivillas O., C.A., Leguizamón C., J.E., y Gil V., L.F. (1999). *Recomendaciones para el manejo de la roya del café en Colombia*. (Boletín Técnico No. 19). Manizales: Cenicafé.
- Sadeghian K., S. (2010). *Fertilización: una práctica que determina la producción de los cafetales*. (Avance Técnico No. 391). Manizales: Cenicafé.
- Sadeghian K., S. (2013). Nutrición de cafetales. En F. Gast (Ed). *Manual del cafetero colombiano: investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura*. Vol. 2 (p 85-115). Chinchiná. Cenicafé.
- Schotter, A. (1996). *Microeconomía*. México: Editorial continental S.A.
- Urueña G., M. (2013). El mercado mundial y nacional del café en el siglo XXI. En *Manual del cafetero colombiano: investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura*. Vol. 1 (p.18-25). Chinchiná: Cenicafé.
- Valencia A., G. (1992). *Fertilización de los cafetales*. (Avance Técnico No. 175). Manizales: Cenicafé.

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.
Ángela Jaramillo G., Prof. en Comercio Internacional, Esp.

DISCIPLINAS DE INVESTIGACIÓN

Agroclimatología

Juan Carlos García L., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Ninibeth Gibelli Sarmiento H., Ing. Agrícola
Pablo Jaramillo R., Ing. Ambiental
Jonnier Alejandro Hoyos A., Tecnólogo en gestión agropecuaria
Wilmar Antonio Rendón G., Tecnólogo en Sistemas Informáticos
Jorge Wilmar Valencia G., Tecnólogo en Análisis y Desarrollo de Sistemas de Información
Luis Gonzaga Henao R.
Luis Fernando Torres Q.
Orlando Salazar G.

Biometría

Rubén Darío Medina R., Estadístico, M.Sc.
Esther Cecilia Montoya 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
Luz Fanny Echeverry G., Química
Claudia Rocío Gómez P., Tecnóloga Química
Paola Andrea Calderón T., Tecnólogo en Producción Agropecuaria Ecológica

Economía

Hugo Mauricio Salazar E., Ing. Agrónomo, M.Sc.
César Alberto Serna G., Contador, M.Sc.
Juan Carlos Gómez S., Contador, Ing. Agrónomo, M.Sc.

Entomología

Pablo Benavides M., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Carmenza Esther Góngora B., Microbióloga, Ph.D.
Zulma Nancy Gil P., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Marisol Giraldo J., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Flor Edith Acevedo B., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Lucio Navarro E., Biólogo, Ph.D.
Luis Miguel Constantino C., Biólogo Entomólogo, M.Sc.
Aníbal Arcila M., Ing. Agrónomo
Mauricio Jiménez Q., Agrónomo
Jesús Hernando Gómez L., Biólogo
Juan Diego Maldonado C., Biólogo

Diana Soraya Rodríguez A., Técnico en Producción de Café
Luis Eduardo Escobar S., Tecnólogo en Gestión Agropecuaria
Juan Carlos Ortiz F.
Carlos Alberto Quintero A.
Claudia Bibiana Tabares B.
Faber de Los Ríos P.
Diana Marcela Giraldo V.

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
Marta Bibiana Escobar P., Tecnóloga Química
Claudia Patricia Valencia V. Técnico en producción de café
Claudia Marcela Mora A.
Mario Franco A.
Sebastián Grajales H., Pasante Universitario

Fitopatología

Carlos Ariel Ángel C., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Rosa Lilia Ferrucho, Ing. Agrónoma, Ph.D.
Nancy del Carmen Arciniegas B., Ing. Agrónoma, M.Sc.
Gustavo Adolfo Marín R. Ing. Agrónomo, M.Sc.
Carlos Alberto Rivillas O., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Isabel Cristina Ramírez P., Ing. Agrónoma
Carlos Alberto Zuluaga E., Técnico en Mantenimiento de Computadores y Redes de datos
Carlos Arturo González V.
Jorge Dicksson Ocampo M.
Jaroliver Cardona G.
María Camila Grajales A., Aprendiz

Fitotecnia

Francisco Fernando Farfán V., Ing. Agrónomo, M.Sc.
José Raúl Rendón S., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Andrés Mauricio López L., Médico Veterinario y Zootecnista, M.Sc.
Rocío Espinosa A., Médico Veterinario y Zootecnista, M.Sc.
Andrés Felipe León B., Ing. Agrónomo
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.
Hernando A. Cortina G., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Julio Quiroga Cardona., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Luisa Fernanda López M., Ing. Agrónomo
Carlos Augusto Ramírez C., Administrador de Empresas Agropecuarias

Conrado Antonio Quintero D., Administrador Financiero
Carlos Augusto Vera A., Administrador Financiero
Jairo Jaramillo O., Ing. Mecatrónica
Gilbert Rodríguez Q., Técnico Profesional en Desarrollo de Producción Pecuaria
Jhon Esteban Quintero A., Técnico en Producción de Café
Hernán Díaz C.
Cruz Elena Díaz M.
Omar Villarreal
Marcela Escudero C., Pasante Universitario
Keiner Sebastián Jaramillo T., Pasante Universitario
Stefanía Marulanda R., Pasante Universitario

Poscosecha

Juan Rodrigo Sanz U., Ing. Mecánico, Ph.D.
Carlos Eugenio Oliveros T., Ing. Agrícola, Ph.D.
Nelson Rodríguez V., Ing. Químico, Ph.D.
Aída Esther Peñuela M., Ing. Alimentos, 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.
Diego Antonio Zambrano F., Ing. Químico
Ricardo José Grisales M., Tecnólogo en Electrónica
Jorge Alexander Londoño C., Técnico en Soldadura
Mario Espinosa G.
Javier Velásquez H.
Samuel Castañeda
Andrés Felipe Rincón H., Aprendiz Universitario
Camilo Andrés Morcillo S., Pasante Universitario
Juan Sebastián Rivera R., Aprendiz

Suelos

Siavosh Sadeghian K., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Hernán González O., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Luis Fernando Salazar G., Ing. Agrónomo, Ph.D.
Luz Adriana Lince S., Ing. Agrónomo, Geóloga, M.Sc.
Juan Camilo Rey S., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Vanessa Catalina Díaz P., Química, Esp.
Stephanía Rincón B., Tecnóloga Química
Sebastián García B. Tecnólogo en Gestión de Recursos Naturales
Arturo Gómez V.

EXPERIMENTACIÓN

Carlos Gonzalo Mejía M., Administrador de Empresas Agropecuarias, M.Sc.
José Farid López D., Tecnólogo en Administración Agropecuaria
Yolanda Castaño G.

Estación Experimental Naranja

Jhon Félix Trejos P., Ing. Agrónomo
Melsar Danilo Santamaría B., Ing. de Alimentos
Tito Alberto Ramírez S.

Estación Experimental La Catalina

Daniel Antonio Franco C., Agrónomo

Estación Experimental Paraguaicón

Myriam Cañón H., Ing. Agrónomo

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 Trinidad

Myriam Cañón H., Ing. Agrónomo (E)

Estación Experimental Pueblo Bello

José Enrique Baute B., Ing. Agrónomo

Estación Experimental San Antonio

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

APOYO A LA INVESTIGACIÓN

Divulgación y Transferencia

Sandra Milena Marín L., Ing. Agrónoma, 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
David Antonio Torres C., Aprendiz

Tecnología de la Información y Comunicaciones

Luis Ignacio Estrada H., Ing. Químico
Carlos Hernán Gallego Z., Ing. de Sistemas, Esp.
Alma Patricia Henao T., Lic. en Lenguas Modernas, Bibliotecóloga, 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.
José Rubiel Castrillón G., Ing. de Sistemas y Telecomunicaciones, Esp.
Audberto Quiroga M., Biólogo, Esp.
Juan Camilo Espinosa O., Ing. Topográfico, Esp.
Juan Pablo Carvajal B., Ing. Electrónico

UNIDAD ADMINISTRATIVA Y FINANCIERA

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

Gestión Contable y Tributaria

Martha Elena Vélez H., Contadora, Esp.
Daniela López O., Contadora, Esp.
Jorge Eduardo Dávila M. Contador Público, Esp.
Luis Alfredo Amaya F., Administrador Público
Lina Marcela Patiño G., Administración de Empresas

Gestión de Bienes y Servicios - Contratación

Juan David Alzate O., Economista, M.Sc.
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.
Laura Susana Barrios M., Aprendiz

Gestión de Bienes y Servicios - Mantenimiento

Paulo Alejandro Arias C., Ing. Electricista, Esp.
Cristian Andrés Chica G., 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
Mauricio Londoño V. Tecnólogo en Mantenimiento Eléctrico Industrial
José Gildardo Aguirre O., Tecnólogo en Mantenimiento Electrónico e Instrumental Industrial
Uriel López P.
Eduardo Villegas A.
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.
Alejandro Córdoba C., Aprendiz

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
Laura Daniela Ladino Q., Aprendiz Universitario

Gestión de Tesorería

Jesús Danilo González O., Contador, Esp.

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, Esp.
Josué David Espitia F., Economista

Instructivo para la elaboración de los artículos de la Revista Cenicafé

TEXTOS

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

TABLAS Y FIGURAS

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

ECUACIONES

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

SISTEMA DE UNIDADES

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

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

BIBLIOGRAFÍA

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

ESTRUCTURA DEL ARTÍCULO CIENTÍFICO

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

Título - Máximo 16 palabras

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

Resumen - Máximo 250 palabras

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

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

Abstract - Máximo 250 palabras

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

Introducción - Máximo 1.000 palabras

Debe incluir:

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

Materiales y métodos - Máximo 1.100 palabras

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

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

Resultados y discusión – Máximo 2.500 palabras

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

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

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

Agradecimientos - Máximo 70 palabras

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

Literatura citada

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

PRODUCCIÓN EDITORIAL

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