

Cenicafé

Revista del
Centro Nacional de Investigaciones de Café



Volumen 66 Número 2

Julio - Diciembre 2015



**Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia**

Ministro de Hacienda y Crédito Público

Mauricio Cárdenas Santamaría

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural

Aurelio Iragorri Valencia

Ministro de Comercio, Industria y Turismo

Cecilia Álvarez Correa

Director del Departamento Nacional de Planeación

Simón Gaviria Muñoz

COMITÉ NACIONAL

Período 1º enero/2015- diciembre 31/2018

José Fernando Montoya Ortega

José Alirio Barreto Buitrago

Eugenio Vélez Uribe

Danilo Reinaldo Vivas Ramos

Clifford Enrique Bonilla Smith

Javier Bohórquez Bohórquez

Octavio Oliveros Collazos

Edilberto Rafael Álvarez Pineda

Armando Benavides

Alfredo Yáñez Carvajal

Carlos Alberto Cardona Cardona

Alejandro Corrales Escobar

Jorge Julián Santos Orduña

Luis Javier Trujillo Buitrago

Camilo Restrepo Osorio

Gerente General

ROBERTO VÉLEZ VALLEJO

Gerente Administrativo

CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ ARBOLEDA

Gerente Financiero

JUAN CAMILO BECERRA BOTERO

Gerente Comercial

CARLOS FELIPE ROBAYO DUQUE

Gerente Técnico

HERNANDO DUQUE ORREGO

Director Investigación Científica y Tecnológica

HERNANDO DUQUE ORREGO (E)

Uso del material de esta revista:

Aquellas personas que deseen usar en otras publicaciones, ilustraciones o datos publicados en la Revista Cenicafe, 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 Cenicafe 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 Cenicafe, 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 octubre 2015
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. 66

JULIO - DICIEMBRE 2015

No. 2

CONTENIDO

ANÁLISIS TÉCNICO DEL PROCESO DE LOMBRICULTURA EN PULPA DE CAFÉ PARA LA PRODUCCIÓN DE ABONO ORGÁNICO. José Raúl Rendón Sáenz; Juan Carlos García López; Hernán González Osorio; José Javier Ramírez Patiño7

TECHNICAL ANALYSIS OF VERMICOMPOSTING PROCESS FROM COFFEE PULP TO PRODUCTION OF ORGANIC FERTILIZER7

EVALUACIÓN DE HÍBRIDOS INTERESPECÍFICOS DE *Coffea arabica* x *Coffea canephora* CON RESISTENCIA A *Hemileia vastatrix* Y *Ceratocystis colombiana*. Hernando Alfonso Cortina Guerrero; Bertha Lucía Castro Caicedo17

EVALUATION OF INTERSPECIFIC HYBRIDS OF *Coffea arabica* x *Coffea canephora* RESISTANT TO *Hemileia vastatrix* AND *Ceratocystis colombiana*17

FACTORES DE PRODUCCIÓN QUE INFLUYEN EN LA RESPUESTA DE GENOTIPOS DE *Coffea arabica* L. BAJO DIVERSAS CONDICIONES AMBIENTALES DE COLOMBIA. Juan Carlos García López; Húver Elías Posada Suárez; Fredy Antonio Salazar Villareal30

PRODUCTION FACTORS THAT INFLUENCE THE RESPONSE OF *Coffea arabica* L. GENOTYPES UNDER DIVERSE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF COLOMBIA30

LAS MOSCAS DE LAS FRUTAS DE LA ZONA CENTRAL CAFETERA DE COLOMBIA Y SU CLAVE ILUSTRADA. Marisol Giraldo Jaramillo; Pablo Benavides Machado; José Raúl Rendón Sáenz; Diego Fabián Montoya; Fernando Farfán Valencia; Jhon Félix Trejos Pinzón58

FRUIT FLIES OF THE CENTRAL COFFEE ZONE OF COLOMBIA AND ILLUSTRATED KEY58

MICRONUTRIENTES EN FRUTOS Y HOJAS DE CAFÉ. Siavosh Sadeghian Khalajabadi; Alveiro Salamanca Jiménez73

MICRONUTRIENTS IN COFFEE FRUITS AND LEAVES73

RESPUESTA DEL CAFÉ A LA APLICACIÓN DE SILICIO Y LOMBRINAZA DURANTE LA ETAPA DE ALMÁCIGO. Alveiro Salamanca Jiménez; Siavosh Sadeghian Khalajabadi88

COFFEE RESPONSE TO SILICON AND EARTHWORM MANURE APPLICATION DURING SEEDLING88

VALIDACIÓN EN EL CAMPO DE UN MÉTODO DE MUESTREO PARA EVALUAR LA CALIDAD EN LA RECOLECCIÓN DE CAFÉ. Rubén Darío Medina Rivera; Esther Cecilia Montoya Restrepo; Hernando García Osorio110

FIELD VALIDATION OF A SAMPLING METHOD TO EVALUATE HARVESTING QUALITY110

COMITÉ EDITORIAL

Pablo Benavides M.	Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé
Juan Rodrigo Sanz U.	Ph.D. Ing. Mecánico. Ingeniería Agrícola, Cenicafé
Carmenza E. Góngora B.	Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé
José Ricardo Acuña S.	Ph.D. Microbiólogo. Mejoramiento Genético, Cenicafé
Siavosh Sadeghian K.	Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé
Sandra Milena Marín L.	M.Sc. Ing. Agrónomo. Divulgación y Transferencia, Cenicafé

EDITORES ESPECIALIZADOS DE LA REVISTA 66 (1)

Carmenza Góngora B.	Ph.D. Cenicafé, FNC
Ricardo Acuña S.	Ph.D. Cenicafé, FNC
Zulma N. Gil P.	Ph.D. Cenicafé, FNC
José Ricardo Acuña Z.	Ph.D. Cenicafé, FNC
Luis Miguel Constantino C.	M.Sc. Cenicafé, FNC

Revisores Revista Cenicafé Volumen 66 No 1 y No 2

Carlos E. Oliveros T.	Ph.D. Cenicafé, Federación Nacional de Cafeteros (FNC)
Juan Rodrigo Sanz U.	Ph.D. Cenicafé, FNC
Claudia Patricia Flórez R.	Ph.D. Cenicafé, FNC
Nelson Rodríguez V.	Ph.D. Cenicafé, FNC
María del Pilar Moncada B.	Ph.D. Cenicafé, FNC
Hernán González O.	Candidato Ph.D. Cenicafé, FNC
Luis Fernando Salazar G.	Candidato Ph.D. Cenicafé, FNC
Luis Miguel Constantino C.	M.Sc. Cenicafé, FNC
Juan Carlos López N.	Microbiólogo, Cenicafé, FNC
Aníbal Arcila M.	Ingeniero Agrónomo, Cenicafé, FNC
Raúl Zapata.	Ph.D., Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
Martha Cecilia Henao T.	Ph.D., Universidad Nacional de Colombia
María Teresa Dávila A.	Ph.D., Universidad Nacional de Colombia sede Manizales
Andrés Felipe Rojas G.	Ph.D., Universidad Nacional de Colombia sede Manizales
Darío Antonio Castañeda.	Ph.D., Universidad Nacional de Colombia
Francisco Anzueto.	Ph.D., ANACAFÉ, Guatemala
José Álvaro Cristancho R.	Ph.D., Mejisulfatos
Luis Fernando Vallejo E.	Ph.D., Universidad de Caldas
Jesús Antonio Castillo F.	Ph.D., Universidad de Nariño
Hugo Ruiz E.	Ph.D., Universidad de Nariño
Gustavo Castro G.	M.Sc., Universidad de Puerto Rico
Víctor Hugo Ramírez B.	M.Sc., Yara
Anaité Carolina Herrera.	M.Sc., Disagro-Guatemala
Gloria M. Molina V.	M.Sc., Universidad Libre seccional Pereira.
Germán Amat G.	M.Sc., Instituto de Ciencias Naturales
Johanna Gisela Bajonero C.	M.Sc., Universidad de São Paulo
Benjamín Pineda L.	M.Sc., Cenipalma
Euclides Murcia L.	M.Sc., Universidad Católica de Pereira
César Jaramillo N.	M.Sc., Universidad Tecnológica y Pedagógica de Pereira
Alma Henao T.	Bibliotecóloga. Cenicafé, FNC
Olga Umaña C.	MA. Traducción. Lic. en Lenguas Modernas

ANÁLISIS TÉCNICO DEL PROCESO DE LOMBRICULTURA EN PULPA DE CAFÉ PARA LA PRODUCCIÓN DE ABONO ORGÁNICO

José Raúl Rendón Sáenz*; Juan Carlos García López*;
Hernán González Osorio***; José Javier Ramírez Patiño**

RENDÓN S., J.R.; GARCÍA L., J.C.; GONZÁLEZ O., H.; RAMÍREZ P., J.J. Análisis técnico del proceso de lombricultura en pulpa de café, para la producción de abono orgánico. Revista Cenicafé 66 (2): 7-16. 2015

El lombricultivo con pulpa de café comprende etapas de biotransformación que conducen a conformar un material que puede ser usado como fuente fertilizante. Con el fin de analizar aspectos técnicos y económicos en el proceso, se evaluó la técnica de manejo del lombricultivo asociada al análisis de tiempos y movimientos en la Estación Experimental Naranjal (Cenicafé), durante dos ciclos. El proceso consistió en disponer la pulpa de café con la lombriz sobre la superficie del suelo, en una estructura techada y con movimientos periódicos del material. Para el análisis de los indicadores técnicos se evaluó la humedad, el nivel de CO₂ y el tamaño de partículas del sustrato en las diferentes etapas; los indicadores económicos se obtuvieron a partir del análisis de las labores y materiales utilizados. Al final del proceso el promedio de lombriabono obtenido fue de 128 kg.m⁻² con un 70% de humedad, la relación de biotransformación de pulpa a lombriabono fue del 41,6%, mientras que la actividad biológica, medida en unidades de CO₂ por kilogramo de sustrato, fue de 2,0 g. El 43% de la fracción fina del material presentó un diámetro de partículas inferior a 2 mm, indicador que podría constituir una herramienta de campo para definir el momento de cosecha del material. Con relación al aspecto económico, los costos por kilogramo de lombriabono fueron de \$82,7 en promedio. A través de la técnica de lombricultivo descrita se garantiza un proceso de biotransformación por ciclos de 6 meses.

Palabras clave: Pulpa de café, lombricultivo, biotransformación, *Eisenia foetida*.

TECHNICAL ANALYSIS OF VERMICOMPOSTING PROCESS FROM COFFEE PULP TO PRODUCTION OF ORGANIC FERTILIZER

Vermicomposting with coffee pulp comprises biotransformation stages that lead to form material that can be used as fertilizer. In order to analyze technical and economic aspects in the process, the vermicomposting management technique associated with time and motion analysis were evaluated at the Experimental Station Naranjal (Cenicafé) during two cycles. The process consisted of placing coffee pulp with earthworms on the soil surface in a roofed structure and with periodic movements of the material. For the analysis of the technical indicators, moisture, CO₂ level and the particles size of the substrate at different stages were evaluated; the economic indicators were obtained from the analysis of the work and materials used. After the process, the average earthworm fertilizer pulp obtained was 128 kg.m⁻² with 70% humidity, the relationship of biotransformation from pulp to earthworm fertilizer was 41.6%, while the biological activity, measured in units of CO₂ per kilogram of substrate, was 2.0 g. Forty-three percent of the fine fraction of the material had particles less than 2 mm in diameter, this indicator might provide a tool to define the harvest moment of the material. Regarding the economic aspect, the costs per kilogram of were \$ 82.7 on average. The earthworm fertilizer technique guarantees a biotransformation process per cycles of 6 months.

Keywords: Coffee pulp, vermicomposting, biotransformation, *Eisenia foetida*.

*Asistente de Investigación e Investigador Científico II, respectivamente, Disciplina de Fitotecnia, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas Colombia.

**Auxiliar de Investigación, Disciplina de Experimentación, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas Colombia.

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

En la totalidad de procesos involucrados en la producción de café, sólo una pequeña porción de la biomasa que se genera (alrededor del 5%) se aprovecha en la elaboración de la bebida (16). Una parte, que representa entre 4 y 11 t.ha-año⁻¹ según el sistema de producción, está conformada por hojas, ramas (5) y otras estructuras de naturaleza química similar, que al ingresar al suelo pasan a constituir una fuente de energía y de nutrimentos para los organismos del suelo y para las raíces del cultivo, o después de un proceso de mineralización, a conformar un material denominado humus (12).

Los frutos removidos del lote durante la cosecha, una vez beneficiados, generan el exocarpio o pulpa, que en estado fresco representa aproximadamente el 44% del peso total de los mismos (13), la cual por su misma naturaleza física y química puede ser aprovechada para diversos propósitos industriales como la generación de etanol (17), complemento alimenticio (11) y como fuente fertilizante (18, 19). Para este propósito, es indispensable someter dicho material a una transformación denominada compostaje, la cual puede alcanzarse con diferentes tecnologías como la descomposición en fosas (21), la digestión anaeróbica (3) y la lombricultura (7). Bajo cualquiera de estas modalidades ocurre una descomposición estrictamente biológica, que en sus estados iniciales ocasiona un significativo aumento de la temperatura y una posterior disipación del calor (8), así como liberación de agua y solutos (15). Luego de este proceso, según las condiciones de manejo y ambiente específicos, en diferentes períodos de tiempo, logra consolidarse un insumo enriquecido química y biológicamente (1, 4), que carece de similitud con el material inicial, y por su apariencia terrosa se estima ha madurado (estabilizado) lo suficiente para ser considerado una opción para sustituir total o parcialmente

la fertilización química en el café (2, 22) y mejorar algunas características del suelo (20).

A pesar de lo anterior, el enfriamiento y la inspección visual suelen ser criterios de decisión insuficientes para definir una total descomposición o estabilización del material, debido a que su empleo como sustrato en las plantas de almácigos por ejemplo, conduce a la manifestación de síntomas de fitotoxicidad, representados en quemazón de los tejidos y defoliación (6), los cuales pueden asociarse con altos niveles del pH como consecuencia de la producción de amoníaco derivado de la intensa actividad microbiana, en condiciones de aireación o altas concentraciones de humedad, que conllevan a la anegación del sustrato y la subsiguiente muerte de microorganismos y raíces por falta de oxígeno (8).

Si bien, no existe un criterio universal para definir el punto a partir del cual el material resultante de este proceso puede considerarse un producto estable química, física y biológicamente como para ser utilizado en la producción de cultivos o la recuperación del suelo, sin que genere contaminación del aire o las fuentes de agua (24), las técnicas que se utilizan habitualmente para definir este momento incluyen observaciones de laboratorio, que en muchos casos por tratarse de un material complejo y heterogéneo son de alto costo y sus resultados no son contundentes (9).

Es preciso considerar que el proceso de obtención de lombricomposteo a partir de la pulpa de café no ha sido caracterizado en función de los tiempos y movimientos que se generan en cada actividad. El objetivo de esta investigación fue analizar los aspectos técnico-económicos asociados a la técnica de lombricultivo para la producción de abono orgánico con pulpa de café, suministrada sobre la superficie del suelo, bajo techo y

sin divisiones de mampostería. Los resultados que se presentan servirán como guía para identificar los principales criterios de manejo y la proyección de la capacidad de producción de lombricompuesto en las fincas cafeteras, como una alternativa para el suministro de materia orgánica al cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Estación Experimental Naranjal (Cenicafé), ubicada en el municipio de Chinchiná (Caldas, Colombia), a 04° 58' de latitud Norte, 75° 42' de longitud Oeste, altitud de 1.400 m, con un promedio de la temperatura de 21°C, precipitación de 2.656 mm y un promedio de 80% de humedad relativa, se realizó un estudio de tipo exploratorio descriptivo sobre los tiempos y movimientos generados en el proceso de producción de abono orgánico con pulpa de café, implementando la modalidad de lombricultivo sobre la superficie del suelo, en estructura techada. Para ello, se dispuso de un área efectiva de 204 m² en la cual se instalaron seis camas de lombricultivo, con una capacidad de procesamiento de 155.000 kg de pulpa al año, obtenidos como subproducto de una producción de 360.000 kg de café cereza. El análisis se realizó en dos ciclos de producción de lombricompuesto (180 días cada uno), entre mayo de 2009 y junio de 2010.

Descripción del proceso

Material de partida. La pulpa de café que se utilizó estuvo almacenada bajo techo alrededor de 3 meses antes de iniciar el proceso de lombricultivo, hasta reunir la cantidad requerida para completar la capacidad de la estructura y establecer el manejo por ciclos.

Obtención del pie de cría de la lombriz. A partir de un lombricultivo previamente

establecido en el sitio de estudio, se aprovechó la lombriz allí presente, depositando como trampa el equivalente a 30 kg de pulpa por metro cuadrado, para obtener el pie de cría de la lombriz *Eisenia foetida*.

Cargue del material. Por cada metro cuadrado se ubicó el equivalente a 300 kg de pulpa, dispuesta en franjas de 2 m y una altura de 70 cm (camas). El material se protegió con una polisombra del 65% de cubrimiento, como barrera física para controlar el acceso de aves y otros animales, como lagartijas y roedores.

Regulación de la humedad y la temperatura en las camas. La labor de la lombriz en la biotransformación del sustrato se complementó con movimientos del material de partida (volteos). Dicho procedimiento se realizó con una periodicidad de 30 a 45 días y consistió en colocar las capas inferiores del material sobre la superficie. Adicionalmente, para regular la temperatura en el sustrato, se aplicó la cantidad de agua necesaria para humedecer los primeros centímetros del material sin generar lixiviados, esta actividad se realizó cada 3 días, durante el primer mes, y una vez cada 15 días en el periodo restante.

Cosecha. Consistió en separar la lombriz del material procesado, depositando trampas con pulpa fresca en las orillas de cada cama. Después de 20 días, el material se recogió del piso, se empacó y se pesó.

Para la caracterización de las labores e indicadores asociados al proceso de lombricultivo, se seleccionaron variables de tipo técnico y económico.

Variables de tipo técnico

Se registró la altura (cm) del material en cada cama, midiendo al azar tres puntos

centrales de la pila al comienzo y al final del proceso; se determinó la masa de lombrices (g.m^{-2}), efectuando un muestreo mensual en un área de 25 x 25 cm, tomada en tres puntos equidistantes de cada cama. A partir de la instalación hasta después de 6 meses de iniciar el proceso, mensualmente se midió la actividad microbiológica en función de la cantidad de CO_2 emitida por kilogramo de material y el porcentaje de humedad del sustrato. La humedad se determinó por el método de estufa (65°C hasta peso constante); a partir de dicho procedimiento se tomaron 20 g en base seca, para medir el nivel de CO_2 se empleó el método de respirometría, el cual consiste en capturar el CO_2 emitido por la muestra en una solución con NaOH 1N.

Con tres muestras tomadas en intervalos de 30 días, desde los 2 hasta los 6 meses después de iniciar el proceso, se evaluó la granulometría del sustrato, expresada en porcentaje (%); ésta se determinó a partir de la agitación de 100 g del sustrato en un tamiz No. 10 (2 mm de diámetro), durante 30 segundos.

Finalmente, se registró el peso del lombricompuesto (kg), obtenido por metro cuadrado (m^2) y el porcentaje de pulpa transformada en lombricompuesto.

Variables de tipo económico

Se registró el costo de los materiales y de la mano de obra por metro cuadrado (m^2) de lombricultivo teniendo en cuenta la depreciación y la vida útil de la estructura techada. Se registró el tiempo requerido (min.) para la realización de cinco actividades básicas: cargue de pulpa, volteo del sustrato, riego, acondicionamiento de trampas y cosecha de lombriabono (empaque, pesaje y cargue). Adicionalmente, se calculó el costo de las herramientas y materiales por metro

cuadrado y el costo unitario por kilogramo de lombricompuesto en los dos ciclos.

Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se utilizaron los promedios y la variación de cada una de las variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Indicadores técnicos

La técnica de lombricultura, con el suministro de la lombriz y el proceso de cargue de pulpa en las camas una sola vez por ciclo, presentó los siguientes resultados (Tabla 1).

Con relación a la altura de la masa final, ésta se redujo entre un 75% y un 80% respecto al nivel inicial, respuesta que puede estar asociada con el proceso de descomposición del material, en el cual ocurre fragmentación de los tejidos que componen la pulpa, para conformar unidades orgánicas más pequeñas (24).

La lombriz suministrada al inicio del proceso registró un promedio de $2,16 \text{ kg.m}^{-2}$ en los dos ciclos; después de 6 meses, el lombriabono obtenido en base húmeda fluctuó entre 115 kg.m^{-2} y 142 kg.m^{-2} , con un promedio de $128,6 \text{ kg.m}^{-2}$ ($n=12$; $\text{CV}=16,3\%$). Dávila *et al.* (7), en una modalidad de lombricultivo diferente a la de este estudio, reportan una producción de $360 \text{ kg.m}^{-2}\text{-año}^{-1}$, partiendo de $5,0 \text{ kg.m}^{-2}$ de lombriz pura.

La variable conversión de pulpa a lombriabono fluctuó entre 38% y 46%, con un promedio del 42,1% ($n=12$; $\text{CV}=15,1\%$). En este sentido, Rodríguez (15) reporta rendimientos del proceso de lombricultura del 42% cuando se utiliza pulpa fresca y del 45% cuando el material se somete a ensilaje.

Tabla 1. Indicadores técnicos en el proceso de obtención de lombricompuesto.

Ítem	Límite Inferior	Límite Superior
Altura final lombrriabono (cm)	20,8	23,7
Lombriz inicial (g.m ⁻²)	1.777,9	2.541,5
Lombriz final (g.m ⁻²)	1.884,2	2.408,3
Lombrriabono por ciclo (kg.m ⁻²)	115,2	141,9
Conversión pulpa:lombrriabono	38%	46%

Límite inferior y superior del intervalo, con un nivel de confianza del 95%.

Actividad microbiológica en el sustrato (producción de CO₂)

Los resultados que se presentan en la Figura 1, muestran la tendencia en la producción de CO₂ hasta los 6 meses del proceso. Durante los primeros días la actividad registró en promedio 7,0 g.kg⁻¹, después de 30 días alcanzó niveles de 11,6 g.kg⁻¹, a los 60 días el valor fue de 8,9 g.kg⁻¹, y al finalizar el ciclo de 1,16 g.kg⁻¹ de CO₂. Tal como se describe con el modelo de regresión polinomial, con un R² = 0,78, bajo las condiciones evaluadas, la dinámica de la actividad microbiológica tendió a disminuir a partir de los 30 días de haber iniciado el proceso de lombricultivo y se caracteriza una fase de mayor actividad de la fauna en el sustrato, asociada con altos niveles de CO₂ (23).

En vista de que el análisis de producción de CO₂ puede constituirse en una herramienta para definir la magnitud de la actividad microbiológica en un sustrato, una alta concentración de este gas sugiere que para un momento específico, persisten estructuras orgánicas, que la microflora utiliza como fuente de energía y de carbono, como lo explican Farías *et al.* (8) y Zapata (24). Los mismos autores sostienen que dicha condición puede asociarse al hecho de que el aprovechamiento de compuestos orgánicos genera desprendimiento de calor, de amoniaco y de otras sustancias, que en conjunto conducen a la manifestación de síntomas de intoxicación de las plantas en las que se utiliza.

Características físicas del sustrato

Humedad. Se observó una disminución del 4,9% en promedio, durante los primeros 2 meses, respecto a la humedad inicial. Luego de 6 meses, el material perdió en promedio el 11,3% (Figura 2). La humedad final alcanzó un valor promedio del 70% (n=3; CV=1,27%), con poca variación a través del tiempo, dada la aplicación de riego frecuente para favorecer el desempeño de la lombriz. Bajo la modalidad de lombricultivo en camas, Blandón *et al.* (4) obtuvieron una humedad final del sustrato de 78% utilizando como material de partida pulpa fresca.

Tamaño de partículas. En el proceso de biotransformación con la lombricultura, los microorganismos son responsables de la degradación bioquímica de la materia orgánica, mientras que las lombrices son responsables de la fragmentación del sustrato, lo que aumenta el área de superficie expuesta a los microorganismos y genera modificaciones en las propiedades físicas del material (10).

Con relación a estas propiedades se observó que el lombrriabono cumplió con características de color oscuro, apariencia al tacto suelto y sin formación de aglomerados (masas o terrones) e insolubles (que no se desintegran); al tiempo que un 43% del material pasó sin presión por el tamiz seleccionado (Figura 3). Sobre este aspecto, Orozco *et al.* (14), concluyen que la granulometría del material puede considerarse

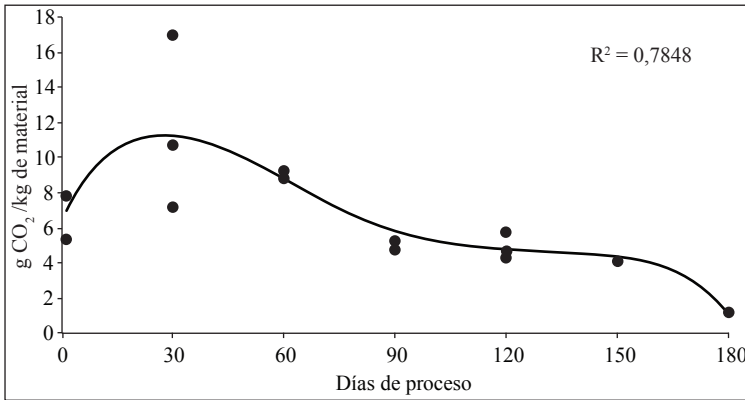


Figura 1. Producción de CO₂ durante el proceso de lombricultivo.

como un indicador de descomposición de pulpa de café, lo cual sugiere que esta propiedad puede constituirse en una herramienta de campo, para que el caficultor identifique el momento de cosecha del abono orgánico obtenido por la modalidad descrita en el estudio.

Indicadores económicos

El análisis de los indicadores económicos se fundamentó en los costos de la mano de obra y los materiales, a valores de 2014. Para la mano de obra se incluyeron las prestaciones de ley sobre el salario mensual mínimo legal vigente. La Tabla 2 lista los materiales y la mano de obra requerida en

la construcción de una caseta de 280 m²; para la estructura techada se consideró una depreciación de 4 años, de acuerdo con la vida útil de otras estructuras similares que se tuvieron en el sitio de estudio. A partir de las consideraciones anteriores se calculó un costo por metro cuadrado efectivo de lombricultivo de \$1.879 por ciclo, en promedio.

Al realizar el estudio de tiempos y movimientos en el proceso, se obtuvieron los costos de manejo por kilogramo de lombriabono (Tabla 3). La cosecha, la cual incluye pesaje, empaque y cargue, fue la más costosa, con un valor unitario de \$21,5 por kilogramo de lombriabono en promedio. El

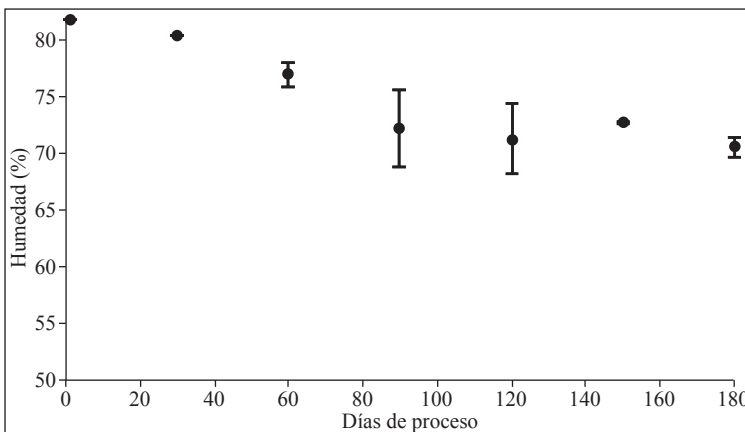


Figura 2. Contenido de humedad durante el proceso de lombricultivo (Las barras indican el intervalo de confianza $p < 0,05$).

Tabla 2. Costos asumidos en la construcción de la caseta para lombricultivo (280 m²).

Labores	Unidades	Cantidad	Valor Unitario	Subtotal	Depreciación (Cosechas de lombricultivo)	Costo por m ² de lombricultivo
Construcción de la caseta	Jornal	30,3	\$ 35.045	\$ 1.060.812	8	\$ 526
Manejo guadua, corte y cargue	Jornal	6,1	\$ 35.045	\$ 214.125	8	\$ 106
Techado	Jornal	2,0	\$ 35.045	\$ 70.090	8	\$ 35
Subtotal mano de obra		38,38	-	\$ 1.345.027	8	\$ 667
Materiales						
Esterilla (guadua) 5 m	un	36	-	-	-	-
Várrillones (guadua) 5 m	un	54	-	-	-	-
Horcones (guadua) 1,3 m	un	36	-	-	-	-
Columnas (guadua) 2,5 m	un	90	-	-	-	-
Diagonal (guadua) 3 m	un	18	-	-	-	-
Viga (guadua) 5,2 m	un	18	-	-	-	-
Viga (guadua) 6 m	un	9	-	-	-	-
Diagonal (guadua) 3,25 m	un	18	-	-	-	-
Trozos (guadua) 0,5 m	un	18	-	-	-	-
Trozos (guadua) 0,75 m	un	9	-	-	-	-
Amarras	un	930	\$ 150	\$ 139.500	8	\$ 69
Puntilla 4"	kg	5	\$ 3.650	\$ 18.250	8	\$ 9
Puntilla 1,5", 2", 2,5", 3"	lb	8	\$ 1.900	\$ 15.200	8	\$ 8
Teja de cinc 2,45 m x 0,8 m	un	155	\$ 14.650	\$ 2.270.750	8	\$ 1.126
Subtotal materiales	-	-	-	\$ 2.443.700	8	\$ 1.212
Total	-	-	-	\$ 3.788.727	8	\$ 1.879

* La guadua fue un recurso disponible en la finca (no se asumió el costo del material).

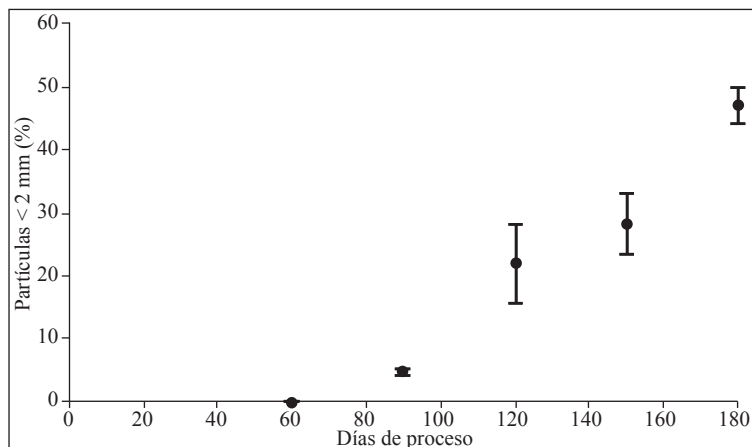


Figura 3. Cambios en el tamaño de las partículas durante el proceso de lombricultivo (Las barras indican el intervalo de confianza $p < 0,05$).

valor total por kilogramo obtenido de este insumo, incluyendo materiales, herramientas y mano de obra, fue de \$82,7 en promedio.

Con los resultados del presente estudio se ofrece al caficultor una alternativa de manejo del lombricultivo sobre la superficie del suelo, en estructura techada y con volteos periódicos. A diferencia de los lombricultivos establecidos por capas ascendentes y con

varios momentos de cargue de la pulpa; el proceso descrito permitió implementar un sólo momento de cargue y la labor de volteo del material para complementar la función de las lombrices.

Por su parte, los costos que representan el manejo de la pulpa con la lombricultura significan un ahorro en la medida que se aprovecha un subproducto del cultivo como

Tabla 3. Indicadores económicos del lombricultivo.

Actividad	Unidad	Unidades por metro cuadrado de lombricultivo				Valor del lombriabono Promedio por kg
		Ciclo 1		Ciclo 2		
		Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	
Cargue pulpa	min.	30,5	14,1	31,5	6,25	\$ 15,0
Volteo pulpa	min.	23,7	32,6	43,7	22,2	\$ 16,5
Riego	min.	19,6	-	26,6	-	\$ 11,2
Trampeo para cosecha	min.	6,9	28,6	2,0	13,2	\$ 2,1
Empaque, pesaje y cargue lombriabono	min.	33,4	27,1	54,6	36,8	\$ 21,5
Materiales construcción caseta	\$	1.212,0	-	1.212,0	-	\$ 5,5
Mano de obra construcción caseta	\$	667,2	-	667,2	-	\$ 5,3
Herramientas y materiales	\$	707,2	-	707,2	-	\$ 5,6
Lombriabono	kg	137,2		120,0		\$ 82,7

fuelle de materia orgánica, para la elaboración de almácigos de café, la cual aporta una cuarta parte del sustrato necesario, además que se evita la contaminación de fuentes de agua, suelo y atmósfera.

En general, se concluye que el material procesado a través de la técnica de lombricultivo, garantiza un proceso de biotransformación por ciclos y permite estandarizar los criterios de manejo para obtener un abono orgánico de alta calidad. En la medida en que pueda proporcionarse la cantidad de lombriz recomendada por metro cuadrado el proceso será más eficiente en la obtención del lombrriabono.

LITERATURA CITADA

1. ARANGOB., L.G.; DÁVILAA., M.T. Descomposición de la pulpa de café por medio de la lombriz roja californiana. Manizales : Cenicafé, 1991. 4 p. (Avances Técnicos No. 161).
2. ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.F. Consideraciones sobre la nutrición mineral y orgánica en la producción de la finca. p. 201-232. En: ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.F.; MORENO B., A.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. Sistemas de producción de café en Colombia. Manizales : Cenicafé, 2007. 309 p.
3. BEDOYA M., H.J.; SALAZAR A., J.N. Los lodos de la digestión anaeróbica de la pulpa del fruto del cafeto como abono para almácigos. Cenicafé 36(4):112-124. 1985.
4. BLANDÓN C., G.; DÁVILAA., M.T.; RODRÍGUEZ V., N. Caracterización microbiológica y fisicoquímica de la pulpa de café sola y con mucilago, en proceso de lombricompostaje. Cenicafé 50(1):5-23. 1999.
5. CARDONA C., D.A.; SADEGHIAN K., S. Aporte de material orgánico y nutrientes en cafetales al sol y bajo sombrío de guamo. Manizales : Cenicafé, 2005. 8 p. (Avances Técnicos No. 334).
6. CASTRO T., A.M.; RIVILLASO., C.A. Controladores biológicos, control biológico de *Meloidogyne* spp. disciplina fitopatología: Informe anual de actividades. Manizales : Cenicafé, 2010. 56 p.
7. DÁVILAA., M.T.; RAMÍREZ G., C.A. Lombricultura en pulpa de café. Manizales : Cenicafé, 1996. 11 p. (Avances Técnicos No. 225).
8. FARÍAS C., D.M.; BALLESTEROS G., M.I.; BENDECK, M. Variación de parámetros fisicoquímicos durante el proceso de compostaje. Revista colombiana de química 28:75-86. 1999.
9. FARÍAS C., D.M.; BALLESTEROS G., M.I.; BENDECK, M. Variación de diferentes parámetros de humificación durante dos tipos de compostaje con residuos lignocelulósicos de rosas. Revista colombiana de química 29:39-52. 2000.
10. FORNES, F.; HERNÁNDEZ D., D.; GARCÍA DE LA F., R.; ABAD, M.; BELDA R., M. Composting versus vermicomposting: A comparative study of organic matter evolution through straight and combined processes. Bioresource technology 118:296-305. 2012.
11. FRANCO A., C.; GALLO C., A.; LÓPEZA., R. Efecto de la pulpa de café en el aumento de peso de los cerdos. Cenicafé 24(2):33-46. 1973.
12. GONZÁLEZ O., H. El humus en la zona cafetera colombiana: Contenido calidad y su relación con algunas propiedades físicas y químicas del suelo. p. 11-32. En: SCCS. Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola. Armenia : SCCS : Cenicafé, 2009. 136 p.
13. MONTILLA P., J.; ARCILA P., J.; ARISTIZÁBAL L., M.; MONTOYA R., E.C.; PUERTA Q., G.I.; OLIVEROS T., C.E.; CADENAG., G. Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. Manizales : Cenicafé, 2008. 8 p. (Avances Técnicos No. 370).
14. OROZCO F., H.; CEGARRA, F.; TRUJILLO L., M.; ROIG, A. Vermicomposting of coffee pulp using the earthworm *Eisenia foetida*: Effects on C and N contents and availability of nutrients. *Biology and fertility of soils* 22:162-166. 1996.
15. RODRÍGUEZ V., N. Ensilaje de pulpa de café. Manizales : Cenicafé, 2003. 8 p. (Avances Técnicos No. 313).
16. RODRÍGUEZ V., N. Producción de biocombustibles a partir de los subproductos del Café: IV simposio de química aplicada los biocombustibles. Armenia : SIQUIA, 2009.
17. RODRÍGUEZ V., N.; ZAMBRANO F., D.A. Los subproductos del café: Fuente de energía renovable.

- Manizales : Cenicafé, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 393).
18. SADEGHIAN K., S. La materia orgánica: Componente esencial en agroecosistemas cafeteros de Colombia. En: SCCS. Materia orgánica, biología del suelo y productividad agrícola. Armenia : SCCS : Cenicafé, 2009. 136 p.
 19. SALAZAR A., J.N. La pulpa de café transformada por la lombriz es un buen abono para almácigos de café. Manizales : Cenicafé, 1992. 2 p. (Avances Técnicos No. 178).
 20. SUÁREZ V., S. La materia orgánica en la nutrición del café y el mejoramiento de los suelos de la zona cafetera. Manizales : Cenicafé, 2001. 8 p. (Avances Técnicos No. 283).
 21. URIBE H., A. Fosas para pulpa de café. Manizales : Cenicafé, 1977. 4 p. (Avances Técnicos No. 68).
 22. URIBE H., A.; SALAZAR A., J.N. Influencia de la pulpa del café en la producción del café. Cenicafé 34(2):44-58. 1983.
 23. WILLIAM P., C.; MICHAEL, T.; ROWAN, C. Evaluation by respirometry of the loading capacity of a high rate vermicompost bed for treating sewage sludge. Bioresource technology 98(13):2611-2618. 2007
 24. ZAPATA H., R.D. El compostaje y los índices para evaluar su estabilidad. p. 33-42. En: SCCS. Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola. Armenia : SCCS : Cenicafé, 2009. 136 p.

EVALUACIÓN DE HÍBRIDOS INTERESPECÍFICOS DE *Coffea arabica* x *Coffea canephora* CON RESISTENCIA A *Hemileia vastatrix* y *Ceratocystis colombiana*

Hernando Alfonso Cortina Guerrero*; Bertha Lucía Castro Caicedo*

CORTINA G., H.A.; CASTRO C., B.L. Evaluación de híbridos interespecíficos de *Coffea arabica* x *Coffea canephora* con resistencia a *Hemileia vastatrix* y *Ceratocystis colombiana*. *Revista Cenicafé* 66 (2): 17-29. 2015

La presente investigación se realizó con el objetivo de desarrollar genotipos de café que combinen la resistencia a dos enfermedades importantes de este cultivo en Colombia: la roya anaranjada causada por el hongo *Hemileia vastatrix* y la llaga macana o cáncer del tronco ocasionado por el complejo *Ceratocystis* spp. Se sembraron 16 progenies F₂ y F₃ de la hibridación entre *Coffea arabica* var. Caturra con accesiones de *C. canephora*, retrocruzadas con Caturra. Como testigo susceptible a roya se incluyó la variedad Caturra y como testigo resistente la var. Colombia; ambos testigos son susceptibles a *Ceratocystis* spp. Se estableció un experimento en la Estación Experimental Naranjal (Chinchiná, Caldas) de Cenicafé, bajo un diseño en látice (5 x 5) con dos repeticiones, siendo la unidad experimental el surco de diez plantas. Se evaluó la infección por roya durante 5 años consecutivos, utilizando la escala de Eskes y Braghini, que va de 0 a 9. Para evaluar llaga macana, se inoculó el tallo de las plantas con un aislamiento del hongo *Ceratocystis colombiana* (CMW34925). Un año después de la inoculación se midió el grado de anillamiento o avance del patógeno en el tallo y la formación de tejidos de resistencia. También se midieron características agronómicas y la calidad de grano de las progenies. Ocho progenies fueron resistentes a los dos patógenos, pero sólo dos tenían buenas características agronómicas y de calidad de grano, considerándose promisorias para su uso comercial.

Palabras clave: Mejoramiento genético, café, especies, *Ceratocystis fimbriata* s.l., enfermedades.

EVALUATION OF INTERSPECIFIC HYBRIDS OF *Coffea arabica* x *Coffea canephora* RESISTANT TO *Hemileia vastatrix* AND *Ceratocystis colombiana*

This research was conducted to develop coffee genotypes that combine resistance to two important diseases of this crop in Colombia: leaf rust caused by the fungus *Hemileia vastatrix* and stem canker caused by the complex *Ceratocystis* spp. Sixteen F₂ and F₃ progenies derived from the hybridization between *Coffea arabica* var. Caturra with accessions of *C. canephora* backcrossed with Caturra were planted. Caturra variety was included as control susceptible to rust and Colombia variety as resistant control; both controls are susceptible to *Ceratocystis* spp. An experiment under a lattice design (5 x 5) with two repetitions was established at the Experimental Station Naranjal (Chinchiná, Caldas) Cenicafé, the experimental unit was ten plants. Rust infection was assessed for 5 consecutive years, using the Eskes and Braghini scale that ranges from 0-9. In order to evaluate stem canker, the stem of the plant was inoculated with an isolate of the fungus *Colombian Ceratocystis* (CMW34925). One year after the inoculation, the degree of banding or advance of the pathogen in the stem and formation of resistance tissue was measured. Agronomic characteristics and grain quality of the progeny were also measured. Eight progenies were resistant to the two pathogens, but only two showed good agronomic characteristics and grain quality, which made them promising for commercial use.

Keywords: Genetic improvement, coffee, species, *Ceratocystis fimbriata* sl, diseases.

*Investigador Científico II, Disciplina de Mejoramiento Genético y Disciplina de Fitopatología, respectivamente. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

La roya, ocasionada por el hongo *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome, es la enfermedad del café más importante, debido a la reducción en la productividad, especialmente en las variedades de la especie *Coffea arabica* L. Aunado a ello, están los altos costos en el manejo de la enfermedad, los cuales incluyen principalmente el uso de fungicidas de síntesis química (40, 46). Entre las estrategias seguidas por los investigadores en la búsqueda de resistencia genética a esta enfermedad está el uso del Híbrido de Timor (HDT), resultante de la hibridación natural entre *C. arabica* y *C. canephora* Pierre: Froehner. Por más de 50 años este híbrido ha sido la principal fuente para el desarrollo de variedades resistentes al patógeno en varios países cafeteros (41). A partir del HDT/1343, en Colombia se han desarrollado las variedades Colombia (10), Tabi (34) y la Variedad Castillo® (4). Actualmente, estas variedades están establecidas en cerca del 60% del área cafetera Colombiana, mientras el área restante está plantada con las variedades susceptibles Típica y Caturra (24).

A pesar del éxito de las variedades resistentes a la roya obtenidas a partir del HDT, en años recientes se ha observado la pérdida paulatina de la resistencia en algunos países cafeteros (1, 46, 48). Dicha pérdida de resistencia es atribuida por algunos autores (46, 48) a la variabilidad del patógeno y al tiempo de permanencia del cultivo. Surge entonces la alternativa de recurrir directamente a cruces con la especie *C. canephora* o a otras especies diploides como *Coffea liberica* Hiern. Muchas accesiones de estas especies han mostrado resistencia a la roya, siendo promisorias en cuanto a la diversidad genética, de gran utilidad para incrementar la duración de resistencia a este patógeno (19, 32).

La estrategia de incorporar genes de resistencia a la roya al tetraploide *C. arabica*,

a partir de especies diploides, ha sido sugerida por varios investigadores (26, 28, 32, 39, 46). Con base en los trabajos pioneros de Orozco (36), la Disciplina de Mejoramiento Genético de Cenicafé ha desarrollado genotipos promisorios a partir de *C. canephora*. La mayoría de dichos trabajos han estado encaminados al mejoramiento de características agronómicas, pero también en la resistencia a la roya u otros problemas fitosanitarios que aquejan al cultivo de café en Colombia (2, 3, 38).

Además de la roya del café, en Colombia existen otras enfermedades causadas por patógenos, que ocasionan reducción preocupante en la productividad de las plantas. Tal es el caso de la llaga macana o cáncer del tronco, ocasionada por especies del hongo *Ceratocystis*: *Ceratocystis colombiana* Van Wyk & Wingf. y *C. papillata* Van Wyk & Wingf. (47). Todas las variedades de café cultivadas en Colombia son susceptibles a estos patógenos, los cuales penetran en el sistema vascular de las plantas por medio de heridas frescas en el tallo o raíz. Las lesiones se desarrollan en plantas de cualquier edad, anillan el tallo disminuyendo la población de plantas productivas y generando pérdidas importantes (12).

Entre las medidas de manejo preventivo de llaga macana, el control químico aplicado especialmente durante la renovación por zoca ha sido la principal recomendación (11, 15). Sin embargo, la resistencia genética es la estrategia más deseable. Fernández (25) menciona por primera vez la resistencia en una línea de *C. arabica* var. Borbón. Con base en esta fuente, Castro y Cortina (13) desarrollaron genotipos comerciales resistentes a llaga macana, pero susceptibles a la roya. Dicha resistencia se caracteriza por el desarrollo inicial de lesiones en el tallo y la formación posterior de tejidos

lignificados o de cicatrización alrededor de la lesión, lo cual impide el anillamiento y la muerte de la planta (13, 25). De otra parte, la inmunidad a llaga macana es mencionada por algunos autores en las especies *C. canephora* y *C. liberica* (18, 27). Cortina y Castro (14), corroboraron dicha resistencia en varias accesiones de estas dos especies diploides ante la inoculación de *C. colombiana* y *C. papillata*. En Cenicafé (16) se han desarrollado genotipos con resistencia simultánea tanto a roya como a llaga macana a partir del cruzamiento *C. arabica* var. Caturra \times *C. canephora*.

Con base en la resistencia genética, tanto a roya como a llaga macana, observada en accesiones de las especies diploides de café, el objetivo del estudio fue evaluar la resistencia a estos dos patógenos en una población de progenies (F_2RC_1 y F_3RC_1) derivadas de la hibridación entre *C. canephora* y *C. arabica* cv. Caturra. Adicionalmente se incluyeron evaluaciones de las características agronómicas y de calidad del grano con el fin de obtener genotipos aceptables comercialmente por los caficultores de Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Genotipos evaluados

A partir del cruzamiento entre *C. arabica* cv. Caturra (Ca) con accesiones de *C. canephora* (Can), retrocruzadas (RC) con Caturra, en el presente estudio se incluyeron cuatro progenies F_2 (F_2RC_1), y 12 progenies F_3 (F_3RC_1), (Tabla 1). Los progenitores Ca y Can se seleccionaron de la Colección Colombiana de Café, en Cenicafé (Manizales, Colombia). Los dos grupos de progenies habían sido seleccionados por su resistencia a roya en anteriores generaciones (datos no publicados). Como testigos se incluyeron la variedad Caturra (susceptible a roya y

a llaga macana) y la variedad Colombia (resistente a roya, pero susceptible a llaga macana). Con estos materiales, durante el año 1998, se estableció un experimento en la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé, ubicada en el municipio de Chinchiná, Caldas (N 04°58'; O 75°39'), a 1.381 m, con un promedio de precipitación anual de 2.556 mm, 1.816 horas de brillo solar al año y promedios de humedad relativa de 78% y temperatura de 20,8°C (16). Las plantas de cada progenies de sembraron en un diseño en látice cuadrado (5x5), con dos repeticiones por progenie. La unidad experimental fue el surco de diez plantas, sembradas a distancia de 1,0 x 1,0 m entre plantas y 2,5 m entre surcos.

Evaluación de resistencia a roya

La incidencia de *H. vastatrix* se evaluó durante los años de 2000 a 2005, durante los picos de epidemia definida para la región, según el trabajo de Sierra *et al.* (45). Se utilizó la escala de evaluación de Eskes y Braghini (20). Esta escala visual considera toda la planta como unidad de observación, con calificación de 0 a 9, donde "0" es ausencia de lesiones esporuladas, "1" presencia de una hoja con lesiones esporuladas, "2 a 8" incremento gradual del número de hojas y ramas con lesiones esporuladas de roya, y "9" un valor de máxima incidencia. En cada evaluación se determinó el número de plantas con roya y, al final, se agruparon en tres categorías: plantas que nunca se infectaron (grado 0), plantas con bajo nivel de roya (grados 1 a 4), y plantas con alto nivel de roya (grados 5 a 9). Al final de todas las evaluaciones se consideraron los máximos valores de roya observados y la frecuencia de plantas con dichos valores, de acuerdo con el método de Alvarado y Cortina (2). Con los datos obtenidos se estableció una distribución de frecuencia para cada genotipo en cada

Tabla 1. Genealogía y códigos de las progenies incluidas en el estudio, derivadas del cruzamiento entre *Coffea arabica* var. Caturra (Ca) y accesiones de *C. canephora* (Can), retrocruzadas (RC) con Caturra (Ca).

Híbrido	Cruzamiento	Progenie/generación	
		F ₂ RC ₁	F ₃ RC ₁
4158	[Ca x Can L.147-EA.263] x Ca*	MEG 634-590	
4224	Ca x (Ca x Can BP.4-EA.224)-EE.073	MEG 623-04	
4228	Ca x (Ca x Can 1-EA.21)-EE.132	MEG 623-40	
4340	[(Ca x Can) - ED.1 a 160] x Ca*	MEG 615-17	
4241	Ca x (Ca x Can BP.358- EA.239)-ED.93	EY.012	MEG 639-727
4283	Ca x (Hybrid 4158 - EI.69)	EZ.183	MEG 636-877
4284	Ca x (Hybrid 4158 - EI.69)	EZ.189	MEG 636-816
4284	Ca x (Hybrid 4158 - EI.69)	EZ.189	MEG 636-815
4285	Ca x (Hybrid 4158 - EI.69)	EZ.251	MEG 636-946
4285	Ca x (Hybrid 4158 - EI.69)	EZ.251	MEG 636-834
4341	[(Ca x Can) - EE.1 - 200] x Ca*	FB.379	MEG 639-566
4341	[(Ca x Can) - EE.1 - 200] x Ca*	FB.379	MEG 639-884
4341	[(Ca x Can) - EE.1 - 200] x Ca*	FB.379	MEG 639-565
4341	[(Ca x Can) - EE.1 - 200] x Ca*	FB.379	MEG 639-561
4341	[(Cat x Can) - EE.1 - 200] x Ca*	FB.379	MEG 639-562
4343	[(Cat x Can) - EI.1 - 167] x Ca*	FB.1180	MEG 639-836

(*) Polinización libre.

evaluación, los resultados se expresaron en proporción (%) de plantas en cada grado. Finalmente, los datos se agruparon en las categorías de: “0”, “1 a 4” y más de “4”. Progenies con más del 70% de plantas que consistentemente estuvieron en grados 0 a 4 fueron seleccionadas como resistentes a roya.

Evaluación de resistencia a llaga macana

La evaluación de resistencia a llaga macana se realizó cuando las plantas tenían 7 años de edad. Para ello, se utilizó el aislamiento CMW34925, identificado dentro del grupo *C. colombiana*, de acuerdo con Van Wyk *et al.* (47). Para la preparación de inóculo se siguió el método descrito por Marín *et al.* (30). Se utilizaron gotas de 70 µL conteniendo 3,0 x 10⁴ ascosporas/mL, las cuales se depositaron en una herida en forma de U invertida, de 2,0 cm de diámetro, realizada en el tallo de las plantas, a la altura aproximada de

1,40 m del nivel del suelo. El inóculo se depositó debajo de la corteza, cubriendo la herida con algodón humedecido y se selló con cinta Parafilm®. Esta cámara húmeda se retiró 15 días después, comprobando visualmente la colonización del patógeno en el sitio de inoculación (25). Un año después de la inoculación se evaluó la enfermedad, midiendo en cada planta el área de la lesión característica del patógeno en el sitio de inoculación. Con el uso de un metro flexible, en cada tallo se tomaron tres medidas (en cm): circunferencia del tallo (CT), ancho de la lesión necrótica (ALN) y longitud de la lesión (LL). Así, se estimó la proporción (%) de tallo anillado (PTA) mediante la relación ALN/CT x 100. Se estimaron los promedios de PTA y LL y se sometieron a un ANAVA. En el caso de encontrar diferencias estadísticas se incluyó una Prueba de Tukey (p=0,05). El criterio utilizado para seleccionar progenies resistentes

a lliga macana fue aquel en el cual más del 80% de las plantas tuvieran una PTA menor o igual al 50% del tallo, complementado con las menores LL, en comparación con los valores de los testigos, según el criterio de Castro y Cortina (13).

Evaluación de características agronómicas y de calidad de grano

La evaluación de la altura de plantas, el diámetro de la copa y el número de pares de ramas se realizó en todas las plantas a la edad de 24 meses. Los registros de producción (kg/planta de café cereza) se calificaron desde 2001 a 2005. Los defectos de grano, tales como: vaneamiento (en café cereza), granos caracol y granos triángulo (en café pergamino seco- cps) se evaluaron durante dos picos de cosecha en los años 2001 y 2002, siguiendo los métodos de Castillo y Moreno (10). Igualmente, el tamaño de grano tipo “supremo”, definido como el porcentaje de granos de café pergamino seco retenidos en una malla de (17/64”), se evaluó durante las cosechas de 2001 y 2002, siguiendo el método de Castillo y Moreno (10). Todas las variables se sometieron a una ANAVA. Los datos de producción acumulada (kg/planta de café cereza) se transformaron a kilogramos de café pergamino seco por planta y por año, siguiendo el método de Montilla *et al.* (33). Los datos obtenidos se sometieron a una prueba de Dunnett, comparando los datos de todas las progenies con los datos de la variedad Caturra. Los análisis estadísticos se realizaron con el uso del programa SAS (Statistical Software) (42). De acuerdo con el criterio de Castillo y Moreno (10), las progenies seleccionadas como promisorias fueron aquellas cuyos promedios de características agronómicas fueron iguales o mejores que los de la variedad Caturra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de resistencia a roya

Durante los años 2000 y 2001 se observó una baja incidencia de roya con incremento en el 2002, evidente en la variedad Caturra, con 30% de incidencia en grados <4 (según escala). Durante el año 2002, 12 de las progenies evaluadas, incluyendo la variedad Colombia, mostraron 100% de plantas con incidencia en grados de 0 a 4 (datos no presentados). En el 2003, los niveles de roya fueron superiores a los del 2002, con 75% de incidencia en el testigo Caturra, en grados >4. La mayor incidencia de roya se presentó en el 2004, con 95% en Caturra, en grados de 5 a 7, contrastando con las progenies en estudio y en la variedad Colombia, que tuvieron el 100% de plantas en grados < 4. La epidemia de roya decreció en el 2005, con 75% de incidencia en Caturra, en grados >4. Así, durante los 5 años de evaluación de roya se observaron diferencias claras entre las progenies en estudio y las variedades testigo Caturra y var. Colombia (Figura 1).

Mientras en Caturra la máxima incidencia de roya alcanzó el 95% de plantas, en grados 5 a 9, 12 progenies se mantuvieron con más del 70% de plantas en grados de 0 a 4, siendo por lo tanto consideradas resistentes. Entre estas últimas sobresalen las progenies (F_3RC_1): MEG 639-562, MEG 639-836, MEG 639-884, MEG 639-565 y en ($F_2 RC_1$): MEG 623-40, como las más resistentes a roya, con 100% de plantas en grados <4. La variedad Colombia alcanzó una máxima incidencia del 85% de plantas en grados 0 a 4.

Las progenies seleccionadas con resistencia a roya mostraron niveles más altos de resistencia que las mencionadas por Prakash *et al.* (39)

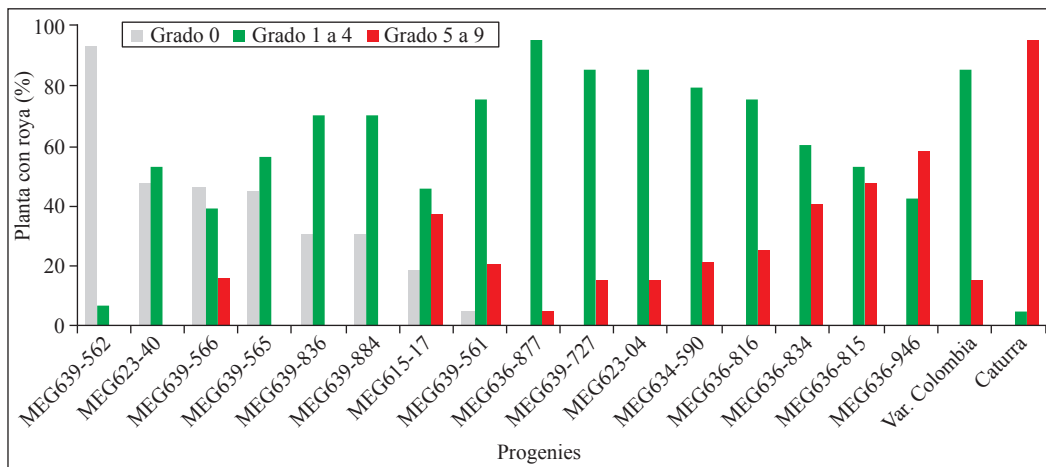


Figura 1. Distribución de frecuencia de incidencia de roya (%) en cada progenie, en 12 evaluaciones realizadas durante los años 2000 a 2005. Grados de incidencia de acuerdo a la escala de Eskes y Braghini (0 a 9). Barras en color gris claro corresponden a progenies no infectadas por roya (grado 0); barras en color verde, corresponden a progenies resistentes (grados 1 a 4). Barras en color rojo indican plantas susceptibles (grado >4).

en India, en híbridos de origen similar. De otra parte, los resultados del presente estudio sugieren que las accesiones de *C. canephora* utilizadas podrían tener diferentes combinaciones de genes de resistencia a roya (SH₅ a SH₉), comparadas con las derivadas del HDT/1343 (6), utilizadas en el desarrollo de las variedades Colombia, Tabi y la Variedad Castillo. Esta suposición ha sido confirmada por los estudios moleculares realizados por Lashermes *et al.* (28), quienes sugieren una alta diversidad genética en *C. canephora*. Además, consideran la posibilidad de que se reduzca todavía más la diversidad genética en las variedades derivadas del HDT, debido al uso de plantas provenientes de un solo híbrido interespecífico, el HDT/1343. También, confirman en su estudio de diversidad genética que otros híbridos interespecíficos de cruzamientos naturales entre *C. arabica* y *C. canephora* encontrados en Nueva Caledonia, los cuales debido a numerosos cruzamientos naturales, ofrecen la posibilidad de ser portadores de mayor diversidad de genes de resistencia a roya (29).

Los genotipos identificados con resistencia a roya en este estudio se consideran de gran valor ya que, debido a la presencia de nuevas razas de roya, existe un alto riesgo de pérdida de resistencia en las variedades comerciales derivadas del HDT, como también en las derivadas del Icatú, considerados hasta el momento como las fuentes de resistencia más importantes (8, 21, 22, 23). Existen numerosas referencias sobre la pérdida de resistencia, como es el caso de la variedad Cauvery (Catimor) (48), ‘Palma I’ (Catimor x Catuai), ‘Palma II’ (Catimor x Catuai) y ‘Sabia 398’ (Catimor x Acaí), mencionadas por Matiello *et al.* (31). Otras como ‘IPR 107’ (‘Sarchimor’ x ‘Mundo Novo IAC 376-4’) también han mostrado susceptibilidad a roya (43, 44).

Otros autores han registrado diferentes niveles de resistencia parcial como la detectada en genotipos derivados de Sarchimor y Catuai en Brasil (43). Por otra parte, en siembras comerciales de la variedad Costa Rica 95 (Caturra x Híbrido de Timor 832/1),

durante los años 2012 a 2013, en la zona cafetera Colombiana mostraron altos niveles de roya (Cenicafé- datos no publicados). Por consiguiente, los resultados de este estudio son de gran utilidad puesto que proveen de información para disponer de nuevas fuentes de resistencia a roya, con las cuales se incrementaría el grupo de genes de resistencia presentes en las variedades de café comercialmente utilizadas en nuestro país, ampliando así la combinación de genes dentro de la población de los arbustos de café plantados. A futuro, esto ayudará a prevenir el ataque de nuevas razas del patógeno en las variedades cultivadas en Colombia.

Evaluación de resistencia a llaga macana

Las progenies en estudio mostraron variabilidad en cuanto a la resistencia/susceptibilidad a llaga macana. Estas diferencias fueron evidentes en las variables PTA y LL (Figuras 2 y 3), confirmadas por la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Nueve progenies tuvieron valores de PTA significativamente menores que en

los testigos. Las progenies más susceptibles a la infección de *C. colombiana* fueron: MEG 636-815 y MEG 636-946. Mientras que los progenies resistentes fueron: MEG 639-565, MEG 634-590, MEG 623-40, MEG 639-562, MEG 639-566, MEG 615-17, MEG 639-884, MEG 639-561 y MEG 623-04. En esta última progenie, la lesión avanzó cubriendo menos de la mitad de la circunferencia perimetral del tallo, con la formación de tejidos lignificados o callo que cubrieron esta lesión. Las progenies MEG 639-565 y MEG 634-590 fueron las más resistentes, con las lesiones más pequeñas. Estas progenies sugieren tener una posible inmunidad, heredada del *C. canephora* como es mencionado por algunos autores (18, 27).

En las progenies susceptibles al igual que en los testigos no hubo formación de tejidos de resistencia y, por lo tanto, la lesión avanzó longitudinal y transversalmente anillando más del 50% de la circunferencia del tallo. A pesar que durante la evaluación final no se observó muerte de plantas, aquellas con

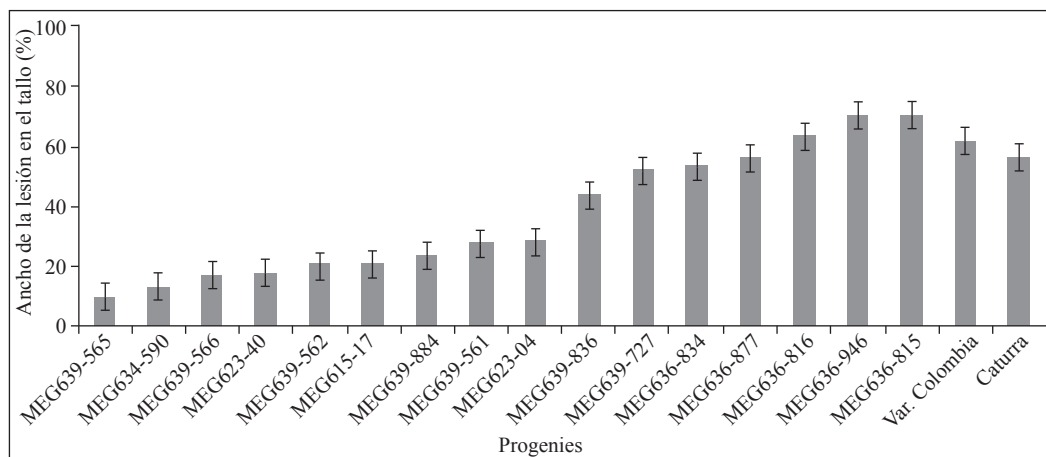


Figura 2. Respuesta de resistencia/susceptibilidad en las progenies evaluadas. Proporción del tallo afectado (PTA) por la lesión. Un año después de la inoculación con *Ceratocystis colombiana*, aislamiento CMW34925. Las barras, representan el error estándar ($F = 0,05$).

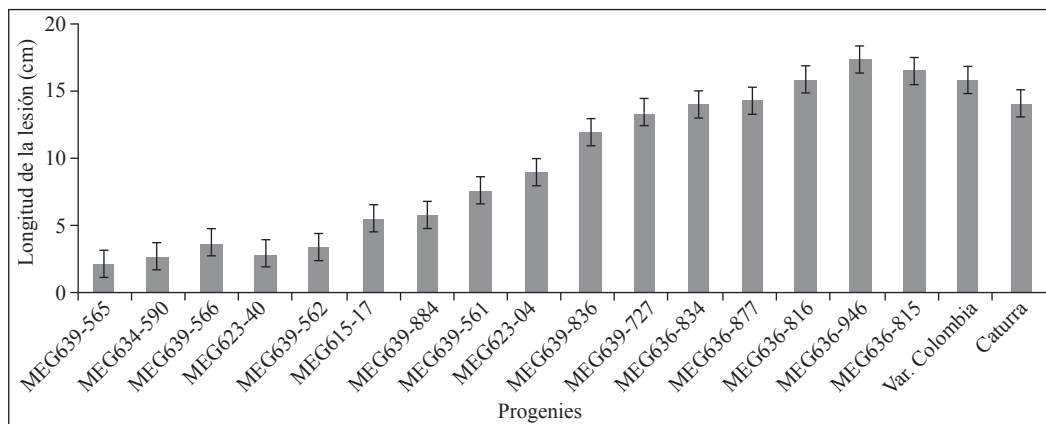


Figura 3. Respuesta de resistencia/susceptibilidad en las progenies evaluadas. Longitud de la lesión (LL), en cm. Un año después de la inoculación con *Ceratocystis colombiana*, aislamiento CMW34925. Las barras, representan el error estándar (F=0,05).

avance de la lesión en más del 50% de la circunferencia del tallo, serían anilladas completamente en un mayor período de tiempo, como lo observaron Castro y Cortina (13).

Evaluación de características agronómicas y de calidad del grano

En la Tabla 2 se presentan las características agronómicas de los genotipos estudiados. Se observaron diferencias estadísticas en la altura de las plantas, a los 2 años de edad. Las progenies MEG 634-590 y MEG 639-836 mostraron plantas de mayor altura que Caturra, mientras las progenies MEG 639-562 y MEG 639-565 tuvieron plantas de menor porte que los testigos. En cuanto al diámetro de copa, también se observaron diferencias significativas, siendo las progenies MEG 634-590, MEG 639-836 y MEG 639-884 de mayor diámetro que Caturra, y solo la progenie MEG 639-562 fue la de menor diámetro. También se notaron diferencias en cuanto al número de ramas, siendo las progenies MEG 639-561, MEG 639-562, MEG 639-565 y MEG 639-566 las de menor número de ramas/planta que los testigos.

En cuanto a las características de grano (Tabla 3), se observaron diferencias en el porcentaje de frutos vanos. Según la prueba de Dunnett ($p = 0,05$) cinco progenies tuvieron mayor proporción de frutos vanos que los testigos Caturra (4,5%) y Colombia (7,2%). Las demás progenies tuvieron menos del 10% de café cereza con dicho defecto, lo cual es aceptable comercialmente, según Alvarado y Cortina (2). Diferencias similares se observaron en los granos caracol; siete progenies mostraron mayor proporción de este defecto (promedio de 19%) en comparación con el valor en las variedades comerciales (12%) y que los testigos, con un promedio del 11%. También se notaron diferencias en los granos triángulo; a pesar de que dichos valores fueron aceptables (4%), se observaron diferencias con la variedad Caturra.

Es importante mencionar que los defectos de granos son de común ocurrencia en híbridos interespecíficos, así como en genotipos autoploiploides. Para algunos autores (7, 26), los defectos están relacionados con la esterilidad e irregularidades cromosómicas; sin

Tabla 2. Promedios de las características agronómicas de cada progenie, a los 24 meses de edad.

Progenie nr.	Altura de la planta (cm) (Prom. ± DE)	Diámetro de la copa (cm) (Prom. ± DE)	No. de pares de ramas (Prom. ± DE)
MEG 615-17	115,5 ± 14,9	105,0 ± 32,5	20,6 ± 5,1
MEG 623-04	118,3 ± 10,4	129,2 ± 18,4	24,2 ± 2,9
MEG 623-40	113,7 ± 10,2	110,2 ± 26,6	22,9 ± 3,1
MEG 634-590	137,7 ± 12,8*	150,5 ± 19,0*	21,7 ± 3,3
MEG 636-815	120,8 ± 11,0	126,5 ± 17,4	23,5 ± 2,3
MEG 636-816	127,8 ± 13,6	129,0 ± 19,0	26,5 ± 3,2
MEG 636-834	128,8 ± 12,4	135,5 ± 16,2	24,9 ± 2,7
MEG 636-877	120,8 ± 13,5	119,7 ± 19,0	23,7 ± 2,4
MEG 636-946	120,3 ± 35,0	120,0 ± 34,6	21,4 ± 4,3
MEG 639-561	120,5 ± 17,0	120,2 ± 24,9	19,0 ± 3,1*
MEG 639-562	84,7 ± 18,3 *	76,7 ± 28,7*	15,3 ± 7,5*
MEG 639-565	99,7 ± 22,1*	107,5 ± 22,5	18,4 ± 5,4*
MEG 639-566	106,5 ± 29,0	115,0 ± 21,7	19,0 ± 5,6*
MEG 639-727	125,0 ± 16,5	130,0 ± 34,3	22,0 ± 2,9
MEG 639-836	133,5 ± 10,8*	144,5 ± 17,6*	24,8 ± 2,5
MEG 639-884	120,0 ± 27,1	115,7 ± 20,8*	20,6 ± 5,0
Var. Caturra	116,3 ± 18,9	114,7 ± 27,8	23,2 ± 4,2
Var. Colombia	118,8 ± 14,5	127,2 ± 18,5	23,4 ± 3,0

*Diferencias estadísticas significativas; D.E.: Desviación estándar.

embargo, estas características son importantes, puesto que son determinantes en el proceso de tostión del café y ha sido un serio obstáculo de estos híbridos interespecíficos para su aceptación comercial (9). Infortunadamente, en este estudio, algunas progenies que mostraron resistencia tanto a roya como a llaga macana fueron excluidas por estos aspectos.

En cuanto al tamaño de grano (% supremo) las progenies estudiadas tuvieron un promedio de 50% mayor que los testigos (46%) (Tabla 3). En esta variable se observaron diferencias significativas entre las progenies. Cinco de ellas (MEG 636-834, MEG 636-946, MEG 639-561, MEG 639-566 y MEG 639-884) tuvieron granos de mayor tamaño (tipo supremo) que Caturra, mientras la progenie MEG 639-727 fue la de menor tamaño de grano. Este atributo de tamaño de grano se ha vuelto de importancia para

los caficultores de Colombia, ya que está relacionado con el procesamiento industrial del grano, siendo el tamaño grande de mayor aceptación en el mercado (4). Los resultados muestran predominancia de granos de menor tamaño que lo deseable. Esto concuerda con lo observado por Alvarado y Cortina (2) en progenies avanzadas (F_4RC_1) de este tipo de híbridos; sin embargo, también se observó menor tamaño de grano en los testigos Caturra y Colombia (43,8% y 45,4%, respectivamente), comparativamente con los valores de estas mismas variedades registrados en los trabajos de Castillo y Moreno (10). En este caso se registró un 63% en Caturra y 83% en var. Colombia. Entre las cinco progenies con mayor tamaño de grano (tipo supremo) que los testigos, solo dos de ellas (MEG 639-561, y MEG 639-884) tuvieron aceptable resistencia a roya y a llaga macana.

Tabla 3. Promedios de las características de grano y producción (kg.año⁻¹ de cps por planta).

Progenie nr.	Defectos de grano (%)			Tamaño de grano tipo supremo ^d (%) (Prom. ± DE)	Promedio de cosecha (kg) (Prom. ± DE)
	Frutos vanos ^a (Prom. ± DS)	Caracol ^b (Prom. ± DE)	Triángulo ^c (Prom. ± DE)		
MEG 615-17	13,6 ± 4,5*	26,4 ± 7,5*	3,6 ± 2,2	46,7 ± 12,3	2,4 ± 1,9
MEG 623-04	17,1 ± 7,6*	23,7 ± 5,1*	0,6 ± 0,4*	23,7 ± 9,3	2,1 ± 0,9
MEG 623-40	26,4 ± 9,8*	45,1 ± 11,0*	0,3 ± 0,3*	44,5 ± 15,3	2,1 ± 0,6
MEG 634-590	19,0 ± 5,9*	36,5 ± 11,6*	0,3 ± 0,4*	35,9 ± 16,4	3,3 ± 1,3
MEG 636-815	5,4 ± 1,5	12,1 ± 2,7	2,8 ± 1,5*	52,3 ± 9,7	3,2 ± 0,6
MEG 636-816	6,4 ± 1,6	13,4 ± 1,2	1,7 ± 0,6*	47,7 ± 5,5	3,8 ± 0,9*
MEG 636-834	22,4 ± 13,5*	10,9 ± 2,6	0,8 ± 0,5*	68,0 ± 4,6*	2,6 ± 0,7
MEG 636-877	8,0 ± 6,1	12,6 ± 3,4	1,8 ± 0,8*	48,8 ± 10,3	2,8 ± 0,7
MEG 636-946	7,3 ± 3,6	12,1 ± 4,4	1,4 ± 0,6*	58,5 ± 11,2*	2,7 ± 0,8
MEG 639-561	5,8 ± 1,9	12,3 ± 2,7	1,8 ± 1,1*	65,3 ± 4,3*	2,7 ± 0,7
MEG 639-562	3,5 ± 1,6	12,9 ± 4,5	7,5 ± 3,1*	41,6 ± 7,8	2,4 ± 0,7
MEG 639-565	7,9 ± 5,7	19,0 ± 5,9*	2,6 ± 1,4*	49,2 ± 8,2	2,8 ± 0,9
MEG 639-566	6,5 ± 2,5	16,1 ± 2,7*	6,1 ± 3,7*	66,3 ± 6,6*	2,4 ± 1,1
MEG 639-727	6,1 ± 2,5	7,9 ± 2,1	1,7 ± 0,5*	27,0 ± 12,2*	2,3 ± 0,7
MEG 639-836	7,6 ± 4,3	16,1 ± 4,9*	3,1 ± 1,4	51,8 ± 16,6	3,0 ± 0,8
MEG 639-884	6,7 ± 2,5	10,7 ± 3,1	3,0 ± 1,4*	67,2 ± 7,6*	2,5 ± 0,9
Var. Caturra	4,5 ± 1,9	10,3 ± 5,0	4,5 ± 1,7	43,8 ± 6,9	2,9 ± 0,8
Var. Colombia	7,2 ± 2,5	11,0 ± 2,8	0,6 ± 0,5*	45,4 ± 12,3	3,0 ± 0,9

^a Frutos vanos: Porcentaje promedio de 100 frutos maduros que flotan en agua. Tres muestras tomadas en dos picos de cosecha

^b Granos caracol: Porcentaje promedio de tres muestras de 400 granos de café pergamino seco tomadas en dos picos de cosecha.

^c Granos triángulo: Porcentaje promedio de tres muestras de 400 granos de café pergamino seco tomadas en dos picos de cosecha

^d Tamaño Supremo: Porcentaje promedio de tres muestras de 100 g de café verde retenido en una malla de 17/64 pulgadas.

*Diferencias estadísticas (0,05), de acuerdo con la Prueba de Dunnet, con relación a la var. Caturra.

En cuanto a la producción se observaron diferencias estadísticas entre las progenies (Tabla 3.). La progenie MEG 636-816 fue más productiva que Caturra, mientras que las demás progenies mostraron igual productividad que los testigos. Esta última característica posiblemente está relacionada con el retrocruzamiento hecho con Caturra, lo cual permitió recuperar la buena productividad de esta variedad. No obstante, Owuor y Van der Vossen (37), sugieren hacer dos retrocruces para recuperar dicho atributo de fertilidad; en este experimento solo fue necesario un retrocruce para lograr un aceptable comportamiento similar al de Caturra.

En conclusión, las progenies MEG 639-561 y MEG 639-884 se seleccionaron como promisorias para futuros trabajos; éstas combinan la doble resistencia a roya y a llaga macana, además de poseer aceptables atributos agronómicos y de calidad de grano. Es de anotar que algunos híbridos interespecíficos han demostrado resistencia a patógenos diferentes a *H. vastatrix*, como por ejemplo a *Cercospora coffeicola* (38), a los nematodos *Meloidogyne exigua* (5) o a CBD (“coffee berry disease”), causada por *Colletotrichum kahawae* J.M. Waller & Bridge (35). Recientemente, Castro *et al.* (2016), obtuvieron genotipos con doble

resistencia a los patógenos estudiados en el presente trabajo, además de mostrar aceptables características agronómicas y de calidad de grano. A futuro, podrían evaluarse las características organolépticas y de calidad de taza en los genotipos seleccionados con el fin de complementar la información para que sea de utilidad práctica a los caficultores de Colombia.

LITERATURA CITADA

- ALVARADO A., G. Evolution of *Hemileia vastatrix* virulence in Colombia. p.99-115. En: ZAMBOLIN, L.; ZAMBOLIN, E.M.; VARZEA, V.M. Durable resistance to coffee leaf rust. Viçosa : UFV, 2005.
- ALVARADO A., G.; CORTINA G., H.A. Comportamiento agronómico de progenies de híbridos triploides de *Coffea arabica* var Caturra X (Caturra x *Coffea canephora*). Cenicafé 48(2):73-91. 1997.
- ALVARADO A., G.; SOLÓRZANO, B.L. Caracterización de la resistencia incompleta a *Hemileia vastatrix* Berk. y Br. en genotipos de café en Colombia. Cenicafé 52(1):5-19. 2001.
- ALVARADO A., G.; POSADA, H.E.; CORTINA G., H.A. La variedad Castillo: Una variedad de café *Coffea arabica* L. con elevada productividad y amplia resistencia a enfermedades. Fitotecnia colombiana 8(1):1-21. 2008.
- BERTRAND, B.; ANTHONY, F.; LASHERMES, P. Breeding for resistance to *Meloidogyne exigua* of *Coffea arabica* by introgression of resistance genes of *Coffea canephora*. Plant pathology 50:637-643. 2001.
- BETTENCOURT, A.J.; NORONHAW, M.; LÓPEZ, J. Factor genético que condiciona a resistencia do clone 1343/269 "Híbrido de Timor" a *Hemileia vastatrix* Berk et Br. Broteria genética 1(76):53-58. 1980.
- CARVALHO, A.; MONACO, L.C. The breeding of Arabica coffee. p. 198-216. En: FEWERDA, F.P.; WIT, F. Outlines of perennial crop breeding in the tropics. Wageningen : Landbouwhogeschool, 1969. 198 p.
- CARVALHO, A.; MONACO, L.C.; VANDER V., H.A.M. Café Icatu como fonte do resistencia ao *Colletotrichum coffeanum*. Ciencia e cultura 27(7):241-242. 1976.
- CARVALHO, A.; COSTA, W.M.; FAZUOLI, L.C. Auto-incompatibilidade, produtividade, ocorrências de sementes do tipo moca e mudas anormais no café Icatu. Bragantia 42(14):157-169. 1983.
- CASTILLO Z., J.; MORENO R., L.G. La variedad Colombia: Selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del café. Manizales : Cenicafé, 1988. 169 p.
- CASTRO C., B.L.; MONTOYA R., E.C. Evaluación de fungicidas para el control de *Ceratocystis fimbriata* Ell. Halst. Hunt. en café. Cenicafé 45(4):137-153. 1992.
- CASTRO C., B.L.; DUQUE O., H.; MONTOYA R., E.C. Pérdidas económicas ocasionadas por la llaga macana del café. Cenicafé 54(1):63-76. 2003.
- CASTRO C., B.L.; CORTINA G., H.A. Evaluación de resistencia a *Ceratocystis fimbriata* Ell. Hals Hunt. en progenies F₃ de café Bourbon resistente x Caturra. Cenicafé 60(2):115-125. 2009.
- CASTRO C., B.L.; CORTINA G., H.A. Evaluación de resistencia a *Ceratocystis colombiana* y *Ceratocystis papillata* en genotipos de café. Cenicafé 63(2): 36-43. 2012.
- CASTRO C., B.L.; CORTINA G., H.A.; ROUX, J.; WINGFILED, J.M. New coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes derived from *Coffea canephora* exhibiting high levels of resistance to leaf rust and Ceratocystis canker. Tropical plant pathology 38(6):485-494. 2013.
- CENICAFÉ. Anuario meteorológico. Manizales : Cenicafé, 2008. 558 p.
- ECHANDI, E.; FERNÁNDEZ, C.E. Relation between chlorogenic acid contents and resistance to coffee canker incited by *Ceratocystis fimbriata*. Phytopathology 52(1):544-546. 1961.
- ESKES, A.B. Phenotypic expression of resistance to coffee leaf rust and its possible relationship with durability. p.305-331. En: ZAMBOLIN, L.; ZAMBOLIN, E.M.; VARZEA, V.M. Durable resistance to coffee leaf rust. Viçosa : UFV, 2005.
- ESKES, A.B.; BRAGHINI, M. Métodos de evaluación de la resistencia contra la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berk. et Br.). Boletín fitosanitario FAO 29(3/4):56-66. 1981.
- ESKES, A.B.; CARVALHO, A. Variation for incomplete resistance to *Hemileia vastatrix* in *Coffea arabica*. Euphytica 32(2):625-637. 1983.

21. ESKES, A.B.; COSTA, W.M. Characterization of incomplete resistance to *Hemileia vastatrix* in the Icatu coffee population. *Euphytica* 32(2):649-657. 1983.
22. ESKES, A.B.; HOOGSTRATEN, J.G.J.; TOMAB, M.; CARVALHO, A. Race-specificity and inheritance of incomplete resistance coffee leaf rust in some Icatu coffee offspring and derivatives of híbrido de Timor. *Euphytica* 47(1):11-19. 1990.
23. FNC. Sistema de información cafetera: SICA. [En línea]. Bogotá : FNC, (s.f.). Disponible en internet: Consultado en Febrero de 2014.
24. FERNÁNDEZ, B.O. Patogenicidad de *Ceratocystis fimbriata* y posible resistencia en café var. Borbón. *Cenicafé* 15(1):3-17. 1964.
25. HERRERA P., J.C.; COMBES, M.C.; CORTINA G., H.A.; ALVARADO A., G.; LASHERMES, P. Gene introgression into *Coffea arabica* by way of triploid hybrids (*C. arabica* x *C. canephora*). *Heredity* 89:488-494. 2002.
26. IZQUIERDO, J.E. Comportamiento de genotipos de cafetos ante *Ceratocystis fimbriata*. *Ciencia y técnica en la agricultura; café y cacao* 10(1):53-59. 1988.
27. LASHERMES, P.; ANDRZEJEWSKI, S.B.; BERTRAND, B.; COMBES, M.C.; DUSSE, S.; GRAZIOSI, G.; TROUSLOT, P.; ANTHONY, F. Molecular analysis of introgressive breeding in coffee (*Coffea arabica* L.). *Theoretical and applied genetics* 100:139-146. 2000.
28. MAHE, L.; VARZEA V., M.P.; LE PIERRES, D.; COMBES, M.C.; LASHERMES, P. 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. 2007.
29. MARÍN M., M.; CASTRO C., B.L.; GAITÁN B., A.L.; PREISIG, O.; WINGFIELD, B.D.; WINGFIELD, M.J. Relationships of *Ceratocystis fimbriata* isolates from colombian coffee-growing regions based on molecular data and pathogenicity. *Journal of phytopathology* 151(7/8):395-405. 2003.
30. MATIELLO, J.B.; ALMEIDA, S.R.; CARVALHO, C.H.S. Resistant cultivars to coffee leaf rust. p. 443-450. En: ZAMBOLIN, L.; ZAMBOLIN, E.M.; VARZEA, V.M.P. Durable resistance to coffee leaf rust. Viçosa : UFV, 2005.
31. MONACO L., C.; CARVALHO, A. Resistência a *Hemileia vastatrix* no melhoramento do cafeeiro. *Ciência e cultura* 27(10):1070-1081. 1975.
32. MONTILLA, J.; ARCILA P., J.; ARISTIZABAL, M.; MONTÓYAR, E.C.; PUERTA Q., G.I.; OLIVEROS T., C.E.; CADENA G., G. Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. *Manizales : Cenicafé*, 2009. 8 p. (Avances Técnicos No. 370).
33. MORENO R., L.G. Nueva variedad de café de porte alto resistente a la roya del café. *Cenicafé* 53(2):132-143. 2002.
34. OMONDI, C.O.; AYIECHO, P.O.; MWANG'OMBE, A.W.; HINDORF, H. Resistance of *Coffea arabica* cv. Ruiru 11 tested with different isolates of *Colletotrichum kahawae* the causal agent of coffee berry disease. *Euphytica* 121(1):19-24. 2001.
35. OROZCO F., J. Utilización del híbrido triploide de *C. arabica* x *C. canephora* en cruzamientos interespecíficos. *Cenicafé* 27(4):143-157. 1976.
36. OWUOR, J.B.; VAN DER V., A.H.M. Interspecific hybridization between *Coffea arabica* L. and tetraploid *C. canephora* P. ex Fr. I. fertility in F₁ hybrids and back crosses to *C. arabica*. *Euphytica* 30(3):816-866. 1981.
37. PATRICIO, F.R.A.; BRAGHINI, M.T.; FAZUOLI, L.C. Resistencia de plantas de *Coffea arabica*, *Coffea canephora* e híbridos interespecíficos a cercosporiose. *Bragantia* 69(4):883-890. 2010.
38. PRAKASH, N.S.; GANESH, D.; BATH, S.S. Population dynamics of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk & Br.) and recent advances in rust research in India. p. 411-442. En: ZAMBOLIN, L.; ZAMBOLIN, E.M.; VARZEA, V.M. Durable resistance to coffee leaf rust. Viçosa : UFV, 2005.
39. RIVILLAS O., C.A.; SERNA, C.A.; CRISTANCHO A., M.A.; GAITÁN B., A.L. La roya del café en Colombia: Impacto, manejo y costos de control. *Manizales : Cenicafé*, 2011. 54 p. (Boletín Técnico No. 35).
40. RODRÍGUEZ, C.J.; VARZEA, P.V.M.; SILVA, M.C.; GUERRA G., L.; ROCHETA, M.; MÁRQUES, D.V. Recent advances on coffee leaf rust. p. 179-193. En: Proceedings of the international scientific symposium on coffee, 2000.
41. SAS. Statistical software: SAS/STAT users's guide Version 9.2. *North Carolina : SAS Institute : Cary*, 2010.

42. SERA, G.H.; SERA, T.; FONSECA, I.C.B.; ITO, D.S. Resistência à ferrugem anaranjada em cultivares de café. *Coffee science* 5(1):59-66. 2010.
43. SERA, G.H.; SERA, T.; FONSECA, I.C.B.; ITO, D.S.; DEL GROSÍ, L.; SHIGUEOKA, L.H.; KANAYAMA, F.S. Seleção para a resistência à ferrugem em progênies das cultivares de café IPR 99 e IPR 107. *Bragantia* 69(3):547-554. 2010.
44. SIERRAS, C.A.; RIVILLASO, C.A.; GÓMEZ G., L.; LEGUIZAMON C., J.E. Épocas de control químico de la roya del café en Colombia para 1991: Zonas con cosecha importante en ambos semestres del año. *Manizales : Cenicafé*, 1991. 5 p. (Avances Técnicos No. 156)
45. VANDER V., A.M. State of the art of developing durable resistance to biotrophic pathogens in crop plants, such as coffee leaf rust. p. 1-30. En: ZAMBOLIM, L.; ZAMBOLIM, E.M.; VÁRZEA, V.M. Durable resistance to coffee leaf rust. Viçosa : UFV, 2005.
46. VAN W., M.; WINGFIELD, B.D.; MARIN, M.M.; WINGFIELD, M.J.J. New *Ceratocystis* species infecting coffee, cacao, citrus and native trees in Colombia. *Fungal diversity* 40:103-117. 2010.
47. VARZEA, V.M.; MÁRQUES, D.V. Population variability of *Hemileia vastatrix* vc coffee durable resistance. p. 53-74. En: ZAMBOLIM, L.; ZAMBOLIM, E.M.; VÁRZEA, V.M. Durable resistance to coffee leaf rust. Viçosa : UFV, 2005.

FACTORES DE PRODUCCIÓN QUE INFLUYEN EN LA RESPUESTA DE GENOTIPOS DE *Coffea arabica* L. BAJO DIVERSAS CONDICIONES AMBIENTALES DE COLOMBIA

Juan Carlos García López*; Húver Elías Posada Suárez**; Fredy Antonio Salazar Villareal***

GARCÍA L., J.C.; POSADA S., H.E.; SALAZAR V., F.A. Factores de producción que influyen en la respuesta de genotipos de *Coffea arabica* L. bajo diversas condiciones ambientales de Colombia. Revista Cenicafé 66 (2): 30-57. 2015

Con el objetivo de establecer la capacidad de diferenciación de respuestas genotípicas de las estaciones experimentales (EE) de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y determinar las condiciones climáticas que definen estas respuestas, un grupo de genotipos, todos originados en una preselección con reconocimiento de atributos agronómicos y de resistencia a enfermedades, fueron evaluados en dos investigaciones, en nueve EE, entre enero de 2000 y diciembre de 2009. Se registró la producción por pase y se acumuló por mes, semestre y año. Se tomó la información diaria de precipitación, brillo solar, temperaturas media, mínima y máxima, y se construyeron los índices de déficit de humedad del suelo moderado y fuerte, déficit de brillo solar, tiempo térmico y amplitud térmica, que junto con la precipitación y el brillo solar, se combinaron con cuatro etapas fisiológicas del cultivo, para conformar 28 indicadores bioclimáticos. La producción se evaluó con estadística univariada, multivariada y de regresión, que incluyeron análisis combinados y regresión PLS, este último incorporó los indicadores bioclimáticos. El análisis PLS explicó en sus primeros dos factores entre el 51% y 56% de la interacción Genotipo x Ambiente. A partir de las respuestas diferenciales de los genotipos evaluados, se conformaron siete grupos ambientales. Los rangos de la producción potencial estuvieron relacionados con los eventos de El Niño, La Niña y Neutro, los cuales influyeron en el desempeño de los genotipos, con diferentes grados de adaptación.

Palabras clave: Interacción genotipo por ambiente (GxE), indicadores bioclimáticos, cuadrados mínimos parciales (PLS), respuestas fenotípicas.

PRODUCTION FACTORS THAT INFLUENCE THE RESPONSE OF *Coffea arabica* L. GENOTYPES UNDER DIVERSE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF COLOMBIA

In order to establish the differentiation capacity of genotypic responses of the Experimental Stations (ES) of the National Federation of Coffee Growers of Colombia and to determine the climatic conditions that define such responses, a group of genotypes, all originated from a preselection with appreciation of agronomic and disease resistance attributes, were evaluated in two studies in nine ES, between January 2000 and December 2009. Production per pass was recorded and accumulated by month, semester and year. Daily information on precipitation, sunshine, and average, minimum and maximum temperatures were taken and rates of moderate and strong soil moisture deficit, sunshine deficit, thermal time and thermal amplitude were built and, along with precipitation and sunshine, were combined with four physiological stages of cultivation to form 28 bioclimatic indicators. Production was assessed with univariate, multivariate and regression statistics, which included combined and PLS regression analyses, the latter considered bioclimatic indicators. In its first two factors, PLS analysis explained between 51% and 56% of the genotype by Environment interaction. From the differential responses of the assessed genotypes, seven environmental groups were formed. The ranges of potential production were related to events of El Niño, La Niña and Neutral, which influenced the performance of genotypes with different degrees of adaptation.

Keywords: Genotype by environment interaction (GxE), bioclimatic indicators, Partial Least Squares (PLS), phenotypic responses.

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

** Líder Nacional de Extensión. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia FNC.

*** Ph.D. Ciencias en énfasis en Fitomejoramiento. Cenicafé.

En la estrategia del Programa de Investigación Científica de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-FNC, la disciplina de Mejoramiento Genético ha liderado el desarrollo de nuevas variedades. Su mayor logro se constituye en haber obtenido una variedad con resistencia a un patógeno sin su presencia en nuestro país. Desde finales de los años ochenta, cuando se entregó la primera variedad con resistencia a la roya del cafeto, denominada Variedad Colombia, a la par con los avances tecnológicos, se continúa en la búsqueda de nuevos materiales que satisfagan las necesidades de un conjunto de actores en la cadena productiva, es así como en la actualidad, el reto de incorporar nuevos atributos a una variedad trascienden la frontera de lo meramente agronómico, pues no sólo es la investigación clásica *per se*, sino el entendimiento de la relación con todos los factores, los que contribuyen en su adaptación, como por ejemplo las condiciones ambientales que refleja un sitio en especial. En este último aspecto se fortalece la investigación, es así como grupos de los mejores materiales mejorados por sus atributos en calidad, tamaño de grano, productividad y resistencia a enfermedades, son evaluados en diferentes ambientes, con el fin de observar su comportamiento relativo y determinar su potencial de adaptabilidad y estabilidad, para luego candidatizarlos en las futuras mezclas de las diferentes progenies que constituyan una nueva variedad compuesta. Con este esquema, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, ha liberado en la última década ocho variedades, una de adaptación general y siete de adaptación específica (3).

Los objetivos de este estudio fueron establecer la capacidad de cada sitio experimental para la diferenciación de respuestas fenotípicas y determinar las

condiciones climáticas que definen las respuestas diferenciales en cada uno. Adicionalmente, separar los genotipos evaluados por su adaptabilidad específica.

La zona cafetera colombiana se localiza entre 1° y 11° de latitud Norte, y 72° a 78° de longitud Oeste, entre los 800 y 2.000 m de altitud, entre las tres cordilleras Andinas (Occidental, Central y Oriental, además del sistema montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta) (26). El área sembrada en café ha aumentado de 878 mil hectáreas en el 2008 a 945 mil hectáreas al 30 de abril del 2015 y se encuentra distribuida en 561 municipios de 22 de los 32 departamentos; en esta área se registran 553 mil productores y más de 686 mil fincas¹. El cultivo de café representa el 17% del PIB agrícola y 9% de todo el agropecuario. Cerca de 2,2 millones de personas dependen directamente del cultivo, lo que equivale al 25% de la población rural colombiana. La actividad cafetera genera 741 mil empleos directos y 1,4 millones de empleos indirectos, constituyendo así el 31% del empleo agrícola nacional (22).

En el año 2014, Colombia produjo 12,2 millones de sacos de café verde, el volumen de exportaciones de café colombiano fue de 11 millones de sacos y las exportaciones mundiales se situaron en 149,3 millones de sacos (23). En sus programas institucionales, la FNC se propone alcanzar la meta de un millón de hectáreas en café y de elevar la producción anual a 17 millones de sacos en el año 2020, con el fin de afianzar la participación en el mercado de los suaves (23).

Ambiente para el cultivo del café. Las diferencias en los factores geográficos determinan una alta diversidad en los elementos de clima, especialmente por cantidad y

¹ SIC@: Sistema de Información Cafetera-FNC. 2015.

distribución de lluvias, rango de temperatura día - noche, temperatura media, humedad relativa, horas de brillo solar y meses secos durante el año.

DaMatta *et al.* (19) realizaron una detallada revisión de los determinantes climáticos, ambientales y de crecimiento vegetativo y reproductivo del café. Se destacan las siguientes citas:

- La precipitación anual óptima fluctúa entre 1.200 y 1.800 mm y la temperatura media entre 18 y 21°C, por encima o por debajo de éstos se producen alteraciones en los patrones de crecimiento y producción. Otro factor que afecta la periodicidad de crecimiento corresponde a las fluctuaciones de la radiación solar.
- Los períodos secos y las primeras lluvias que le siguen a éstos determinan los patrones de floración; la carencia de períodos secos limita el cultivo en zonas de regiones tropicales.
- El cuajamiento del fruto se afecta por factores ambientales como la lluvia intensa, por la nutrición mineral y por caídas súbitas de temperatura. Por su parte, las mayores altitudes (temperaturas del aire más bajas) permiten una mejor expresión de calidad de la bebida.

De acuerdo con Jaramillo (32), en Colombia la temperatura óptima para el café se encuentra entre 18 y 22°C; por debajo o por encima de esta temperatura se disminuye la producción, debido principalmente a los trastornos florales. En cuanto a las necesidades de agua, éstas se calculan en 125 mm.mes⁻¹, sin embargo, la Deficiencia Hídrica Anual (DHA) de innumerables regiones cafeteras mundiales muestra que valores de DHA inferiores a 150 mm viabilizan el cultivo, y valores superiores

a éste, con límite de 200 mm, lo marginan o deberá recurrirse a riego (57). Las cuencas hidrográficas y la altura sobre el nivel del mar son determinantes en la demanda hídrica del cultivo de café en Colombia, las variaciones de los requerimientos estarán condicionadas por la capacidad de retención de humedad de los suelos y la edad del cultivo (51). Los períodos de deficiencia hídrica seguidos por lluvias inducen la antesis, la cual será mayor en la medida que el período de déficit sea más acentuado y prolongado. El fotoperíodo en café no es limitante, ya que durante todo el año el número de horas de luz es inferior a 12,5 h (4).

En Colombia, la zona de convergencia intertropical explica la existencia de dos épocas secas y dos húmedas en el año (26, 32, 59), las cuales determinan dos épocas de cosecha de café; con variaciones en los extremos Norte y Sur y la vertiente oriental de la cordillera Oriental, en los cuales la distribución monomodal de las lluvias hace que se concentre la cosecha (4, 26, 32, 59). La intensidad relativa de la estación seca (uno a dos meses), repercute en el ciclo de producción que presenta una variabilidad entre 215 y 240 días, a 5° y 11° de latitud Norte, respectivamente (58). Una relación entre los elementos meteorológicos y la fenología muestra que en el período de desarrollo de los botones florales (dos - tres meses antes de la florescencia), ocurre el predominio de verano, la alta radiación, la mayor amplitud térmica, la baja humedad relativa, el buen desarrollo de los vientos y las precipitaciones de poca intensidad. En el período de florescencia las temperaturas mínimas nocturnas son muy altas, aumenta la humedad relativa, la nubosidad y la lluvia. En la etapa de formación del fruto se recrudece la lluvia, aumenta la nubosidad, se reduce la radiación, se presentan oscilaciones de temperatura y humedad relativa, así como

lluvias fuertes de alta duración. La maduración del fruto coincide con el período de transición invierno-verano (59).

Montoya *et al.* (45) desarrollaron un modelo para simular la producción potencial del cultivo de café en Colombia, plantean tres condiciones de los factores más importantes: los reductores (arvenses, plagas, enfermedades), los limitantes (agua, nutrientes) y los determinantes (climáticos, fisiológicos, genéticos y CO₂). Sobre esta base se definen niveles o situaciones de producción para estudiar los efectos de los factores determinantes y restrictivos, como los de superposición con los factores que reducen los rendimientos. En el nivel de producción 1, al que corresponde la producción potencial, el cultivo tiene los recursos suficientes y en la cantidad adecuada, encontrando que la tasa de crecimiento está determinada principalmente por la radiación solar absorbida. Teniendo en cuenta que un caficultor puede, en su proceso de administración, controlar aquellos factores reductores y limitantes para lograr una producción "alcanzable", es necesario que las condiciones climáticas de su entorno le permitan lograrlo.

De los factores ambientales, la disponibilidad de energía y agua juegan un papel importante en la producción. En una localidad y una época del año determinada, la cantidad de radiación que llega a la superficie sufre modificaciones por efecto de la nubosidad, la latitud, la altitud y la orientación de las laderas. Por su parte, la temperatura juega un papel importante en el crecimiento del café, sus extremos (13°C, inferior y 32°C, superior) anulan el proceso de crecimiento y producción (4).

Índices bioclimáticos de uso en café. La Tabla 1 presenta referencias de investigaciones

en café, relacionadas con los eventos de floración y cosecha (período reproductivo), las cuales han involucrado índices bioclimáticos.

En varios estudios desarrollados en Brasil, el empleo de indicadores ha permitido en café, estimar la duración de diferentes períodos fenológicos (17, 47, 48), desarrollar modelos agrometeorológicos para la estimación de la productividad (14, 55), construir zonificaciones agroclimáticas para delimitar áreas homogéneas en su comportamiento y definir sus limitaciones, aptitudes y riesgos (43, 57) y diseñar sistemas de alertas de heladas (16). En Colombia, la construcción de algunos índices ha permitido definir su relación con algunos períodos fisiológicos como la floración (15, 50), desarrollo del fruto (6) y siembra a cosecha (37) y establecer criterios para planificación del cultivo (7, 34, 39), entre otros.

Selección de variedades en función de la oferta ambiental. Puede hablarse de adaptación en el contexto de la variación espacial de la expresión de un genotipo y de estabilidad para la variación en un lugar dado, a través de los años o bajo distintas prácticas de cultivo (54). En un programa de mejoramiento se exploran, de manera permanente, los genotipos por sus condiciones de adaptabilidad y estabilidad. Sin embargo, dado que por efecto de la interacción con el ambiente, las variedades sembradas manifiestan una respuesta de desempeño relativo, puede ocurrir que ciertas condiciones ambientales y de manejo que son favorables para algunos, representen limitación para otros. En este sentido resulta importante comprender las circunstancias que determinan la respuesta diferencial, mediante herramientas que posibiliten evaluar la interacción, que ayuden al mejorador a la toma de decisiones de acuerdo con el objetivo del programa de mejoramiento.

Tabla 1. Índices bioclimáticos en café, con énfasis para el cultivo en Colombia.

Variable o período fenológico	Índice bioclimático	Valor	Referencia
Floración - Cosecha	Temperatura base inferior (°C)	10 - 12 10,2 - 10,5 10,5	Jaramillo y Guzmán (37) Pezzopane <i>et al.</i> (48) Nunes <i>et al.</i> , (47)
Siembra - 1ª. Floración	Grados Día (tiempo térmico)	3.250	Jaramillo y Guzmán (37)
Floración - Cosecha	Grados Día	2.761 - 2.887 2.733 - 3.008 2.500	Pezzopane <i>et al.</i> (48) Nunes <i>et al.</i> (47) Jaramillo y Guzmán (37)
Floración - Cosecha	Evapotranspiración real	689 mm 746 - 799 mm	Pezzopane <i>et al.</i> (48) Nunes <i>et al.</i> (47)
Floración	Delta térmico (amplitud térmica)	Días con menos de 10°C	Ramírez <i>et al.</i> (51)
Fase de inducción y maduración de yemas florales	Evapotranspiración potencial acumulada	ETP ≈ 350 mm	Camargo y Camargo (13)
Floración - Cosecha	Índice de Humedad del Suelo (IHS) Moderado IHS Fuerte	0,6 < IHSM < 0,8 IHSF < 0,6	Arcila y Jaramillo (6)
Floración - Cosecha	Índice de Déficit Hídrico (IDH) Moderado	0,5 < IDHM < 0,8	Ramírez <i>et al.</i> (51)
Floración - Cosecha	Índice de Déficit Hídrico (IDH) Fuerte	IDHF < 0,5	
Crecimiento	IHSF	IHSF < 0,5 IHSF < 0,4	Arcila y Jaramillo (6) Allen <i>et al.</i> (2)
Floración	Déficit de Brillo Solar (DBS) = N-n	Días con DBS < 7,2	Ramírez <i>et al.</i> (51)
Componentes del ciclo hidrológico	Lluvia efectiva, catetales a libre exposición	43,83 mm 39,4 47,8 mm 51-54 mm 761 mm	Jaramillo y Chaves (35) Jaramillo y Chaves (36) Velásquez y Jaramillo (66) Jaramillo (31) Pezzopane <i>et al.</i> (48)
	Evapotranspiración de referencia	4,66* ϵ (0,0002*Alt) (cobertura nal.) 4,37* ϵ (0,0002*Alt (cuencas))	Jaramillo (30) Jaramillo (33)
Un año de desarrollo del cultivo	Deficiencia hídrica anual	<150 mm apta sin riego >150 mm apta con riego	Silva <i>et al.</i> (57)
Relación entre radiación solar y brillo solar	Coeeficientes de Angstrom	a - 0,246-0,278 b - 0,462-0,549	Gómez y Guzmán (27)

MATERIALES Y MÉTODOS

Diferencias en la tasa de aumento de la respuesta genotípica a un nivel sub-óptimo, reflejan cambios en la eficiencia; mientras que las diferencias en las tasas de rendimiento de la respuesta genotípica a un nivel súper-óptimo reflejan discrepancia en tolerancia (8). En general, un genotipo puede ser expresado como sigue, si la interacción genotipo por ambiente (GxE) no es importante o es ignorada: $F=G+E$, donde F significa fenotipo, G el genotipo y E el ambiente (68). La GxE se dice que ocurre cuando cultivares diferentes o genotipos responden de manera diferente a diversos ambientes (8, 60), o en otras palabras, corresponde a la alteración en el comportamiento relativo de los genotipos, en virtud de las diferencias del ambiente (12). La interacción GxE es importante sólo cuando causa cambios significantes en la clasificación de genotipos en distintos ambientes (8, 68). Las interacciones cualitativas complican la selección e identificación de los mejores genotipos; cuando no se cruzan, no es posible la recomendación para ambientes específicos (8). Para que la GxE sea detectada vía procedimientos estadísticos, debe haber al menos dos genotipos diferentes o cultivares evaluados en al menos dos ambientes contrastantes. El modelo básico que incluye la GxE es: $F=G+E+GE$, donde GE es la GxE (68).

Materiales. En el presente trabajo se consideraron dos investigaciones de la disciplina de Mejoramiento Genético de Cenicafé, en las cuales grupos de genotipos originados en una preselección con reconocimiento de atributos agronómicos y de resistencia a enfermedades, progenies avanzadas originadas entre el cruce de la variedad Caturra por el Híbrido de Timor, candidatas a conformar variedades, fueron evaluados en nueve localidades representativas de la geografía cafetera colombiana (Tabla 2).

La genealogía de los diferentes genotipos en cada experimento se presenta en la Tabla 3. Como puede observarse, la mayor parte de los genotipos han sido generados de los mismos parentales.

Para el desarrollo de la investigación se obtuvieron los materiales partiendo de germinador, su etapa inicial de plántula hasta los seis meses se desarrolló en almácigo, la estructura del diseño y la siembra se describe a continuación:

El experimento A lo componen 39 genotipos y tres testigos, los cuales se sembraron en

Tabla 2. Ubicación geográfica de las Estaciones Experimentales donde se realizaron las evaluaciones de interacción genotipo por ambiente entre los años 2000 y 2009.

Estación Experimental	Departamento	Municipio	Altitud (m)	Latitud Norte	Longitud Oeste
Pueblo Bello	Cesar	Pueblo Bello	1.134	10° 25'	73° 34'
Santander	Santander	Floridablanca	1.539	7° 6'	73° 4'
El Rosario	Antioquia	Venecia	1.635	5° 58'	75° 42'
Naranjal	Caldas	Chinchiná	1.381	4° 58'	75° 39'
Santa Bárbara	Cundinamarca	Sasaima	1.478	4° 56'	74° 25'
La Trinidad	Tolima	Líbano	1.453	4° 54'	75° 2'
La Catalina	Risaralda	Pereira	1.321	4° 45'	75° 44'
Paraguacito	Quindío	Buenavista	1.203	4° 24'	75° 44'
El Tambo	Cauca	El Tambo	1.735	2° 24'	76° 44'

un diseño Látice incompleto 6x7, con tres repeticiones, cada surco de cada progenie lo constituyeron 12 plantas, de las cuales se evaluaron de forma individual las diez plantas centrales. La siembra de las plántulas se efectuó en cinco Estaciones Experimentales (EE), Naranjal, El Rosario, La Trinidad, Paraguaicito y Santa Bárbara, en octubre de 1997, a una distancia de 1,0 m entre plantas y 2,0 m entre surcos.

El esquema de siembra del experimento B siguió un mismo patrón en las siete EE donde fue evaluado (Naranjal, Paraguaicito, El Rosario, La Catalina, El Tambo, Santander y Pueblo Bello). Entre octubre y noviembre de 2004, las plántulas se sembraron a una distancia de 1,0 m entre plantas y 1,5 m entre surcos. Cada progenie se estableció en bloques de 36 árboles, dispuestos en tres surcos, con 12 plantas cada uno.

Las progenies en el campo se ubicaron de forma aleatoria y las evaluaciones fenotípicas se realizaron en las 10 plantas del surco central.

El plan de manejo en todas la EE y para cada una de las investigaciones se ajustó a un mismo criterio, de acuerdo con las recomendaciones técnicas derivadas de las investigaciones de Cenicafé. El plan de fertilización se definió en cada localidad de acuerdo con los resultados del análisis de suelo.

Variables de respuesta

Variable agronómica. Durante los años descritos con anterioridad (Tabla 2), se registró la producción de café cereza por cada pase² y se acumuló por cada mes, semestre y año.

La información fue obtenida para cada una de las plantas de cada progenie. Por cada EE y por año se obtuvieron las curvas de producción mensual y se estableció el mes pico de cosecha (mes con mayor cantidad de café cereza recolectado), el cual sirvió como referente para obtener los indicadores bioclimáticos.

Variables ambientales: En cada sitio se contó con una estación climatológica principal, lo que permitió recolectar la información diaria de precipitación (PP), brillo solar (BS), temperatura media, temperatura mínima y temperatura máxima.

Momentos fisiológicos previos a cosecha

Diez meses previos a la floración (e0) que determina el pico de cosecha principal. Corresponde al período entre 10 meses y 4 meses previos a la floración, en el cual se inicia la inducción de las yemas florales (P2) y finaliza cuando éstas sobrepasan las estípulas (P3), relacionada con buena disponibilidad de agua, bajo brillo solar e incremento de la temperatura en P2 y cambios en el estado hídrico en la P3 (15).

Cuatro meses previos a la floración (e1) que determina la cosecha principal. Corresponde a los días previos a la floración, inicia cuando las yemas de la inflorescencia sobresalen de las estípulas y, cuando el botón floral latente, con pétalos cerrados de color blanquecino, aumenta su longitud, propiciada por la lluvia después de un estrés hídrico, se produce la floración (5, 15).

Ocho meses previos a la cosecha principal (e2). Se cumplen en este rango, el desarrollo de las fases I y II de formación del fruto de

² Un pase corresponde a cada entrada al cultivo para realizar la recolección de café cereza, regularmente se realizan entre 15 y 20 pases en el año.

Tabla 3. Genealogía de las progenies evaluadas en nueve Estaciones Experimentales de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, durante los años 2000 a 2009. En la parte superior de cada recuadro se especifica el experimento y los años de evaluación de la producción.

Experimento A (2000-2002)				
Genotipo	F3	F2	F1	Cruzamiento
BG0459	B219	PL1000	Ar.1324	CR-CV1 x H de T 1343-I.574-CV2
BH1247	A219	PL1000	Ar.1324	CR-CV1 x H de T 1343-I.574-CV2
BH1409	B222	PL1000	Ar.1324	CR-CV1 x H de T 1343-I.574-CV2
BH0813	A222	PL1000	Ar.1324	CR-CV1 x H de T 1343-I.574-CV2
BI0712	B219	PL1000	Ar.1324	CR-CV1 x H de T 1343-I.574-CV2
CU1778	B988	PL1889	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1792	B991	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1798	B991	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1812	B997	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1815	B997	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1825	B997	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1842	B998	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1843	B998	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1849	B998	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1871	B1030	PL2036	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1911	B1171	PL1979	M.2387	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1928	B1171	PL1979	M.2387	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1951	B1233	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1953	B1233	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1970	B1233	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1972	B1289	PL2030	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1991	B1290	PL2030	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1993	B1290	PL2030	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU2021	B1315	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU2034	B1340	PL2092	M.2392	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2065	B1361	PL1889	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2074	B1361	PL1889	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2171	B1322	PL2054	M.2392	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2188	B1322	PL2054	M.2392	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2375	B1239	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2385	B1239	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2391	B1239	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2432	B1176	PL1979	M.2387	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2567	B1147	PL2030	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2708	B1096	PL2094	M.2392	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2720	B1096	PL2094	M.2392	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2866	B1029	PL2036	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA

Continúa...

...continuación

Experimento A (2000-2002)				
Genotipo	F3	F2	F1	Cruzamiento
DG0812	A219	PL1000	Ar.1324	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
DH0004	AW3089	PL2221	Tr.958	CA-L.572 x H de T 1343 MEZCLA
Cat_CC	Testigo			Caturra sin control de roya
Cat_SC	Testigo			Caturra con control de roya
Var_Co	Testigo			Variedad Colombia

Experimento B (2007-2009)			
Familia	F2	F1	Cruzamiento
A170	PL1386	AR1322	CA-CV1 x HT,1343-I.574-CV2 (H3001)
AX2342	PL707	M2383	CA-L,572 x HT.1343 Mezcla (H3004)
AX2383	PL1979	M2387	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
AY2557	AY2557	BM339	CR x HT,1568 (Híbrido 3029)
B1027	PL2036	M2391	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1030	PL2036	M2391	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1047	PL767	M2383	CA-L,572 x HT.1343 Mezcla (H3004)
B1096	PL2094	M2392	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1148	PL2030	M2391	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1160	PL2092	M2392	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1171	PL1979	M2387	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1176	PL1979	M2387	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1233	PL1902	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1239	PL1902	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1289	PL2030	M2391	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1290	PL2030	M2391	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1320	PL1859	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1322	PL2054	M2392	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1340	PL2092	M2392	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1361	PL1889	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B988	PL1889	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B997	PL1859	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B998	PL1859	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)

café (5, 6), al final de las cuales la semilla alcanza su tamaño final.

Cuatro meses previos a la cosecha principal (e3). Es una etapa en la cual el grano de café adquiere su mayor consistencia y peso final, correspondiente a las fases III y IV de desarrollo del fruto (5, 6)

Factores ambientales modelados

Índices de humedad. Se utilizó la metodología descrita por Jaramillo y Gómez (38); para calcular el balance hídrico, en ella se combinan metodologías ajustadas para la zona cafetera. La evapotranspiración potencial se generó a partir de la expresión exponencial calculada

por Jaramillo (30), basada en el método de Penman - Monteith y la altitud. En conjunto, la metodología del balance hídrico está concebida en la desarrollada por Thornthwaite y Mather, adaptada por Jaramillo (29). El balance hídrico incorpora en la metodología, la capacidad de retención de humedad del suelo, que fue obtenida de los estudios detallados de suelo de cada EE, los estudios agroecológicos y de clima de los ecotopos cafeteros y de los resultados de investigaciones obtenidos por las disciplinas de Agroclimatología y de Suelos de Cenicafé.

A partir del índice de evapotranspiración (IHS), resultante de la rutina, se generaron dos índices que se tuvieron en cuenta para relacionarlos con los cuatro momentos fisiológicos, descritos con anterioridad:

Déficit Hídrico Moderado (DM) = $0,5 \leq IHS \leq 0,8$ (6)

Déficit Hídrico Fuerte (DF) = $IHS < 0,5$ (6)

En cada etapa se contabilizaron, de manera independiente, los días que cumplieran con los criterios de los dos índices (46), además de la lluvia diaria (PP) acumulada (Tabla 4).

Índices de Brillo Solar. Utilizando la metodología descrita por Ramírez *et al.* (51), se generó el índice de déficit de brillo solar (DBS), el cual se calculó por diferencia entre el brillo solar astronómico (N) y el brillo solar observado (Ecuación <1>). En cada una de las etapas fisiológicas establecidas se contabilizaron las horas de brillo solar y los días con $DB < 7,2$. (Tabla 4)

$$DBS = N - BS \text{ <1>}$$

Índices térmicos. Jaramillo y Guzmán (37), definieron la temperatura base inferior (Tbase) para el cultivo de café en Colombia en 10°C, a partir de ésta y la temperatura

media (Tmedia) se calculó el índice de tiempo térmico (TT) mediante la Ecuación <2>.

$$TT = (Tmedia - Tbase) \text{ <2>}$$

De manera reciente, algunas investigaciones (45, 47, 48, 51) han utilizado el concepto de TT, por su relación con la acumulación diaria de energía, la cual permite determinar los grados/día necesarios para alcanzar diferentes fases fenológicas.

A partir de la temperatura máxima (Tmáx) y la temperatura mínima (Tmín) se generó el índice de amplitud térmica (AT), descrito en la Ecuación <3>

$$AT = (Tmáx - Tmín) \text{ <3>}$$

Para cada una de las tres etapas fisiológicas propuestas se contabilizaron los grados/día y el número de días con $AT < 10$ (51). Los indicadores se muestran en la Tabla 4.

Métodos para el análisis de los datos. El experimento A, el cual originalmente se estableció con un Láttice (6x7), conservó como bloques las repeticiones y se eliminó el sub-bloqueo; en el experimento B, se consideraron los genotipos constituyentes de la población F3, los cuales conformaron entre dos y siete repeticiones.

Ambientes. Se generaron tantos ambientes como EE por año; en el experimento A se definieron 15 ambientes y 21 ambientes para el experimento B. En cada ambiente se consolidó la información de producción de café cereza por planta, para cada genotipo.

Indicadores bioclimáticos. Antes de abordar la incorporación de los indicadores en las evaluaciones, se realizaron análisis descriptivos y correlaciones de Pearson a las 28 indicadores bioclimáticos, con el fin de depurarlos teniendo

Tabla 4. Indicadores bioclimáticos obtenidos por la combinación de los elementos e índices climáticos con los eventos fisiológicos.

Siglas	Descripción del indicador bioclimático
PPe0	Lluvia acumulada entre 10 y 4 meses previos a la floración
PPe1	Lluvia acumulada en los 4 meses previos de floración
PPe2	Lluvia acumulada entre los 8 y los 4 meses previos de cosecha principal
PPe3	Lluvia acumulada 4 meses previos a la cosecha principal
TTe0	Grados día acumulados entre 10 y 4 meses previos a la floración
TTe1	Grados día acumulados en los 4 meses previos de floración
TTe2	Grados día acumulados entre los 8 y los 4 meses previos de cosecha principal
TTe3	Grados día acumulados en los 4 meses previos a la cosecha principal.
ATe0	Número días acumulados, con amplitud térmica inferior a 10 grados, entre 10 y 4 meses previos a la floración
ATe1	Número días acumulados, con amplitud térmica inferior a 10 grados, 4 meses previos a la floración
ATe2	Número de días acumulados con amplitud térmica inferior a 10 grados, entre 8 y 4 meses previos a la cosecha principal
ATe3	Número de días acumulados, con amplitud térmica inferior a 10 grados, 4 meses previos a la cosecha principal
BSe0	Horas de brillo solar acumulado entre 10 y 4 meses previos a la floración
BSe1	Horas de brillo solar acumulado en los 4 meses previos de floración
BSe2	Horas de brillo solar acumulado entre los 8 y los 4 meses previos de cosecha principal
BSe3	Horas de brillo solar acumulado 4 meses previos a la cosecha principal
DBe0	Número de días acumulados con valores de déficit de brillo solar inferiores a 7,2, entre 10 y 4 meses previos a la floración
DBe1	Número de días acumulados con valores de déficit de brillo solar inferiores a 7,2, 4 meses previos a la floración
DBe2	Número de días acumulados con valores de déficit de brillo solar inferiores a 7,2, entre 8 y 4 meses previos a la cosecha principal
DBe3	Número de días acumulados con valores de déficit de brillo solar inferiores a 7,2, 4 meses previos a la cosecha principal
DMe0	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico moderado, entre 10 y cuatro meses previos a la floración
DMe1	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico moderado, cuatro meses previos a la floración
DMe2	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico moderado, entre 8 y 4 meses previos a la cosecha principal
DMe3	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico moderado, 4 meses previos a la cosecha principal
DFe0	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico fuerte, entre 10 y 4 meses previos a la floración
DFe1	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico fuerte, 4 meses previos a la floración
DFe2	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico fuerte, entre 8 y 4 meses previos a la cosecha principal
DFe3	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico fuerte, 4 meses previos a la cosecha principal

en cuenta las correlaciones. En este sentido se asumió que variables correlacionadas, con coeficientes de determinación superiores a 0,8 (valor absoluto) y con significancia estadística, tenían la misma capacidad de respuesta, por lo cual sólo se dejaron aquellas que explicarían la mayor proporción de las otras variables.

Análisis de la información

Análisis de varianza (anava) simple. Se verificó, mediante rutinas de anava a cada uno de los ambientes, la diferenciación de respuestas en producción de los genotipos, mediante el siguiente modelo (Ecuación <4>).

$$Y_{ki} = \mu + b_k + G_i + e_{ki} \text{ <4>}$$

Donde: Y_{ki} es el valor medido, μ es la media general, b_k es el efecto del bloque, G_i el efecto del genotipo o familia y e_{ki} el error.

Para el análisis combinado se descartaron aquellos ambientes que no denotaron diferencias al 12% en la prueba F.

Anava combinado. Para cada experimento, la existencia de la GxE se comprobó con el modelo que se presenta en la Ecuación <5>.

$$Y_{kij} = \mu + G_i + A_j + b_{kj} + GA_{ij} + e_{ki} \text{ <5>}$$

Donde: Y_{kij} es el valor medido, μ es la media general, G_i es el efecto genotípico, A_j es el efecto ambiental, b_{kj} es el efecto del bloque k dentro del ambiente j, GA_{ij} es la interacción del genotipo i con el ambiente j y e_{ki} el error; este método se basa en el concepto dinámico o agronómico de la estabilidad (11). La significancia se estimó en un supuesto de un modelo fijo.

Cuadrados mínimos parciales (PLS por su sigla en inglés). El PLS se puede representar

de acuerdo a las Ecuaciones <6> y <7>:

$$X = TP' + E \text{ <6> Variable independiente}$$

$$Y = TQ' + F \text{ <7> Variable dependiente}$$

Donde: T contiene los puntajes de X, P contiene las cargas de X, Q contiene las cargas de Y, E y F son los residuales (52).

La matriz Y consistió en la variable de rendimiento, medida sobre los genotipos en diferentes localidades y la matriz X comprendió las covariables ambientales (indicadores bioclimáticos) calculadas para las localidades.

Para efectos de realizar el análisis de los datos, conforme la propuesta arriba descrita, se utilizó el paquete estadístico SAS (56) el cual proporciona los procedimientos proc GLM, proc Mixed, proc Cor, proc IML y proc PLS, para estos dos últimos se utilizó la rutina descrita por Vargas y Alvarado (62).

Representación e interpretación resultados

PLS. Las variables explicativas son combinaciones lineales del conjunto de medidas ambientales y genotípicas, comúnmente llamadas factores PLS. Los resultados de la descomposición bilineal obtenida del PLS se representan en un gráfico biplot que incluye los genotipos, las localidades y las covariables (18, 63, 64).

La interpretación de los biplot se derivó de las indicaciones de Gabriel (24), Gauch Jr (25) Kroonenberg (41), Vargas y Crossa (63) y Van Eeuwijk (61).

RESULTADOS

Análisis de varianza (ANAVA)

Análisis simple. Se verificó la respuesta de los genotipos por cada ambiente, a

partir de los resultados se descartaron aquellos ambientes que no mostraron diferencias de los genotipos en respuesta a la variable de producción por planta. La EE Santander, en el experimento B, no presentó respuestas diferenciales de los genotipos en alguno de los años de evaluación, razón por la cual no se incluyó en los siguientes análisis. Adicionalmente, Paraguaicito 2008 y El Tambo 2007, en el mismo experimento, fueron retirados para los análisis combinados y multivariados, debido a que para los años mencionados los genotipos no presentaron diferencias en respuesta a la variable, al igual como se mencionó para la EE Santander.

Análisis combinado. La GxE explica el 9,1% y 15,3% de la suma de cuadrados en los experimentos A y B respectivamente. La mayor varianza explicada se observa en los ambientes del experimento A y en la GxE del B. Todos los factores mostraron diferencias altamente significativas, de interés especial la de GxE, que demuestra la existencia de respuestas diferenciales de los genotipos (Tabla 5). La Tabla 6 muestra los valores de producción media anual, las EE Paraguaicito y El Rosario, presentes en ambos experimentos, tienen comportamiento superior. Lo contrario sucede con las EE Tambo, Pueblo Bello y Santa Bárbara. Para este último grupo, la baja producción pudo estar influenciada por la condición de sombrío en Pueblo Bello. Para El Tambo, su altitud, temperaturas bajas y condiciones de nubosidad definen un patrón de crecimiento lento del café. Otras condiciones, relacionadas con el sitio de siembra, influyeron en Santa Bárbara.

Producción media de los genotipos. En las Tablas 7 y 8 se resaltan los genotipos en cada localidad, con valores por encima del percentil 75.

Experimento A. En la Tabla 7 se presenta la información de producción expresada en $\text{kg}\cdot\text{año}^{-1}$ de café cereza por planta, de los genotipos evaluados en el experimento A. Los genotipos CU1812, CU1815, CX2188, CX2866 y los testigos 1 y 2 obtuvieron una media general superior. CU1812 y CU1815 presentaron buen desempeño en todas las EE a excepción de Naranjal, donde los genotipos BH0813, testigo2 y BI0712 fueron superiores. En los años en que se realizó la investigación (1999 – 2002) se alternaron las condiciones climáticas; entre 1999 e inicios de 2001 predominaron condiciones de La Niña, entre 2001 e inicios de 2002 condiciones Neutro y el resto de 2002 condiciones de El Niño, las cuales permitieron obtener respuestas genotípicas contrastantes.

Experimento B. La información de producción del experimento B se presenta en la Tabla 8, se expresa en $\text{kg}\cdot\text{año}^{-1}$ de café cereza por planta. Tres familias se destacan por las medias de producción superior, la B997, B1289 y B1160. Aunque prevalecieron las condiciones climáticas de evento La Niña, el hecho de la familia B997 de haber obtenido la mejor producción de manera permanente, es cualidad de estabilidad y adaptación general.

La característica principal de los materiales evaluados es su alto nivel de homocigosis (>85%) y su origen genético similar. La primera característica nos permite medir el efecto ambiental sobre el genotipo y la segunda implica que su base genética estrecha reduzca la eficiencia de selección, lo que unido a una interacción GxE significativa, dificulta la selección de genotipos por amplia adaptación, situación que hace necesario el uso de herramientas estadísticas complementarias para establecer los factores que están influyendo en las respuestas diferenciales.

Tabla 5. Cuadrados medios para la variable de producción (kg/planta) obtenida sobre 42 genotipos y 15 ambientes (A); 23 familias y 16 ambientes (B).

Fuente de Variación	Experimento A		Experimento B	
	Gl	CM	gl	CM
Ambiente	14	2918,56**	15	15,64**
Bloque(Ambiente)	30	84,65	96	0,41
Genotipo	41	39,96**	22	3,59**
Genotipo*Ambiente	574	11,98**	330	0,98**
Error	18240	2,26	528	0,56
Coeficiente de Variación	36,17		25,91	

** Denota significancia estadística al 1%

Tabla 6. Producción media anual de café cereza por planta, expresada en kg, en ocho EE de la geografía cafetera colombiana.

Estación Experimental	Experimento A kg/planta (2000-2002)*	Experimento B kg/planta (2007-2009)*
La Catalina		2,98
Naranjal	3,68	2,53
Paraguacito	4,86	4,63
Pueblo Bello		1,76
El Rosario	5,09	3,48
Santa Bárbara	1,87	
El Tambo		2,12
La Trinidad	5,28	
Promedio	4,15	2,89
DMS	0,078	0,24

* Las distancias de siembra del experimento A (1m x 2 m) fueron diferentes a las del experimento B (1 m x 1,5 m) lo cual influye en la producción por planta y determina que ésta no sea comparable entre experimentos.

Indicadores bioclimáticos

Relación con patrones de cosecha. En la Tabla 9, se presentan los promedios de los indicadores construidos con las variables climáticas obtenidas durante los años de investigación. Las EE El Tambo, La Trinidad y Santa Bárbara registraron los menores valores de TT, mientras los mayores se observaron en Paraguacito. El mayor registro de este indicador determina un patrón acelerado de crecimiento y desarrollo de la planta y del fruto. Los mayores valores de los indicadores bioclimáticos de AT en

La Trinidad, reflejan una condición más regulada térmicamente entre cuatro meses previos a la floración y los primeros cuatro meses de formación del fruto. El indicador de DB en Pueblo Bello define un mayor número de días en el cuarto trimestre, con registros inferiores de 7,2 h, lo que está mediado por una condición de mayor brillo solar. Por cuatrimestre, los menores valores de DF los registra la EE Naranjal, situación contraria a la EE Pueblo Bello. Para DM la EE El Tambo registra los menores datos, mientras lo contrario sucede con las EE La Catalina y La Trinidad.

Tabla 7. Producción media (kg.año⁻¹) de café cereza por planta, del grupo de genotipos evaluados en el experimento A, entre los años 2000 y 2002.

Genotipo	El Rosario	Naranjal	Paraguaicito	Santa Bárbara	Trinidad
BG0459	4,23	3,91	4,96	1,65	5,95
BH0813	4,58	4,70	4,71	1,69	5,59
BH1247	5,63	3,31	4,93	2,42	5,56
BH1409	4,47	3,83	4,16	1,62	5,37
BI0712	5,31	4,61	5,20	1,66	5,16
CU1778	5,51	4,21	4,73	2,41	4,87
CU1792	4,92	2,54	4,76	1,74	5,39
CU1798	4,91	2,50	4,76	1,84	5,25
CU1812	6,7	3,00	5,52	2,85	5,80
CU1815	6,73	2,78	5,58	2,26	6,12
CU1825	5,72	3,00	4,80	2,02	5,19
CU1842	4,75	3,78	4,75	1,74	4,66
CU1843	5,17	2,99	4,95	1,86	5,10
CU1849	5,12	3,49	5,11	1,91	4,85
CU1871	4,85	4,00	4,00	1,42	4,88
CU1911	4,67	3,49	5,30	1,59	5,09
CU1928	4,66	3,62	5,42	1,51	5,57
CU1951	5,39	4,03	4,03	1,77	5,71
CU1953	4,8	3,79	4,62	1,78	4,45
CU1970	4,73	3,76	4,43	1,84	5,79
CU1972	4,46	3,97	5,05	2,08	5,57
CU1991	5,47	3,63	4,75	1,92	5,32
CU1993	4,73	3,73	4,78	1,80	5,52
CU2021	5,14	3,62	5,32	2,35	5,36
CU2034	5,32	3,44	4,58	1,65	5,47
CX2065	4,89	3,72	4,95	2,00	5,10
CX2074	5,54	3,96	5,10	1,82	5,33
CX2171	5,41	2,89	4,81	2,09	5,78
CX2188	5,6	4,37	4,88	1,76	5,58
CX2375	3,9	2,87	4,44	1,35	4,91
CX2385	5,07	3,48	5,04	1,73	5,30
CX2391	4,66	3,27	5,21	1,77	5,52
CX2432	3,84	3,45	4,49	1,95	4,68
CX2567	4,29	4,16	4,89	1,25	3,68
CX2708	4,66	4,49	4,06	1,76	4,86
CX2720	4,73	3,76	4,47	1,63	4,32
CX2866	5,89	3,49	4,96	1,40	6,35
DG0812	5,51	3,98	5,42	1,66	5,06
DH0004	5,22	3,20	5,02	1,80	4,24
TEST1	5,82	4,38	5,15	2,73	6,02

Continúa...

...continuación

Genotipo	El Rosario	Naranjal	Paraguaicito	Santa Bárbara	Trinidad
TEST2	5,33	4,66	5,18	2,64	6,05
TEST3	5,3	4,57	4,65	1,93	5,40
Promedio	5,09	3,68	4,86	1,87	5,28
DMS	0,61	0,56	0,48	0,32	0,51

DMS. Diferencia mínima significativa.

Regresión de cuadrados mínimos parciales.

Ejecutada la rutina PLS descrita por Vargas y Alvarado (62), bajo la plataforma de SAS, con la información fenológica de producción y correlacionadas las respuestas con los indicadores bioclimáticos antes descritos, se aprecian las siguientes respuestas:

Experimento A. Los dos primeros factores explican el 51% de las respuestas del modelo, la Figura 1 representa la información de salida del análisis. Un detalle de las cargas para las variables ambientales, muestran para el primer factor predominio de los indicadores bioclimáticos Atel y TTe1, para el segundo factor predominaron los efectos de DBe2 y e3. El primer factor está relacionado con estímulos de ocurrencia de la floración o períodos de máxima actividad fotosintética y por consiguiente mayor crecimiento (42, 46), mientras en el segundo factor se relacionan con los índices que determinan una eficiencia fisiológica (acumulación de biomasa) durante el desarrollo del fruto (53).

En la Figura 1, los ambientes están representados por los vectores, al final de los cuales el nombre corresponde a las iniciales de cada EE, precedidas por el año. El año 2000 se distancia en la mayoría de EE, al cual le precedieron eventos del fenómeno de La Niña y por alguna razón no se encuentra mayor asociación entre los índices bioclimáticos y la respuesta en ese año en particular.

En la parte superior hacia el centro, se encuentran ambientes de la EE El Rosario, con gran magnitud de sus vectores, lo cual determina alta capacidad de generación de respuestas diferenciales de los genotipos. Para esta EE, los indicadores de DB y DF tienen interacción positiva con los genotipos CX2074, CU1951, CX2385, BH1247, CX2188, CU1815, CU1812, CX2866, CU1825 y DG0812. De manera independiente el año 2000 para esa EE encuentra afinidad con AT y el genotipo CX2171.

En la parte derecha hacia el centro confluyen las EE Paraguaicito y Naranjal. Los genotipos DH0004, BI0712, DG0812, CX2567 y CX2432 estarían relacionados con respuestas positivas a los indicadores de TT, PPe2 y DBe1 de la EE Paraguaicito. La EE Naranjal encuentra mayor afinidad de respuestas diferenciales con DM y DFe2 en 2001 y TT para el año 2002; los genotipos que mejor se expresan en dicha EE corresponden a CX2567, CX2720, BG0459, BI0712, CU1911, BH0813 y BH1409. En el cuadrante superior izquierdo predominan años de La Trinidad los cuales están influenciados por la AT; se destacan por sus respuestas los genotipos CU1815, CU1812, CU1825, CX2866, CX2171 y CX2188. En el cuadrante inferior izquierdo predominan años de la EE Santa Bárbara, la cual presenta poca magnitud de sus vectores ambientales de los años 2001 y 2002, las respuestas diferenciales tienen relación con PPe2 y DFe2. Los genotipos que mejor respuesta expresan en algunos de esos años son BH1409, CU1849 y el testigo2.

Tabla 8. Producción media (kg.año⁻¹) de café cereza por planta, del grupo de genotipos evaluados en el experimento B, entre los años 2007 y 2009.

Familia	La Catalina	Naranjal	Paraguaicito	Pueblo Bello	El Rosario	El Tambo
A170	3,08	3,04	4,57	1,84	3,95	2,86
AX2342	3,00	2,19	3,65	2,75	4,08	1,96
AX2383	3,60	2,32	4,42	2,11	4,90	2,78
AY2557	4,00	2,42	4,03	1,18	3,22	2,45
B1027	3,67	2,81	4,57	1,39	4,25	2,04
B1030	2,96	2,22	4,82	1,51	4,94	2,10
B1047	2,18	2,42	5,85	2,38	2,66	2,05
B1096	2,22	2,60	3,83	2,25	3,41	1,45
B1148	3,39	2,45	5,18	1,66	1,84	1,71
B1160	4,36	3,46	5,80	2,32	3,72	2,77
B1171	2,38	2,14	4,54	1,12	3,20	2,26
B1176	2,17	2,09	4,30	1,97	2,74	1,63
B1233	2,39	2,26	4,26	1,81	3,63	1,95
B1239	2,90	2,07	5,19	1,89	3,16	2,33
B1289	3,38	3,39	5,13	2,25	4,10	3,18
B1290	3,02	2,67	4,64	2,23	3,49	1,45
B1320	2,88	2,46	5,36	1,66	3,41	1,54
B1322	2,99	2,27	5,01	1,65	5,11	2,62
B1340	3,96	2,54	5,55	1,74	3,37	3,04
B1361	2,68	2,32	4,32	1,74	2,77	2,69
B988	3,27	1,87	4,09	1,32	4,08	4,12
B997	3,67	3,63	6,70	1,95	4,80	1,73
B998	3,41	1,97	4,47	1,65	3,14	1,99
Promedio	2,919	2,415	4,694	1,842	3,624	2,209
DMS	1,029	1,118	2,428	0,963	1,694	1,048

DMS. Diferencia mínima significativa.

Experimento B. Los dos primeros factores explicaron el 56% de las respuestas del modelo, la Figura 2 representa la información de salida del análisis. Un detalle de las cargas para las variables ambientales, muestran para el primer factor predominio de las variables ATe1, DBe1 y DFe1, mientras que para el segundo factor predominaron los efectos de las variables DBe0 y DMe2. Con una mayor proporción, el primer factor es explicado por variables que se relacionan con el evento de la floración, mientras en el segundo factor se relaciona con estímulos que desencadenan

la diferenciación floral y pueden afectar el desarrollo del fruto en su etapa inicial.

El genotipo B1361 tiene mérito de adaptación general, pero su potencial de producción es bajo. En el cuadrante superior derecho se encuentran los ambientes de la EE Pueblo Bello, con gran magnitud de sus vectores, los índices de DB y DF, tienen la mayor interacción positiva con los genotipos AX2342, B1047 y B1096. La EE Paraguaicito tendría mayor interacción con los indicadores de TT que influyen en la respuesta de los

Tabla 9. Resumen de los indicadores bioclimáticos obtenidos para cada EE. Promedio de nueve años.

Índice bioclimático	El Tambo	Paraguaicito	La Trinidad	La Catalina	Naranjal	Santa Bárbara	El Rosario	Pueblo Bello
ATe1	44	40	94*	66	66	72	87*	11
ATe2	92	40	101*	65	63	78	97*	49
DBe1	62	59	42	54	55	42	70	111*
DBe3	49	62	64	54	56	51	74	82*
DBe2	59	50	42	42	47	33	63	76*
DFe0	60	76	52	41	22	80*	43	64
DFe1	85	36	58	19	12	31	54	108*
DFe3	43	73	70	34	17	79*	32	33
DFe2	23	42	31	20	12	21	31	53*
DMe0	32	30	42*	36	28	24	26	26
DMe1	8	23	19	24*	21	20	19	4
DMe3	20	15	15	31*	21	7	17	18
DMe2	20	27	32*	24	19	25	18	17
PPe2	996	799	836	1.004	1.087*	920	1.024	808
TTe1	1.090	1.414*	1.209	1.363	1.325	1.171	1.254	1.303
TTe2	1.032	1.455*	1.221	1.372	1.341	1.225	1.266	1.410

*Mayores y menores valores de los indicadores en las diferentes EE La descripción y las unidades en que se expresan se encuentran relacionados en la Tabla 4.

genotipos B1160, B1047, B1148 y B1320. En el cuadrante superior izquierdo confluyen localidades de la EE El Rosario y El Tambo, los cuales están influenciados por la AT y PPe2. Por su parte, los genotipos B1030, AX2383, B1322, B1288 y B988 estarían relacionados con respuestas positivas en los ambientes de ambas EE. En el cuadrante inferior izquierdo predominan localidades de las EE Naranjal y La Catalina, los genotipos que mejor representan su relación con los indicadores bioclimáticos de DM son: AY2557, B1027, B1160, B1047, B1340, B1171 y B997.

DISCUSIÓN

Con la información de dos investigaciones realizadas por la disciplina de Mejoramiento Genético de Cenicafe, que recogieron la mayor variabilidad climática a la cual puede estar sometido un análisis de GxE, es posible explicar el comportamiento en producción de los genotipos evaluados. Estudios realizados

con trigo y algodón que incluyeron covariables ambientales y de manejo, en un análisis similar, encontraron relaciones entre los estados fisiológicos, los factores ambientales o de manejo y las expresiones fenotípicas relacionadas con el rendimiento (20, 49, 52, 65). En los experimentos de la presente investigación los dos primeros factores de la regresión PLS explicaron entre 51% y 56% de la GxE, valores que se aproximan a los obtenidos en otras investigaciones realizadas en trigo, girasol, soya y maíz (9, 20, 67) y más bajos que los obtenidos por Vargas *et al.* (64) en trigo. Sin embargo, las condiciones de esta investigación permiten dar alcance a los últimos avances realizados en el cultivo del café, en los cuales las condiciones ambientales han sido relacionadas con eventos fisiológicos, principalmente hasta la floración.

PLS Experimento A. Las condiciones de La Niña en el año 2000, con casi la totalidad

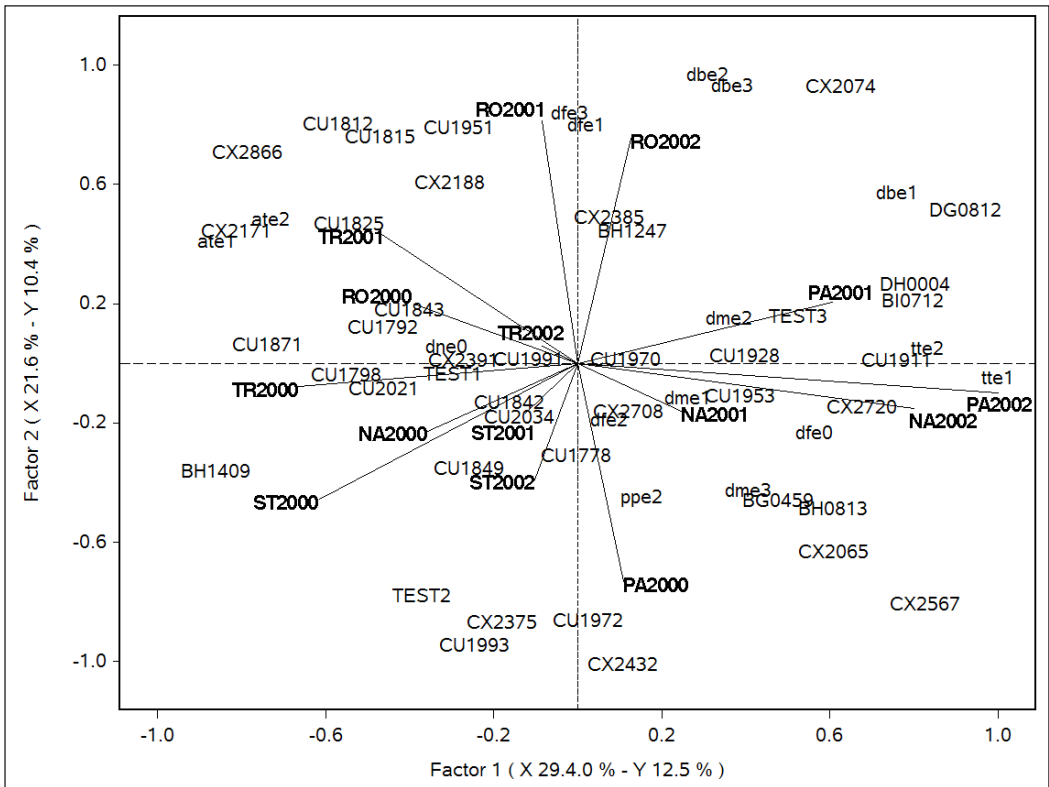


Figura 1. Biplot de los dos primeros factores del PLS, experimento A, que representan los puntajes de 15 ambientes (resaltado) y la carga de los 42 genotipos evaluados, enriquecido con la carga de 16 indicadores bioclimáticos (minúscula). RO: Estación El Rosario; TR: Estación La Trinidad; NA: Estación Naranjal; ST: Estación Santa Bárbara; PA: Estación Paraguaicito; seguidas del año de evaluación.

de los días con AT <10°C, permitieron en la EE El Rosario expresiones productivas sobresalientes de los genotipos CU1815, CU1812 y CX2866. En los siguientes años, especialmente el año 2002, la condición de mayor número de días con DB<7,2 en las fases de desarrollo del fruto y el DFe1 influyeron en la buena expresión de los genotipos, además de los anteriores, CX2074, DG0812 y BH1247. El mayor DFe1 se relacionó con buena expresión de floración, que junto con mayor oferta de radiación en las etapas de desarrollo del fruto, combinada con menor amplitud térmica, favoreció la acumulación de grados día y éstos en la acumulación

de biomasa. La situación no fue mejor en el año 2001 ya que se presentó un período con DF en la Etapa 3.

En la EE Paraguaicito la condición de lluvia bimodal marca la DF hacia mitad y finales de año, que generalmente afectan la tercera y cuarta fase de desarrollo del fruto (6) y repercuten en la concentración de la floración (50), respectivamente. Los períodos de déficit en los años evaluados no se registraron de manera continua, a excepción de 2002, entre julio y agosto, cuando se registraron 35 días con DF. La condición de mayor TT permitió una mayor

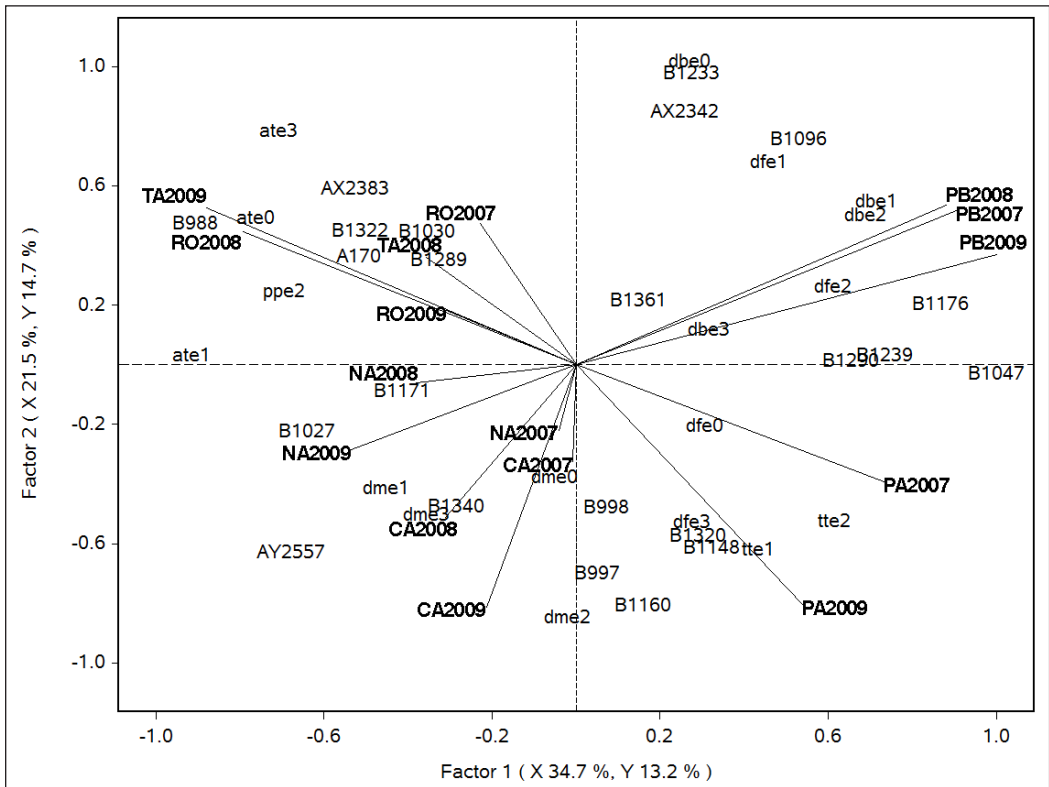


Figura 2. Biplot de los dos primeros factores del PLS, experimento B, que representan los puntajes de 16 ambientes (resaltado) y la carga de 23 genotipos evaluados, enriquecida con la carga de 17 variables ambientales (minúscula). RO: Estación El Rosario; TA: Estación El Tambo; NA: Estación Naranjal; CA: Estación La Catalina; PB: Estación Pueblo Bello; PA: Estación Paraguaicito; seguidas del año de evaluación.

acumulación de biomasa, la cual maximizó los potenciales de producción en el año 2001 de los genotipos CU1911 y DH004 y BI0712 y DG0812 en 2002.

El primer año de producción en la EE Naranjal fue superior y disminuyó a través de los años. En el año 2000, con influencia de La Niña, los indicadores bioclimáticos de DF y DM fueron bajos, se aumentaron los días con AT<10°C y disminuyó el TT, situaciones que permitieron una mejor expresión de la producción, sin que pueda atribuirse a una condición ambiental en particular. El año 2001, en condición de clima normal se

incrementó el DM, sobre todo en la fase final de desarrollo del fruto, los días con AT inferior a 10°C representaron el 50% en las e1 y e3; para este caso la producción fue inferior y pudo estar relacionado con ausencia de suficientes días con estrés hídrico previos a la floración. En el año 2002 la condición de El Niño, aunque favoreció la floración, dado el incremento de DF previo a su expresión y que los valores de TT se incrementaron en más de 100 grados día con respecto al año 2000, la producción fue inferior a la de 2001, sin embargo, los genotipos BI0712 y el BH0813 sobresalieron por su alta producción.

La EE La Trinidad presentó una condición estable en la producción durante los tres años de la investigación aunque con cambio en el orden de mérito de los genotipos. Los genotipos CX2866, CU1815, CU1812 y testigo1, con influencia de los indicadores de ATe1 y ATe2, presentaron las mejores expresiones en producción en todos los años, alternando con ellos los genotipos BG0459, CU1970 y CX2171, como se aprecia en la Figura 1, lo cual es coincidente con la información que se resalta en la Tabla 6 para esta EE. Una observación sobre el patrón de cosecha en esta EE, nos muestra que al contrario de lo reportado por varios autores (39) la concentración de la cosecha se registró en el segundo semestre con fluctuaciones entre 57% y 74% y con picos de cosecha entre los meses de septiembre y noviembre.

La expresión de producción de la EE Santa Bárbara fue baja, la buena oferta climática que se refleja en BS y AT se restringió por más de 73 días con DF en las dos últimas fases de desarrollo del fruto, que probablemente generaron pasillas o granos averanados (6). El análisis de la producción permite observar un comportamiento bianual, reflejado en la caída de un 50% de la producción, entre 2000 y 2001, y un aumento del 240% entre 2001 y 2002. La EE Santa Bárbara también ha sido reportada con su concentración de cosecha en el primer semestre, en el mes de junio (39), para nuestro caso correspondió al segundo semestre, con fluctuaciones entre 55% y 81% de la cosecha anual, con mes pico en octubre.

PLS Experimento B. En la EE Paraguaicito la condición de DF entre julio y septiembre de 2006, concentró la floración entre septiembre y octubre de ese año, que junto con el mayor TT permitió la mejor producción del primer semestre del 2007. Las condiciones de La Niña prevalentes en 2009 favorecieron el desarrollo

normal de las plantas, que regularmente encuentran restricción por temperatura y déficit hídrico. Los indicadores de TT tienen buena relación con las condiciones que imperaron en los años de estudio y permitieron la expresión en producción de los genotipos B1047, B1160 y B997, con producciones superiores a 5.000 kg.ha-año⁻¹ de café pergamino seco.

El grupo conformado por las EE Naranjal y La Catalina presentó la menor restricción al desarrollo del cafeto; por estar ubicadas en las mejores condiciones agroclimáticas, son sensibles a pequeños cambios entre ellos los de DM, principalmente los que ocurren entre cuatro meses previos a la floración y los primeros cuatro meses de desarrollo del fruto. No obstante, las condiciones prevalentes de La Niña, repercutieron en las producciones, la lluvia registrada en 2008 superó en más del 45% al promedio histórico, situación que no permitió una mejor expresión, sobre todo de la floración (10). Las condiciones climáticas previas a la cosecha de 2007 fueron mucho mejores, esta situación se observa en los registros de producción (Tabla 8). En este caso el índice de DM puede interpretarse de dos formas, como un estímulo que se requiere para garantizar eventos como el de la floración del cafeto (6, 39), o como amortiguador de los períodos de mayor régimen pluviométrico, garantizando así condiciones de humedad óptima para el desarrollo del fruto, sobre todo en la Etapa 2, y disminuyendo el excedente con el fin de limitar el desarrollo de patógenos (4). Se presentaron condiciones de nubosidad por encima de 18% de los valores normales en Naranjal, situación que a su vez se combinó con la reducción de las temperaturas máxima media (10). Esta situación implicó para Naranjal pasar de 5 h diarias de brillo solar (28) a 4 h, que sumados al efecto que se presentó en la reducción de la floración,

repercutió finalmente en una disminución de la producción. Lo que puede esperarse de los genotipos B997, B1160, B1027 y AY2557, es que en la medida que las condiciones ambientales mejoren, existirá una mejor respuesta en producción.

Las variables que influenciaron las respuestas en la EE Pueblo Bello, corresponden a los índices de DB y el DFe1 y tienen fuerte relación con los eventos de floración (6, 40, 50), y determina que más del 80% de la producción se registre en los últimos tres meses del año. Existe relación inversa entre el déficit de brillo solar y la cantidad de lluvia. Para la EE Pueblo Bello la época seca se registró con mayor intensidad en los primeros tres meses del año. El índice de DFe1 logra su mayor valor en estos meses, contrario a los valores registrados para el índice de la ATe1. La mayor cantidad de días con DBe1, indica una sobreoferta por efecto de cielo despejado. Puede deducirse, a partir de la información de clima, que aunque se presentaron condiciones de buena disponibilidad de agua posteriores a la floración, la que a su vez estuvo favorecida por la condición normal de tiempo seco en entre enero y marzo (10), la condición de caficultura a la sombra limitó significativamente el potencial productivo, el cual puede reducirse en un 41% con niveles de sombra del 60% (21). En las condiciones antes mencionadas contrastan por su buen desempeño los genotipos B1096, B1047 y AX2342 con producciones de 2.875 kg.ha-año⁻¹ de cps.

Las EE El Tambo y El Rosario aunque contrastan en sus condiciones climáticas y en sus potenciales de producción, el análisis PLS determinó gran asociación de sus respuestas genotípicas con los índices de AT. La información de este índice en particular muestra mayor cantidad de días con AT inferiores a 10° C, situación que se traduce

en menor fluctuación de temperatura. En estudios realizados por Ramírez *et al.* (51), encontraron asociación entre las respuestas a floración en la EE Santander y el índice de AT, situación similar a la observada en los ambientes que conforman estas dos EE.

En la EE El Rosario las condiciones prevalecientes en el período analizado fueron de presencia de La Niña con valores superiores al histórico por encima del 32%, acentuado para el 2008, en el cual se registró reducción de la temperatura máxima media y media y disminución del brillo solar en cerca del 16% (10). Históricamente la AT en la EE El Rosario ha tenido un valor promedio de 8,5° C (32), situación que prevalece. Esa mayor cantidad de días con AT menores a 10 grados, favorecen el proceso fotosintético con superávit de energía, que puede destinarse a crecimiento, pues se reduce la fotorrespiración (42, 46). En condiciones normales de la EE El Rosario pueden expresarse mejores respuestas en producción, por su alto brillo solar, con un promedio anual de 2.048 h y que en el período de estudio fluctuó entre 2.000 y 1.720 h para los años 2007 y 2008, respectivamente (10).

La EE El Tambo, en la que la altitud representa un factor limitante, las temperaturas medias y máxima media son inferiores, con diferencia de un grado con respecto a la EE El Rosario, a su vez existió una diferencia de alrededor de 250 h de brillo solar entre las dos EE, situaciones que revierten las ventajas de un indicador como la AT. Otras situaciones que originaron que la producción no tuviera mejor expresión, estuvieron relacionadas con el alto régimen hídrico, con valores por encima de 21% en el año 2007 y 40% en el 2008 y el primer trimestre de 2009. No obstante, se mantuvieron los períodos de estrés hídrico responsables de la floración para la cosecha principal. La situación no fue mejor

para la oferta de número de días con brillo solar, que disminuyó en 10% y 20% para los años 2007 y 2008, respectivamente (10). Ambas EE comparten la mejor expresión de los genotipos B988, AX2383 y B1030, con producciones en la EE El Rosario que superan en 1,7 veces o más a la EE El Tambo, excepto en el genotipo B988 que su producción es equivalente. La EE Rosario, adicionalmente muestra interacción positiva con el genotipo B1322.

Puede concluirse que:

Las EE experimentales utilizadas en este estudio, relacionadas en torno a la capacidad de originar respuestas diferenciales en producción de los genotipos evaluados, se conforman en siete grupos. Los primeros seis de forma individual, constituidos por las EE El Tambo, Paraguaicito, La Trinidad, Santa Bárbara, El Rosario y Pueblo Bello, un grupo final que asociaría las EE de La Catalina y Naranjal. Por potencial de producción se conformarían tres niveles, el primero con potencial superior, relacionado con las EE El Rosario, Paraguaicito y La Trinidad; un nivel de expresión media conformado por las EE La Catalina y Naranjal y, un nivel de potencial inferior relacionado con las EE El Tambo, Pueblo Bello y Santa Bárbara.

Una consecuencia práctica de los resultados en este sentido, corresponde a la reestructuración de sitios destinados a investigación; para el caso de las EE de la FNC, bajo las consideraciones de este estudio, es posible, dada la similaridad de condiciones agroecológicas y de patrones de respuesta de los genotipos evaluados, definirles actividades estratégicas complementarias. Montagnon *et al.* (44), basados en la evaluación de varios clones de *Coffea canephora* en diferentes ambientes en Costa de Marfil, en los cuales se asoció su respuesta con las condiciones de suelo de

los sitios, encontraron que cuatro estaciones de investigación, representaban el mismo rango de variabilidad que las nueve que se incluyeron en el estudio.

Los indicadores bioclimáticos conforman a su vez cinco grandes grupos, que se relacionan positivamente con las respuestas genotípicas en las EE. Un primer grupo relacionado con indicadores de TT, DFe3 y DFe0, que influyen la mayor parte de los efectos de la EE Paraguaicito. Un segundo grupo conformado por indicadores de DB, DFe1 y DFe2, asociados en su respuesta con las EE Pueblo Bello y El Rosario. Un tercer grupo relacionado con la AT, que definen expresiones diferenciales de los genotipos en ambientes de las EE El Rosario, La Trinidad y El Tambo. Un cuarto grupo que se asocia al indicador de DM y se relaciona directamente con las respuestas en el grupo ambiental conformado por las EE La Catalina y Naranjal. Los indicadores PPe2 y DMe0 se ubican de manera indiferente en localidades de las EE Rosario, Santa Bárbara y Paraguaicito.

En cuanto a las relaciones entre las respuestas de interacción y conforme a la secuencia de análisis, dadas las coincidencias, puede confirmarse la afinidad de los siguientes genotipos con las EE en las cuales se registró el mejor comportamiento estacional (Tabla 10).

El grupo de genotipos propuestos en cada EE tendrían un potencial productivo por año así: para las EE El Tambo presentan una media de 3.625 kg.ha⁻¹ de cps, superior en 35% a la media de la EE. Los genotipos seleccionados en la EE Paraguaicito presentan un potencial medio entre 5.125 y 7.500 kg.ha⁻¹ de cps, superior entre 9% y 27% a la media del ambiente en los experimentos A y B. Los genotipos propuestos para el ambiente integrado por las EE La Catalina

Tabla 10. Conformación de grupos ambientales y adaptación específica de genotipos en la Zona Cafetera Colombiana.

Ambiente	Genotipo o Familia
Pueblo Bello	B1096, AX2342, B1047
El Rosario	CU1815, CU1812, CX2866, DG0812, BH1247, B1030, B1322, AX2383, B988
Naranjal y La Catalina	BI0712, BH0813, CX2708, B997, B1160
La Trinidad	CU1812, CU1815, CX2866.
Paraguaicito	DG0812, BI0712, CU1815, B1047, B1160, B997
El Tambo	B988, B1030, AX2383

y Naranjal estiman una media que fluctúa entre 4.375 y 4.625 kg.ha⁻¹ de cps, que superaría de 25% a 29% el promedio del ambiente combinado en los experimentos A y B, respectivamente. La EE El Rosario, al incluir los genotipos propuestos, alcanzaría 5.875 kg.ha⁻¹ de cps y superaría la media de su ambiente en 32%. La EE Pueblo Bello tendría un potencial de 3.000 kg.ha⁻¹ de cps en promedio, 13% por encima de la media de su ambiente. En la EE La Trinidad los genotipos alcanzarían 5.850 kg.ha⁻¹ de cps, superior en 20% al del ambiente.

En el caso de la Variedad Castillo® Pueblo Bello, hoy cuenta con la representación en dos de las tres familias propuestas, por lo cual podría adicionársele el genotipo DT205 de la familia AX2342 y aumentar a cinco progenies la composición actual. La Variedad Castillo® El Rosario, cuenta hoy en su conformación con 11 genotipos, cuatro de los cuales se mencionan como candidatos; a partir de los resultados de este estudio, cuatro genotipos adicionales pueden complementar la mezcla así: DG0812, CU1784 (Familia B988), CU1871-75 (Familia B1030), CX2197 (Familia B1322), DT29 (Familia AX2383). La Variedad Castillo® Naranjal, constituida con 11 genotipos, tiene posibilidades de aumentarse en cuatro más, BI0712, BH0813, CX2708 y CU1903 (Familia B1160). Once genotipos constituyen la Variedad Castillo® Paraguaicito, tres de ellos dentro de los

propuestos para complementarla; de esta forma a la variedad se le adicionarían los genotipos DG0812, CX2848 (Familia B1047) y CU1903 (Familia B1160). La Variedad Castillo® La Trinidad ratifica los genotipos que hoy la constituyen. A los genotipos que actualmente constituyen La Variedad Castillo® El Tambo se le pueden adicionar los genotipos CU1784 (Familia B988), CU1871-75 (Familia B1030) y DT29 (Familia AX2383), que también fueron propuestos en La Variedad Castillo® El Rosario, por compartir la respuesta sobre indicadores agroclimáticos similares.

Los rangos de la producción potencial estuvieron relacionados con las condiciones de clima que prevalecieron durante el desarrollo de los experimentos, el caso más crítico le correspondió al Experimento B, realizado en condiciones de La Niña, en la otra investigación se combinaron los eventos La Niña, Neutro y El Niño, los cuales favorecieron el desempeño de los genotipos. Lo anterior demuestra que los genotipos en cada condición mostraron grados de adaptación que los candidatizan para hacer parte de las variedades regionales.

Las situaciones descritas con anterioridad evidencian la estabilidad que se lograría en la producción, cuando se conforman mezclas, en la cual actúa un amortiguamiento poblacional (1). En el presente caso, una propuesta de conformación de grupos de genotipos con adaptación general y específica fortalecerá

la dinámica de las Variedades Castillo® Regionales (3).

El análisis anterior, aunque muestra asociación de las variables ambientales con las expresiones fenotípicas de los materiales evaluados en cada EE, ellas no actúan solas, como pudo observarse en la discusión, otras variables limitaron o actuaron sinérgicamente con la variable ambiental predominante. El análisis de otros experimentos que incluyan igualmente genotipos estables y ambientes específicos contrastantes con los evaluados en este estudio, permitirá observar la dinámica de las variables ambientales y su efecto en las respuestas diferenciales de los genotipos, lo cual dará una mejor visión de las dinámicas propias de éstos cuando se someten a condiciones cambiantes de clima.

Las metodologías de análisis aquí utilizadas, son complementarias y, en conjunto, permiten realizar una mejor discusión de los resultados con mayor soporte estadístico. Es apenas lógico que en la medida que se integren a las evaluaciones mayor número de expresiones fenológicas y covariables de clima o de suelo, puede darse mayor soporte en las metodologías de análisis, lo que redundará en mayor precisión y confiabilidad de las respuestas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los Coordinadores de las EE de Cenicafé y las personas que estuvieron a cargo del desarrollo agronómico y registro información en el campo. Al técnico Jairo Jaramillo por la consolidación de los datos, a la disciplina de Agroclimatología por facilitar la información histórica

de clima consolidada y revisada. A los investigadores Víctor Hugo Ramírez y Andrés J. Peña, por su asesoría en la construcción de los indicadores bioclimáticos y en la interpretación de sus respuestas al constituirse como covariables ambientales.

LITERATURA CITADA

1. ALLARD, R.; BRADSHAW, A. Implications of genotype-environmental interactions in applied plant breeding. *Crop science* 4:503-508. 1964.
2. ALLEN, R.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Roma : FAO, 1998. 301 p.
3. ALVARADO, G.; POSADA, H.; CORTINA, H. Las variedades Castillo ® regionales: Variedades de café (*Coffea arabica* L.) con alta productividad, elevada resistencia a enfermedades y adaptación específica. *Fitotecnica colombiana* 8(1):22-38. 2008.
4. ARCILA P., J. Factores que determinan la productividad del cafetal. p. 61-86. En: ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. *Sistemas de producción de café en Colombia*. Chinchiná : CENICAFÉ, 2007. 309 p.
5. ARCILAP., J.; BUHR, L.; BLEIHOLDER, H.; HACK, H.; WICKE, H. Application of the "Extended BBCH - Scale" for the description of the growth stages of coffee (*Coffea* sp.). *Chinchina : Cenicafé*, 2001. 32 p.
6. ARCILA P., J.; JARAMILLO, A. Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del café. *Chinchiná : Cenicafé*, 2003. 8 p. (*Avances Técnicos* No. 311).
7. ARCILA P., J.; JARAMILLO, A.; BALDIÓN, J.; BUSTILLO, A. La floración del café y su relación con el control de la broca. *Chinchiná : Cenicafé*, 1993. 6 p. (*Avances Técnicos* No. 193).
8. BAKER, R.J. Tests for crossover genotype-environmental interactions. *Canadian journal of plant science* 68(2):405-410. 1988.
9. BALALIC, I.; ZORIC, M.; CRNOBARAC, J. Interpretation of interactions in sunflower agronomic trials using multiplicative models and climatic information. *Helia* 31(49):51-64. 2008.

10. BALDIÓN, J.; JARAMILLO, A.; GUZMÁN, O. Comportamiento del clima durante el período enero/2007 - junio/2009 en la zona cafetera colombiana. Chinchiná : Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2009. 47 p.
11. BECKER, H.C. Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica* 30(3):835-840. 1981.
12. BORÉM, A.; VIEIRA, G. Melhoramento de plantas. 4a. ed. Viçosa : Universidade Federal de Viçosa, 2005.
13. CAMARGO, A.; CAMARGO, M. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia* 60(1):65-68. 2001.
14. CAMARGO, M.; ROLIM, G.; SANTOS, M. Modelagem agroclimatológica do café: Estimativa e mapeamento das produtividades. *Informe agropecuario* 28(241):58-65. 2007.
15. CAMAYO, G.; CHAVES, B.; ARCILA, J.; JARAMILLO, A. Desarrollo floral del cafeto y su relación con las condiciones climáticas de Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 54(1):35-49. 2003.
16. CARAMORI, P.; FILHO, A.; MORAIS, H.; FILHO, F.; DUQUIA, C. Sistema de aleta pars geadas na cafeicultura do Paraná. *Informe agropecuario* 28(241):66-71. 2007.
17. CARVALHO, H.; MELO, B.; RABELO, P.; SILVA, C.; CAMARGO, R. Índices bioclimáticos para a cultura de café. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental* 15(6):601-606. 2011.
18. CROSSA, J.; VARGAS, M.; VAN E, F.; JIANG, C.; EDMÉADES, G.; HOISINGTON, D. Interpreting genotype x environment interaction in tropical maize using linked molecular markers and environmental covariables. *Theoretical and applied genetics* 99:611-625. 1999.
19. DAMATTA, F.; RONCHI, R.; MAESTRI, M.; BARROS, R. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian journal of plant physiology* 19(4):485-510. 2007.
20. DODIG, D.; ZORIC, M.; KNEZEVIS, D.; DIMITRIJEVIC, B.; ŠURLAN M., G. Assessing wheat performance using environmental information. *Genetika* 39(3):413-425. 2007.
21. FARFÁN, F.F.; MESTRE, A. Fertilización del café en un sistema agroforestal en la zona cafetera del norte de Colombia. *Cenicafé* 55(3):232-245. 2004.
22. FNC. Productores y cultivo de café en Colombia. [En línea]. Bogotá : La Federación, (s.f.). Disponible en internet: [Http://sales.cafedecolombia.com/irj/portal](http://sales.cafedecolombia.com/irj/portal). Consultado el 21 de Mayo de 2012.
23. FNC. Producción y exportaciones de café de Colombia siguen creciendo - Feb 2015. [En línea]. Bogotá : La Federación, (s.f.). Disponible en internet: [Http://www.cafedecolombia.com/cci-fnc-es/index.php/comments/](http://www.cafedecolombia.com/cci-fnc-es/index.php/comments/). Consultado el 6 de Octubre de 2015.
24. GABRIEL, K.R. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika* 58(3):453-467. 1971.
25. GAUCH, H., JR. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs. Amsterdam : Elsevier science, 1992.
26. GÓMEZ, L.; CABALLERO, A.; BALDIÓN, J. Ecotopos cafeteros de Colombia. Bogotá : FNC, 1991. 131 p.
27. GÓMEZ, L.; GUZMÁN, O. Relación empírica entre la radiación solar global y el brillo solar en el área de Cenicafé, Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 46(4):205-218. 1995.
28. GUZMÁN, O.; GÓMEZ, L. Caracterización del brillo solar en Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 48(1):26-39. 1997.
29. JARAMILLO, A. Balance hídrico de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 33(1):15-28. 1982.
30. JARAMILLO, A. Climatología de las regiones cafeteras: Microclima y fenología del cultivo del café. Chinchiná : Cenicafé : FNC, 1999. 156 p.
31. JARAMILLO, A. Distribución de la lluvia dentro de los cafetales. Manizales : Cenicafé, 1999. 4 p. (Avances Técnicos No. 262).
32. JARAMILLO, A. Clima andino y café en Colombia. Chinchiná : FNC : Cenicafé, 2005.
33. JARAMILLO, A. Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. *Cenicafé* 57(4):282-298. 2006.
34. JARAMILLO, A.; ARCILA, J. Épocas recomendables para la siembra de los cafetos. Manizales : Cenicafé, 1996. 8 p. (Avances Técnicos No. 229).

35. JARAMILLO, A.; CHAVES, B. Interceptación de lluvia en un bosque y en plantaciones de *coffea Arabica* L. *Cenicafé* 49(2):129-135. 1998.
36. JARAMILLO, A.; CHAVES, B. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*coffea Arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Cenicafé* 50(2):97-105. 1999.
37. JARAMILLO, A.; GUZMÁN, O. Relación entre la temperatura y el crecimiento en *coffea Arabica* L., variedad caturra. *Cenicafé* 35(3):57-65. 1984.
38. JARAMILLO, A.; GÓMEZ, O. Desarrollo de una aplicación de cómputo para el cálculo de balance hídrico en cafetales. Chinchiná : *Cenicafé*, 2002.
39. JARAMILLO, A.; RAMÍREZ, V.; ARCILA, J. Distribución de la lluvia, clave para planificar las labores en el cultivo del café en Colombia. Chinchiná : *Cenicafé*, 2011. 8 p. (Avances Técnicos No. 411).
40. JARAMILLO, A.; VALENCIA, G. Los elementos climáticos y el desarrollo de *Coffea arabica* L., en Chinchiná, Colombia. *Cenicafé* 31(4):127-143. 1980.
41. KROONENBERG, P. Introduction to biplots for GxE tables. Brisbane : University of Queensland, 1997.
42. LAMBERS, H.; CHAPIN III, F.; PONS, T. Plant physiological ecology. New York : Springer, 1998.
43. MEIRELES, E.; VOLPATO, M.; ALVES, H.; VIEIRA, T. Zoneamento agroclimático: Um estudo de caso para o café. *Informe agropecuario* 28(241):50-57. 2007.
44. MONTAGNON, C.; CILAS, C.; LEROY, T.; YAPO, A.; CHARMETANT, P. Genotype-location interactions for *coffea Canephora* yield in the Ivory coast. *Agonomie* 20(1):101-109. 2000.
45. MONTOYA, E.; ARCILA P., J.; JARAMILLO, A.; RIAÑO, N.; QUIROGA, F. Modelo para simular la producción potencial del café en Colombia. *Manizales : Cenicafé*, 2009. 52 p. (Boletín Técnico No. 33).
46. MOSQUERA, L.; RIAÑO, N.; ARCILAP., J.; PONCE, C. Fotosíntesis, respiración y fotorrespiración en hojas de café *Coffea* sp. *Cenicafé* 50(3):215-211. 1999.
47. NUNES, F.; CAMARGO, M.; FAZUOLI, L.; ROLIM, G.; PEZZOPANE, J. Modelos agrometeorológicos de estimativa da duração do estágio floração-maturação para três cultivares de café arábica. *Bragantia* 69(4):1011-1018. 2010.
48. PEZZOPANE, J.; PEDRO J., M.; CAMARGO, M.; FAZUOLI, L. Exigencia térmica do café arábica CV. Mundo novo no subperíodo florescimento - colheita. *Ciencia e agrotecnologia* 32(6):1781-1786. 2008.
49. PING, J.; GREEN, C.; BRONSON, K.; ZARTMAN, R.; DOBERMANN, A. Identification of relationships between cotton yield, quality, and soil properties. *Agronomy journal* 96(6):1588-1597. 2004.
50. RAMÍREZ, V.; JARAMILLO, A.; ARCILA, J. Rangos adecuados de lluvia para el cultivo de café en Colombia. *Manizales : Cenicafé*, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 395).
51. RAMÍREZ, V.; ARCILA P., J.; JARAMILLO, A.; RENDÓN, J.; CUESTA, G.; MENZA, H. Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica, térmica y de brillo solar. *Cenicafé* 61(2):132-158. 2010.
52. REYNOLDS, M.; TRETOWAN, R.; CROSSA, J.; VARGAS, M.; SAYRE, K. Physiological factors associated with genotype by environment interaction in wheat. *Field crops research* 85:253-274. 2004.
53. RIAÑO, N.; ARCILA, J.; JARAMILLO, A.; CHAVES, B. Acumulación de materia seca y extracción de nutrientes por *Coffea arabica* L. cv. Colombia, en tres localidades de la zona cafetera central. *Cenicafé* 55(4):265-276. 2004.
54. ROMAGOSA, I.; FOX, P.N. Genotype x environment interaction and adaptation. p. 373-390. En: HAYWARD, M.D.; BOSEMARK, N.O.; ROMAGOSA, T. *Plant breeding: Principles and prospects*. London : Chapman and Hall, 1993.
55. SANTOS, M.; CAMARGO, M. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro. *Bragantia* 65(1):173-183. 2006.
56. SAS. Statistical software: SAS/STAT Version 9.2. *North Carolina : SAS Institute : Cary*, 2012.
57. SILVA F., E.; SANTOS, B.; EVANGELISTA, E.; ASSAD, H.; PINTO, J.; ZULLO, O., JR.; CORAL, G. Delimitação das áreas aptas do ponto de vista agroclimático para o plantio da cultura do café (*Coffea arabica*) no estado de Goiás. p. 123-125. [Brasília] : Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil : Embrapa, 2000.

58. TROJER, H. El ambiente climatológico y el cultivo del café en Colombia: Problemas, conocimientos actuales y perspectivas. *Cenicafé* 5(57):22-37. 1954.
59. TROJER, H. The phenological equator for coffee planting in Colombia. París : Agrometeorological methods proceedings of the reading symposium, 1968.
60. VALLEJO C., F.; ESPITIA C., M.; ESTRADA S., E.; RAMÍREZ, H. Genética vegetal. Palmira : Universidad Nacional de Colombia, 2010.
61. VANE., F. Genotype by environment interaction: Basics and beyond. p. 156-170. En: LAMKEY, K.; LEE, M. Plant breeding. Iowa : Blackwell, 2006.
62. VARGAS, M.; ALVARADO, G. Memorias curso de análisis e interpretación de diseños experimentales y diseños genéticos aplicados al mejoramiento de plantas. Palmira : CIAT : CIMMYT, 2011.
63. VARGAS, M.; CROSSA, J. El análisis AMMI y la gráfica Biplot en SAS. Mexico : CIMMYT, 2000. 42 p.
64. VARGAS, M.; CROSSA, J.; VAN E., F.; RAMÍREZ, M.E.; SAYRE, K. Using partials least squares, factorial regression and AMMI models for interpreting genotype x environment interaction. *Crop science* 39(4):955-967. 1999.
65. VARGAS, M.; CROSSA, J.; VAN E., F.; SAYRE, K.; REYNOLDS, M. Interpreting treatment x environment interaction in agronomy trials. *Agronomy journal* 93(4):949-960. 2001.
66. VELÁSQUEZ, S.; JARAMILLO, A. Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé* 60(2):148-160. 2009.
67. WILLIAMS, C.; LIEBMAN, M.; EDWARDS, J.; JAMES, D.; SINGER, J.; ARRIT, R. Patterns of regional yield stability in association with regional environmental characteristics. *Crop science* 48(4):1545-1559. 2008.
68. YAN, W.; KANG, M. GGE biplot analysis, a graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. London : New York, 2003.

LAS MOSCAS DE LAS FRUTAS DE LA ZONA CENTRAL CAFETERA DE COLOMBIA Y SU CLAVE ILUSTRADA

Marisol Giraldo Jaramillo*; Pablo Benavides Machado*; José Raúl Rendón Sáenz**;
Diego Fabián Montoya***; Fernando Farfán Valencia**; Jhon Félix Trejos Pinzón***

GIRALDO J., M.; BENAVIDES M., P.; RENDÓN S., J.R.; MONTOYA, D.F.; FARFÁN V., F.; TREJOS P., J.F. Las moscas de las frutas de la zona central cafetera de Colombia y su clave ilustrada. Revista Cenicafé 66 (2): 58-72. 2015

Las moscas de las frutas han sido reportadas como insectos plagas de cafetales en algunos países. En Colombia, existen algunos reportes del impacto que la mosca del Mediterráneo podría ocasionar en los cultivos de café; sin embargo, actualmente no son consideradas plagas de importancia económica. Los objetivos de este estudio fueron identificar las especies de moscas de las frutas de la familia Tephritidae en cafetales de la zona central de Colombia y elaborar una clave ilustrada para la identificación de estas especies. Se recolectaron moscas de las frutas durante 21 meses, a partir de trampas tipo McPhail, cebadas con proteína hidrolizada y en frutos de café, en seis fincas cafeteras de los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío y Valle del Cauca, en cultivos de café con tres sistemas de producción: plena exposición solar, sombrío y producción orgánica. Se identificaron las especies de moscas de las frutas y se ilustraron en una clave de acuerdo a sus caracteres morfológicos. En total, se identificaron nueve especies del género *Anastrepha* y una del género *Toxotrypana*. Del primer género, *A. fraterculus* comprendió el 99,9% de todos los especímenes encontrados en los frutos de café. Se presenta la clave ilustrada para la identificación de especies de moscas de las frutas de la zona central cafetera de Colombia.

Palabras clave: Plagas del café, mosca del Mediterráneo, Diptera, Tephritidae, *Coffea arabica*.

FRUIT FLIES OF THE CENTRAL COFFEE ZONE OF COLOMBIA AND ILLUSTRATED KEY

Fruit flies have been reported as insect pests of coffee crops in some countries. In Colombia, there are some reports of the impact that Medfly might have on coffee crops. However, currently such insects are not considered pests of economic importance. The objectives of this study were to identify the species of fruit flies of the *Tephritidae* family in coffee plantations of the central zone of Colombia and to develop an illustrated key to identify these species. Fruit flies were collected for 21 months from McPhail traps baited with hydrolyzed protein and from coffee berries in six coffee farms located in the departments of Caldas, Risaralda, Quindío and Valle del Cauca. Those farms counted on coffee crops with three production systems: unshaded, shaded and organic. Species of fruit flies were identified and illustrated in a key according to their morphological characters. In total, nine species of the *Anastrepha* genus and one of the *Toxotrypana* genus were identified. From the former genus, *A. fraterculus* represented 99.9% of all specimens found in coffee cherries. The illustrated key for the identification of fruit flies species of the central coffee zone of Colombia is shown.

Keywords: Coffee pests, Mediterranean fruit fly, Diptera, Tephritidae, *Coffea arabica*.

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

** Asistente de Investigación e Investigador Científico II, respectivamente, Disciplina de Fitotecnia, Cenicafé.

*** Asistente de Investigación, Disciplina de Experimentación, Cenicafé.

Las moscas de las frutas son consideradas la principal plaga en cultivos de frutas a nivel mundial y se distribuyen en el trópico y sub-trópico. Pertenecen al orden Diptera, familia Tephritidae y comprenden 481 géneros con 4.352 especies conocidas (19).

Las especies de moscas de las frutas, cuyas larvas se desarrollan en los frutos, son las más estudiadas, pues forman el grupo de insectos plaga de mayor importancia económica para la fruticultura en todo el mundo (5). Los géneros más importantes son *Anastrepha* Schiner, *Bactrocera* Macquart, *Ceratitis* Macleay, *Rhagoletis* Loew y *Toxotrypana* Gerstaecker, porque además de causar daños directos, se constituyen en la principal barrera fitosanitaria para el comercio mundial de frutas y hortalizas (30).

Anastrepha es el género más numeroso de la familia Tephritidae, es originario de América tropical con cerca de 200 especies y reúne las especies económicamente más importantes, destacándose entre otras: *A. fraterculus* (Wied.), *A. ludens* (Loew) y *A. suspensa* (Loew) (21). Las especies de *Anastrepha* son polífagas, pues atacan diversas especies de frutos, además presentan amplia distribución y frecuencias en las regiones donde ocurren (20).

En Colombia están registradas 50 especies de *Anastrepha* (13), de las cuales cinco poseen importancia cuarentenaria: *A. fraterculus* (Wied.), *A. grandis* (Macquart), *A. obliqua* (Macquart), *A. striata* Schiner y *A. serpentina* (Wied.) (16).

En el cultivo del café, las moscas de las frutas han sido registradas en diferentes regiones del mundo (30). *Ceratitis capitata* (Wied.) llamada comúnmente mosca del Mediterráneo, es reportada como plaga en el cultivo del café en otros países (1). En Brasil presenta

importancia económica en los cultivos de café de Bahía y Minas Gerais (8, 10), São Paulo (24) y Río de Janeiro (2). Igualmente, se reportan otras especies de moscas de las frutas de las especies *A. fraterculus* y *A. sororcula*. De acuerdo con diferentes autores en Brasil, el ataque de *C. capitata* en café, hace que el proceso de maduración del fruto se acelere, trayendo como consecuencia frutos de menor calidad; a la fecha no existen reportes sobre el efecto de infestación de *Anastrepha* spp. (9, 17, 25, 29), en el caso de Colombia, esta especie de mosca de las frutas aún se encuentra restringida y solo se ha reportado en cafetales de Nariño (23) y Antioquia (6), y la presencia de un número elevado de parasitoides nativo contribuye con el control natural de las especies de *Anastrepha* spp.

En Colombia en el cultivo de café se reportan *A. striata* y *A. fraterculus* en tres municipios de la Provincia de Vélez en Santander (22). La información disponible en Colombia sobre daños de las moscas de las frutas es escasa, ya que no se ha detectado daño en la almendra, pues las larvas solo causan daño físico directo en la pulpa de la cereza de café cuando se alimentan de ésta, pero Portilla *et al.* (23) en el departamento de Nariño, encontraron daño traducido en caída de frutos por *C. capitata* del 69,86%, cuando utilizaron plantas aisladas con jaulas de malla y se indujo infestación, pero en el campo abierto el daño para *C. capitata* fue del 23,73% y de 3,47% para *A. fraterculus*.

Índices faunísticos

El número total de individuos muestreados de una determinada área y el análisis cuantitativo de la diversidad han sido muy empleados en estudios faunísticos. En Colombia no se han desarrollado este tipo de trabajos en moscas de las frutas, pero en otros

países donde se han conducido estudios en cultivos comerciales con prevalencia de varias especies, solo una o dos fueron consideradas dominantes e influenciadas principalmente por factores ecológicos tales como abundancia y riqueza de las especies de plantas hospedantes, la complejidad de los cultivos y los agroecosistemas adyacentes (3, 27). Trabajos adelantados en Brasil en el Recôncavo Bahiano muestran especies dominantes como *A. fraterculus*, *A. obliqua* y *A. sororcula* de un total de 20 especies del género *Anastrepha* presentes (18). Igualmente *A. fraterculus* y *C. capitata* fueron las especies dominantes en tres municipios del estado de São Paulo en diferentes cultivos, entre ellos café (7).

Identificación de las especies de moscas de las frutas

Para identificar las diferentes especies de Tephritidae, se utilizan características morfológicas de cabeza, alas, tórax y el ápice del acúleo de la genitalia de las hembras; siendo el aspecto general del ápice del acúleo el principal carácter diagnóstico para la identificación específica (31).

Los objetivos de este trabajo fueron identificar las especies de moscas de las frutas de la familia Tephritidae en cafetales de la zona central de Colombia, determinar algunos índices faunísticos y generar una clave ilustrada para la identificación de especies de moscas de las frutas de esta región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio. Las moscas de las frutas fueron recolectadas en seis fincas cafeteras de cuatro departamentos: Caldas (3), Risaralda (1), Quindío (1) y Norte del Valle del Cauca (1), en cultivos de café con sistemas de producción a plena exposición, con sombrío

y producción orgánica, ubicados en cuatro altitudes (Tabla 1). Los sistemas agroforestales con café estuvieron establecidos con sombrío de aguacate (*Persea americana*), guamos (*Inga* spp.), guayaba (*Psidium guajava*) y mango (*Mangifera indica*).

Recolección e identificación de especímenes en trampas. En cada sitio, durante 21 meses desde enero de 2010 hasta octubre de 2011, se recolectaron especímenes adultos de moscas de las frutas en trampas tipo McPhail (Better World Manufacturing®) cebadas con atrayente alimenticio (proteína hidrolizada de maíz al 5%, Cebofrut®Agrobiológicos SAFER). Fueron instaladas cuatro trampas por cada finca en un área aproximada de una hectárea. La proteína hidrolizada fue sustituida semanalmente, de acuerdo a las recomendaciones dadas por el fabricante. Semanalmente, se realizó la recolección de los insectos capturados en cada trampa, los cuales se contaron, se separaron por sexo, se etiquetaron y se almacenaron en viales de vidrio conteniendo etanol al 70%, para su posterior identificación. Para la identificación de las especies de moscas capturadas solo se utilizaron las hembras, debido a que los machos, en general, no presentan caracteres diagnósticos para identificación específica.

La identificación se basó en las características morfológicas de alas, mediotergito y ápice del acúleo, utilizando las claves taxonómicas de Zucchi (32) y Korytkowski (14). Los especímenes fueron depositados en la Colección del Museo Entomológico Marcial Benavides de Cenicafe, luego cada especie fue identificada con una clave ilustrada, con base a los caracteres morfológicos antes mencionados. Las fotografías del tórax y alas de los adultos se realizaron con cámara digital acoplada a un estereoscopio (Leica® 1x);

Tabla 1. Sitios de muestreo de moscas de las frutas en tres sistemas de producción de café, a diferentes altitudes de la zona central cafetera de Colombia.

Nombre finca	Coordenadas	Municipio	Departamento	Altitud (m)	Variedad	Sistema de producción
La Camelia	N 05°07'15" W-75°32'49"	Manizales	Caldas	1.450	Caturra-Colombia	Sombrío tradicional
Estación Experimental Naranjal	N 04°59' W-75°36'	Palestina	Caldas	1.400	Castillo®	Plena exposición
Estación Experimental Naranjal	N 04°59' W-75°36'	Palestina	Caldas	1.400	Castillo®	Sombrío orgánico
Estación Experimental La Catalina	N 04°45' W-75°44'	Pereira	Risaralda	1.321	Castillo®	Plena exposición
Estación Experimental Paraguaicito	N 04°23' 42" W-75°44' 1,29"	Buena vista	Quindío	1.203	Castillo®	Plena exposición
Las Margaritas	N 04°23'01,8" W-76°15'29,1"	Bolívar	Valle del Cauca	1.650	Caturra	Sombrío tradicional

para el caso de los acúleos, se utilizó un microscopio electrónico de barrido de presión variable (LEO 435 VP SEM) de la escuela superior de agricultura Luiz de Queiroz de la Universidad de Sao Paulo en Brasil.

Análisis faunístico. Se determinaron diferentes parámetros de acuerdo a Silveira -Neto *et al.* (26), Ludwig y Reynolds (15), así:

Frecuencia: Se calculó de acuerdo con la Ecuación <1>

$$P_i = n_i/N <1>$$

Donde, n_i : número de individuos de una especie i y N : total de individuos de la muestra, se realizó para cada uno de los sistemas de cultivo en cada fecha de muestreo.

Porcentaje de frecuencia: Porcentaje de muestras en las que una determinada especie estuvo

presente. Para el cálculo del porcentaje de frecuencia se tuvo en cuenta la Ecuación <2>.

$$C = n_i \times 100/N <2>$$

Donde, n_i : número de muestras con la especie i y N el número total de muestras tomadas.

De acuerdo a los valores obtenidos se tiene que:

- Una especie muy frecuente (MF) es aquella que está presente en más del 50% de las muestras.
- Una especie frecuente (F)–está presente entre 25% y 50% de las muestras.
- Una especie poco frecuente (PF) está presente en menos del 25% de las muestras.

Muestreo de frutos de café. Mensualmente, en los árboles donde estaban instaladas las trampas, se tomaron 500 frutos de café

sanos de más de 150 días de formación, mediante un muestreo sistemático de uno en diez árboles. Éstos se transportaron a Cenicafé en bolsas de polietileno, etiquetadas con los datos de recolección. Los frutos se desinfectaron separadamente, en solución de hipoclorito de sodio al 5%, durante 15 min. y se pesaron, se colocaron en cajas plásticas de 35 x 35 x 13 cm, con tapa provista de un área de 25 x 25 cm cubierta con malla plástica de ocho hilos por cada centímetro para aireación, éstas contenían una capa de 5 cm de altura de vermiculita estéril. Las cajas se etiquetaron con todos los datos de recolección y se dejaron en estantes en el laboratorio de Entomología de Cenicafé, a 22°C y 70-80% H.R, hasta la emergencia de los adultos, para su posterior identificación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fueron capturadas y examinadas 23.868 hembras adultas del género *Anastrepha*, 14 especímenes del género *Toxotrypana* y no se encontró algún espécimen del género *Ceratitidis*. Se identificaron nueve especies del género *Anastrepha*: *A. pallidipennis* Greene, *A. distincta* Greene, *A. fraterculus* (Wied.), *A. obliqua* (Macquart), *A. grandis* (Macquart), *A. leptozona* Hendel, *A. mucronota* Stone, *A. striata* Schiner y *A. manihoti* Lima, pertenecientes a siete grupos infragenéricos (Tabla 2). Se elaboró una clave dicotómica ilustrada, para el proceso de identificación de los géneros y las especies presentes en la región central cafetera de Colombia.

De las nueve especies de *Anastrepha* encontradas, sólo dos han sido asociadas con el cultivo del café en Colombia, *A. fraterculus* y *A. striata* (22); en este estudio *A. fraterculus* presentó la mayor frecuencia con 71%, seguida con 13% por *A. striata*, 10% *A. distincta* y las seis especies restantes

que en su conjunto representaron el 6% del total de las capturas, en los tres sistemas de producción muestreados.

Tabla 2. Especies de moscas de las frutas del género *Anastrepha* y sus grupos infragenéricos, encontradas en tres sistemas de producción de café de la zona central cafetera de Colombia.

Grupos infragenéricos	Especies
Benjamini	<i>A. pallidipennis</i> Greene
Fraterculus	<i>A. distincta</i> Greene
	<i>A. fraterculus</i> (Wied.)
	<i>A. obliqua</i> (Macquart)
	<i>A. grandis</i> (Macquart)
Grandis	<i>A. grandis</i> (Macquart)
Leptozona	<i>A. leptozona</i> Hendel
Mucronota	<i>A. mucronota</i> Stone
Striata	<i>A. striata</i> Schiner
Spatulata	<i>A. manihoti</i> Lima

Análisis faunísticos. De las especies capturadas en los tres sistemas de producción, *A. fraterculus* fue la especie más frecuente (>80%) y constante (Tablas 3 y 4). De acuerdo con Aluja *et al.* (4), a pesar de que existen varias especies de mosca de las frutas presentes en un cultivo, solamente una o dos especies representarán más de 85% de las moscas capturadas en las trampas, esta situación se evidenció en este trabajo, por ejemplo en el sistema de producción con sombrío tradicional *A. fraterculus* y *A. striata* fueron las especies más frecuentes, en los otros dos sistemas *A. fraterculus* presentó más del 90% del total de las moscas capturadas.

En cuanto al índice de frecuencia, se encontró que *A. fraterculus* es una especie muy frecuente para los tres sistemas de producción, y *A. distincta* es muy frecuente y frecuente en los sistemas orgánico y tradicional con sombrío (Tabla 4); esto puede ser explicado dado que en estos sistemas la especie *Inga* spp. es frecuentemente utilizada como sombrío

Tabla 3. Frecuencia de *Anastrepha* spp. y *T. curvicauda* capturada en trampas McPhail, en tres sistemas de producción de café.

Mosca de las frutas especies	N	Frecuencia %		
		Sombrío tradicional	Plena exposición	Orgánico con sombrío
<i>A. fraterculus</i>	17.204	80,36	94,51	90,89
<i>A. obliqua</i>	743	6,41	0	0,08
<i>A. striata</i>	2.998	7,29	0,69	3,38
<i>A. distincta</i>	2.349	3,73	4,80	5,53
<i>A. mucronota</i>	429	1,12	0	0
<i>A. grandis</i>	54	0,44	0	0,1
<i>A. leptozona</i>	59	0,41	0	0,02
<i>A. manihoti</i>	14	0,1	0	0
<i>A. pallidipennis</i>	4	0,02	0	0
<i>T. curvicauda</i>	14	0,12	0	0,01

n: Número total de especímenes.

(11), siendo reportada como hospedante de esta mosca (30). Las otras especies restantes son consideradas como poco frecuentes, lo cual indica que la presencia de estas especies está condicionada con la disponibilidad de hospedantes o al movimiento que se presenta entre cultivos por la búsqueda de sitios de oviposición.

La frecuencia de las especies de moscas de las frutas son influenciadas principalmente por factores ecológicos, donde es condicionada por la abundancia y riqueza de las especies de plantas hospedantes (3, 27), esta situación se observa en los sistemas de producción con sombrío, donde se observa una mayor variedad de posibles hospedantes, creando agroecosistemas favorables para la comunidad de moscas de las frutas por disponibilidad de sitios de oviposición.

El número de especies de moscas de las frutas encontradas en el presente trabajo fue diferente para cada uno de los sistemas de producción evaluados: Plena exposición (7), sombrío tradicional (10) y orgánico con sombrío (6) (Tabla 4). Resultados similares a los encontrados por Giraldo *et al.* (12), donde

se reportaron nueve especies pertenecientes a dos géneros *Anastrepha* y *Toxotrypana* en un sistema de producción tradicional con sombra en el municipio de Sevilla (Valle del Cauca); sin embargo, trabajos realizados en Brasil por Souza *et al.* (28) y Aguiar-Menezes *et al.* (2) registran en este tipo de cafetal cuatro especies del género *Anastrepha* y a *C. capitata*.

Estos resultados pueden ser atribuidos a la diversidad de especies de plantas presentes en cada uno de los sistemas, ya que trabajos desarrollados por Aluja *et al.* (4), verifican que la diversidad de especies de *Anastrepha* varió en cinco cultivos de mango estudiados en México, el que presentó una mayor diversidad botánica tenía mayor riqueza de especies botánicas. Situación similar a la observada en este trabajo donde el sistema de sombrío tradicional presenta diez especies de moscas de las frutas en dos géneros, siendo la composición botánica en estos cafetales representada por más de diez especies. Sobresalen hospedantes primarios de moscas de las frutas, como son guayaba (*P. guajava*), mango (*M. indica*), papaya (*C. papaya*), guamo (*Inga* spp.),

Tabla 4. Frecuencia de *Anastrepha* spp y *T. curvicauda* capturada en trampas McPhail, en tres sistemas de producción de café.

Sistema de producción	N	Especie de moscas (ni)									
		<i>A. fraterculus</i>	<i>A. obliqua</i>	<i>A. striata</i>	<i>A. distincta</i>	<i>A. mucronota</i>	<i>A. grandis</i>	<i>A. leptozona</i>	<i>A. manihoti</i>	<i>A. pallidipennis</i>	<i>T. curvicauda</i>
Sombrío tradicional	187	MF (128)	PF (37)	PF (37)	F (55)	PF (15)	PF (31)	PF (18)	PF (7)	PF (2)	PF (12)
Plena exposición	278	MF (259)	0	PF (24)	PF (6)	PF (2)	0	PF (1)	PF (2)	PF (2)	PF (1)
Orgánico con sombrío	94	MF (94)	PF (2)	PF (24)	MF (53)	PF (1)	PF (3)	0	0	0	0

N número total de muestras; ni número de muestras con la especie *i*; MF: Muy frecuente, F: frecuente, PF: poco frecuente.

naranja (*C. sinensis*) (32). En el sistema orgánico con sombrío, las especies que prevalecieron fueron de tipo maderables, donde a la fecha sólo se corrobora a los guamos como hospedante de la mosca *A. distincta* (32). Por último, en los sistemas a plena exposición solar compuesto por plantas de café sólo se presentaron especies accidentales de moscas de las frutas ya que posiblemente las condiciones de clima no fueron favorables para su desarrollo.

Muestreo de frutos de café. Se muestrearon en total 126,46 kg de café cereza para la obtención de moscas de las frutas, los resultados en cuanto al número de especímenes y especies de moscas de la fruta recuperadas se presentan en la Tabla 5. Solo se obtuvieron dos especies del género *Anastrepha*: *A. fraterculus* y *A. striata*.

El 99,9% de los especímenes encontrados en los frutos de café pertenecieron a *A.*

fraterculus y el 0,1% restante a *A. striata*, siendo similar con lo reportado por Nuñez *et al.* (22) quienes muestrearon 213,75 kg de café cereza en el departamento de Santander y encontraron que el 99,1% correspondió a especímenes de *A. fraterculus* y el 0,8% a *A. striata*. Para el caso del estado de São Paulo en Brasil, en diferentes variedades de *C. arabica*, Raga *et al.* (24) reportan a las especies *A. fraterculus* y *C. capitata* con porcentajes similares, 67% y 71%, respectivamente, y Aguiar-Menezes *et al.* (2) relacionan a las especies antes mencionadas y adicionan a *A. sororcula* y algunos especímenes de otros Dípteros pertenecientes a la familia Lonchaeidae.

La presencia y el efecto de moscas de las frutas alimentándose del mucilago del café ha sido poco estudiada, pero de acuerdo a trabajos desarrollados por Cividines *et al.* (10), *C. capitata* puede inducir caída de frutos maduros de *C. arabica* hasta

Tabla 5. Total de especímenes de moscas de las frutas recuperadas de frutos de café, en tres sistemas de producción. Enero-2010 a octubre-2011.

Sistema producción	Total de frutos evaluados	Peso (kg)	Especies identificadas	No. de hembras	No. de machos	Total
Sombrío tradicional	20.860	42,72	<i>A. fraterculus</i>	357	322	679
Plena exposición	32.500	64,52	<i>A. fraterculus</i>	792	685	1.477
			<i>A. striata</i>	1	0	1
Orgánico con sombrío	11.500	22,22	<i>A. fraterculus</i>	367	332	699

en un 46,4% y afectar la calidad en taza. Información similar a la encontrada para Colombia por Portilla *et al.* (23), para esta misma especie, concluyen que esta mosca ataca los frutos de café en todos sus estados de desarrollo produciendo caída prematura de frutos, disminución de peso en el café pergamino seco y alteración de la bebida. Para el caso de especies del género *Anastrepha* no se han evaluado los posibles daños que ocasiona en el cultivo del café.

Puede concluirse que durante los 22 meses de evaluación, en los cafetales se encontró presencia de nueve especies del género *Anastrepha*, una especie del género *Toxotrypana*: *T. curvicauda* y no fue capturado algún espécimen de *C. capitata*.

La especie *A. fraterculus* es la más frecuente en los tres sistemas de producción evaluados, pero en aquellos con sombrío se encuentra presencia de otras especies de moscas de las frutas.

Los frutos de café en más del 99% son infestados por *A. fraterculus*, pero se desconoce cuál puede ser el efecto de la presencia de esta mosca en el cultivo del

café, por lo cual es recomendable determinar qué sucede con los frutos que son atacados. Esto permitirá determinar si a futuro frente a los diferentes escenarios de variabilidad y cambio climático *A. fraterculus* puede tornarse una plaga limitante para este cultivo en Colombia, como ha sido reportada en otros países.

Trabajos desarrollados por Giraldo *et al.* (datos sin publicar) encontraron niveles de parasitismo superiores al 20% en cafetales con sombrío, mientras que en los cafetales a libre exposición no se reportó parasitismo; la presencia de parasitoides nativos de *Anastrepha* spp. representantes de la familia Braconidae *Doryctobracon* spp, *Microcasis* spp., *Utetes* spp, contribuyen en estos sistemas con sombrío a mantener las moscas de las frutas con bajos niveles poblacionales, impidiendo posiblemente en tornarse plaga del cultivo.

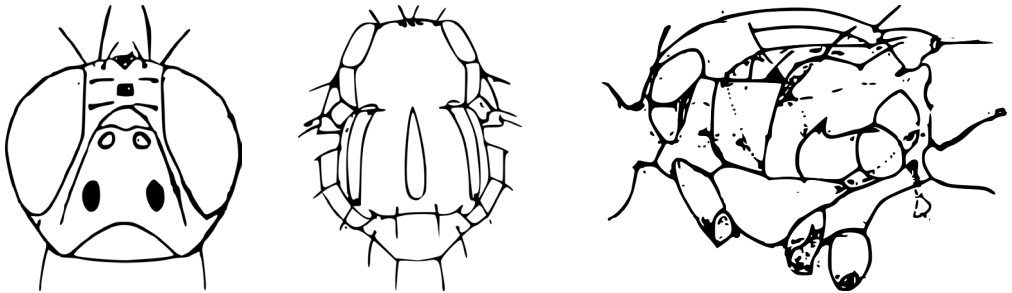
Se presenta la clave ilustrada para para especies de moscas de las frutas capturadas en cafetales de la zona central de Colombia, basados en los caracteres morfológicos, para la identificación de las nueve especies del género *Anastrepha* reportadas en esta investigación.

Clave ilustrada para la identificación de especies de moscas de las frutas de la zona central cafetera de Colombia. Adaptada de Zucchi y Uramoto (33)

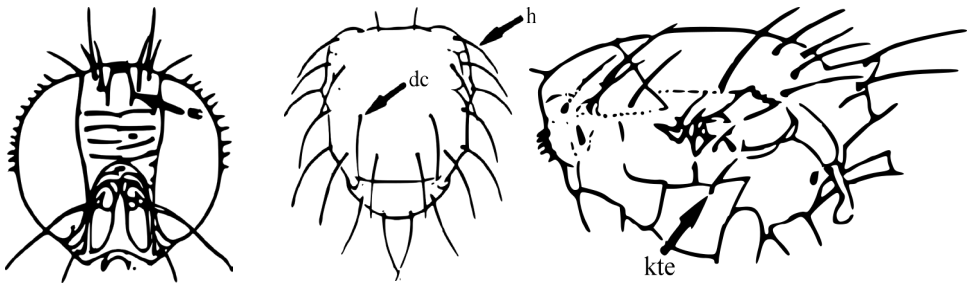
Clave ilustrada para especies de moscas de las frutas capturadas en cafetales de la zona central de Colombia. Con los caracteres morfológicos utilizados para la identificación de las nueve especies del género *Anastrepha* reportadas en esta investigación se elaboró una clave dicotómica:

Clave ilustrada para géneros de moscas de las frutas en cafetales de la zona central de Colombia

1. Cerda ocelar, dorsocentral, catepisternal y, generalmente, numeral ausentes2



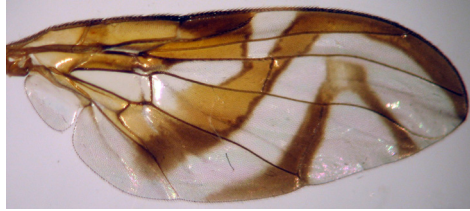
1'. Cerdas ocelar (oc) y/o humeral (h) y/o dorsocentral (dc) y/o catepisternal (kte) presentes2'



2. Vena R2+3 sinuosa; celda mediana basal y cubital basal aproximadamente con el mismo ancho..... *Toxotrypana*



2'. Vena M curvada apicalmente; ala, en general, con las bandas C, S y V....*Anastrepha*



Clave simplificada ilustrada para identificación de algunas especies de *Anastrepha* spp. presentes en los cafetales de la zona central de Colombia

1. Ala con banda costal extendiéndose por todo el margen anterior, sin área hialina distinta en el ápice de la vena R1, banda S del ala presente, coloración generalmente amarilla, mesonoto con dos bandas negras sub-laterales interrumpidas en la sutura transversal, ápice del acúleo sin dientes.....*A. grandis* (Macquart)



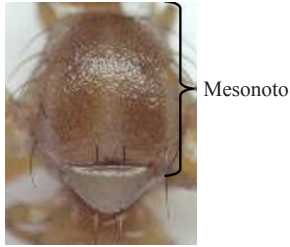
1'. Ala con banda costal interrumpida próxima al ápice de la vena R1.....2



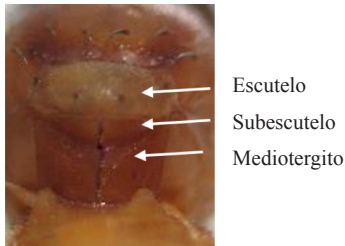
2 (1') Mesonoto con bandas oscuras longitudinales, ápice del acúleo redondeado y sin dientes.....*A. striata* Schiner



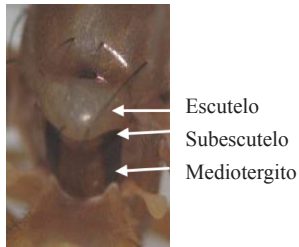
2'. Mesonoto predominantemente amarillo.....3



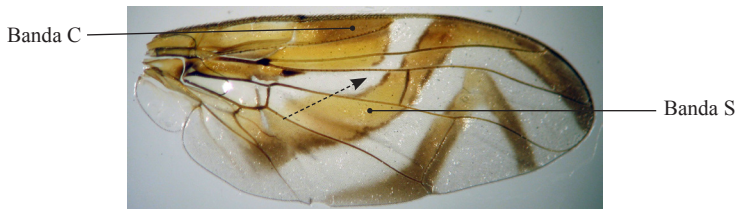
3 (2'). Mediotergito y/o subescutelo sin manchas oscuras laterales.....4



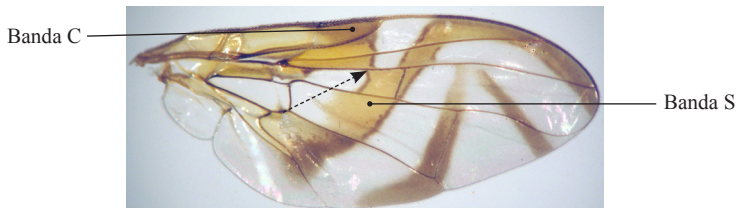
3'. Mediotergito y/o subescutelo con manchas negras laterales.....7



4 (3). Bandas C y S separadas.....5



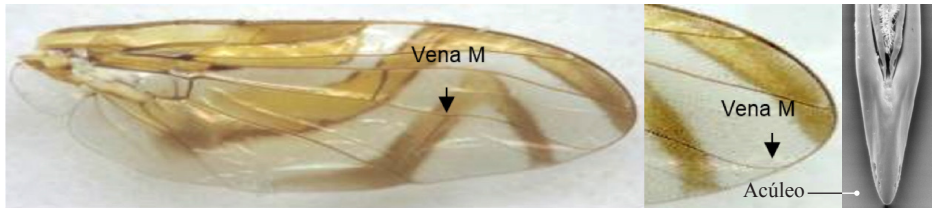
4'. Bandas C y S unidas6



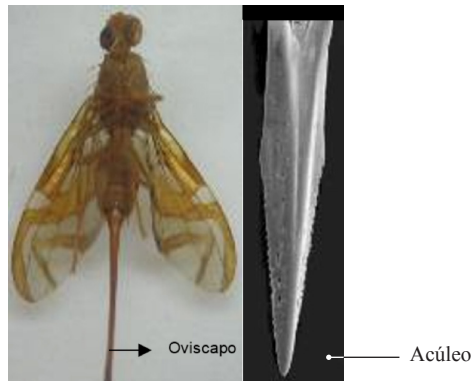
5 (4). Vena M acentuadamente curva, alcanzando la banda S; banda V incompleta, acúleo con ápice aserrado con dientes diminutos..... *A. leptozona* Hendel



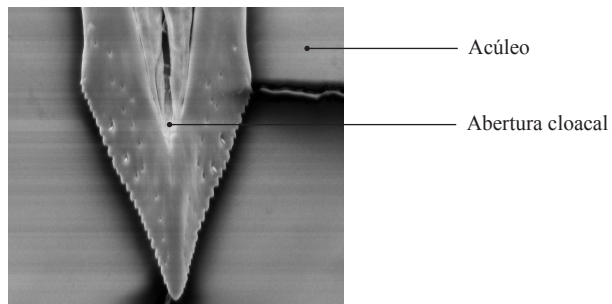
5'. En el ala vena M no alcanzan la banda S; acúleo con ápice liso..... *A. mucronota* Stone



6 (4'). Ápice del acúleo con dientes diminutos en los 2/3 apicales, base de la porción aserrada angulosa; oviscapo con más de 6 mm..... *A. pallidipennis* Greene



6'. Ápice del acúleo con dientes extendiéndose más allá del nivel de la abertura cloacal, con constricción antes de la sierra y forma de flecha..... *A. manihoti* Lima

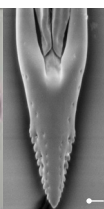
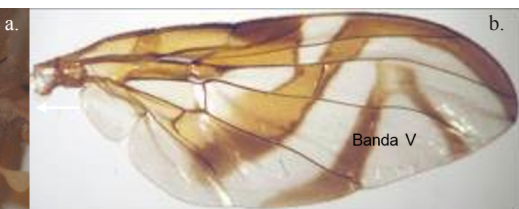
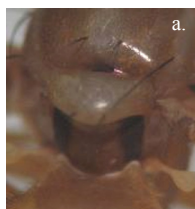


7. Manchas laterales oscuras apenas en el mediotergito8



Mediotergito

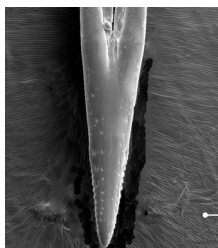
7'. Manchas laterales en el mediotergito y subescutelo(a), banda V, en general completa (b), y ápice del acúleo afilado y con dientes sobre la mitad apical.....*A. fraterculus* (Wied.)



Banda V

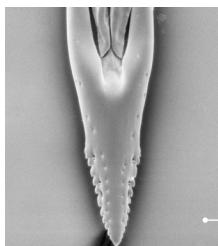
Acúleo

8 (7). Ápice del acúleo con dientes sobre menos de la mitad apical.....*A. distincta* (Greene)



Acúleo

8' Ápice del acúleo con dientes agudos sobre más de la mitad apical.....*A. obliqua* (Macquart)



Acúleo

LITERATURA CITADA

1. ABASA, R.O. Observations on the seasonal emergence of fruit flies on a Kenya coffee state and studies of the pest status of *Ceratitis capitata* Wied. in coffee. East african agricultural and forestry journal 39:144-148. 1973.
2. AGUIAR M., E.; SOUZA, S.A.S.; SANTOS, C.M.A.; RESENDE, A.L.S.; STRIKIS, P.C.; COSTA, J.R.; RICCI, M. Susceptibilidade de seis cultivares de café arábica às moscas-das-frutas (Diptera: Tephritoidea) em sistema orgânico com e sem arborização em Valença, RJ. Neotropical entomology 36(2):268-273. 2007.
3. ALUJA, M. Bionomics and management of *Anastrepha*. Annual review of entomology 39:155-178. 1994.
4. ALUJA, M.; CELEDONIO H., H.; LIEDO, P.; CABRERA, M.; CASTILLO, F.; GUILLÉN, J.; RIOS, E. Seasonal population fluctuations and ecological implications for management of *Anastrepha* fruit flies (Diptera: Tephritidae) in commercial mango orchards in southern Mexico. Journal of economic entomology 89(3):654-667. 1996.
5. ALUJA, M.; NORRBOM, A.L. Fruit flies (Tephritidae): Phylogeny and evolution of behavior. Washington : CRC Press, 2000. 944 p.
6. ARÉVALO P., E. Actualización de la situación de la mosca del Mediterráneo (*Ceratitis capitata* (Wiedemann)) en Colombia: Notificaciones oficiales de plagas. [En línea]. Bogotá : ICA, 2015. Disponible en internet: <http://www.ica.gov.co/Alertas-Fitosanitarias/Notificacion-Oficial/Detalle-Notificacion-Oficial/Actualizacion-de-la-situacion-de-la-Mosca-del-Medi.aspx>. Consultado en septiembre 22 de 2015.
7. ARRIGONI, E.B. Dinâmica populacional de moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) em três regiões do estado de São Paulo. Piracicaba : Universidade de São Paulo. Escola superior de agricultura Luiz de Queiroz, 1984. 165 p. Tesis: Doutor em entomologia.
8. BAETAN., A.M.; TOFANI, S.R.M.; GERALDO, B.S.; SILVA, E.R. Mosca no café. Cultivar 4:34-35. 2002.
9. CAMARGOS, M.G.; ALVARENGA, C.D.; GIUSTOLIN, T.A.; OLIVEIRA, P.C.; MENDES, M. Moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) em cafezais irrigados no norte de minas gerais. Coffee science 10(1):28-37. 2015.
10. CIVIDANES, F.J.; NAKANO, O.; MELO, O. Avaliação da qualidade de frutos de café atacados por *Ceratitis capitata* (Wied., 1824) (Diptera: Tephritidae). Scientia agricola 50(2):220-225. 1993.
11. FARFÁN V., F.F. Cómo producir café orgánico en Colombia. Chinchiná : Cenicafé, 2000. 8 p. (Avances Técnicos No. 279).
12. GIRALDO, M.; MATHEUS, H.; ZUCCHI, R. Moscas-das-frutas (Diptera, Tephritidae, *Anastrepha*) coletadas em nove municípios do estado do Valle del Cauca, Colombia. Revista de agricultura 84(1):51-55. 2009.
13. GONZALES, F.E.; MATHEUS, H. Estado actual de las moscas de las frutas en Colombia. p. 60. En: Memorias congreso sociedad colombiana de entomología. Bogotá : SOCOLEN, 2004.
14. KORYTKOSKI, CH. Manual para la identificación de moscas de la frutas, género *Anastrepha* Schiner, 1868. Panamá : Universidad de Panamá, 2004. 139 p.
15. LUDWIG, J.A.; REYNOLDS, J.F. Statistical ecology: A primer on methods and computing. New York : John Wiley, 1988. 337 p.
16. MARTÍNEZ, J.O.; SERNA, F.J. Se conocen las especies de *Anastrepha* Schiner (Diptera: Tephritidae) de Colombia. p. 163. En: Memorias congreso sociedad colombiana de entomología. Bogotá : SOCOLEN, 2004.
17. MONTES S., N.M.N. Moscas-das-frutas em cultivares de cafeeiros de Presidente Prudente, SP. Coffee science 7(2):99-109. 2012.
18. NASCIMENTO, A.S.; ZUCCHI, R.A.; MORGANTE, J.S.; MALAVASI, A. Dinâmica populacional de moscas-das-frutas do gênero *Anastrepha* (Diptera: Tephritidae) no Recôncavo Baiano. Pesquisa agropecuária brasileira 17(7):969-980. 1982.
19. NORRBOM, A.L. Fruit fly (Diptera: Tephritidae) host plant database. [En línea]. Washington : USDA, 2004. Disponible en internet: <Http://www.sel.barc.usda.gov/diptera/tephriti/TephHost.htm>. Consultado el 14 de abril de 2012.
20. NORRBOM, A.L.; KIM, K.C. A list of the recorded hosts plants of the species of *Anastrepha* (Diptera: Tephritidae). Washington : USDA : APHIS, 1988. 114 p.
21. NORRBOM, A.L.; ZUCCHI, R.A.; HERNÁNDEZ O., V. Phylogeny of the genera *Anastrepha* and

- Toxotrypana* (Trypetinae: Toxotrypanini) based on morphology. p. 299-342. En: ALUJA, M.; NORRBOM, A.L. Fruit flies (Tephritidae): Phylogeny and evolution of behavior. Washington : CRC Press, 2000.
22. NÚÑEZ B., L.; GÓMEZ, S.R.; GUARÍN, G.; LEÓN, G. Moscas de las frutas (Diptera: Tephritidae) y parasitoides asociados con *Psidium guajava* L. y *Coffea arabica* L. en tres municipios de la provincia de Vélez (Santander, Colombia). CORPOICA 5(1):5-12. 2004.
 23. PORTILLA, M.; GONZÁLEZ, G.; NÚÑEZ B., L. Evaluación y descripción del daño ocasionado por *Ceratitis capitata* al café. Revista colombiana de entomología 21(2):15-24. 1995.
 24. RAGA, A.; PRESTES, D.A.O.; SOUZA F., M.F.; SATO, M.E.; SILOTO, R.C. Moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) infestantes de Catuaí vermelho e Catuaí amarelo no estado de São Paulo. p. 1999-2003. En: Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil. Vitória : Embrapa café, 2001.
 25. REIS, P.R. Reflexos da incidência de pragas na qualidade do café. p. 107-111. En: SALVA, T.J.G.; [et al.]. Cafés de qualidade: Aspectos tecnológicos, científicos e comerciais. Campinas : IAC, 2007.
 26. SILVEIRAN, S.; NAKANO, O.; BARBIN, O.; VILA N., N.A. Manual de ecologia dos insetos. São Paulo : Agronômica ceres, 1976. 420 p.
 27. SOTO M., J.; JIRON, L.F. Studies on the population dynamics of the fruit flies, *Anastrepha* (Diptera: Tephritidae), associated with mango (*Mangifera indica* L.) in Costa Rica. Tropical pest management 35(4):425-427. 1989
 28. SOUZA, M.F. DE R.; ZUCCHI, R.A. São Paulo. p. 277-284. En: MALVASI, A.; ZUCCHI, R.A. Moscas-das-frutas de importância econômica no Brasil: Conhecimento básico e aplicado. Ribeirão Preto : Holos, 2000.
 29. TORRES, C.A.S.; CASTELLANI, M.A.; MALUF, R.P.; SILVA, J.C.G.; NASCIMENTO, A.S.; JOSE, A.R.S.; MOREIRA, A.A.; SA, R.F. Infestação de cafeeiros por moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae): Espécies associadas e parasitismo natural na região sudoeste da Bahia, Brasil. Pesquisa aplicada e agrotecnologia 3(1):135-142. 2010.
 30. WHITE, I.A.; ELSON H., M.M. Fruit flies of economic significance: Their identification and bionomics. Wallingford : CAB International, 1994. 601 p.
 31. ZUCCHI, R.A. Taxonomia. p. 13-24. En: MALVASI, A.; ZUCCHI, R.A. Moscas-das-frutas de importância econômica no Brasil: Conhecimento básico e aplicado. Ribeirão Preto : Holos, 2000.
 32. ZUCCHI, R.A. Espécies de *Anastrepha*, sinónimas, plantas hospedeiras e parasitoides. p. 41-48. En: MALVASI, A.; ZUCCHI, R.A. Moscas-das-frutas de importância econômica no Brasil: Conhecimento básico e aplicado. Ribeirão Preto : Holos, 2000.
 33. ZUCCHI, R.A.; URAMOTO, K. Chave de identificação para alguns gêneros de Tephritidae e algumas espécies de *Anastrepha*. p. 10-19. En: Curso nacional de capacitação em moscas-das-frutas de importância econômica e quarentenária, 2007.

MICRONUTRIENTES EN FRUTOS Y HOJAS DE CAFÉ

Siavosh Sadeghian Khalajabadi*; Alveiro Salamanca Jiménez*

SADEGHIAN K., S.; SALAMANCA J., A. Micronutrientes en frutos y hojas de café. Revista Cenicafé 66 (2): 73-87. 2015

En los estudios de la nutrición mineral un aspecto a tener en cuenta se relaciona con la absorción y la acumulación de los elementos requeridos por los diferentes órganos de la planta, en cada una de las etapas fenológicas del cultivo. Con el objetivo de determinar la acumulación de Fe, Mn, Zn, Cu y B en frutos de café (*Coffea arabica* L.) Variedad Castillo®, y su relación con la concentración foliar, se analizaron mensualmente muestras de frutos y de hojas desde la floración hasta la cosecha, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé. La acumulación de la materia seca del fruto a través del tiempo siguió una curva sigmoideal doble y, aunque se presentaron algunas variaciones entre las localidades, en todas fue posible distinguir las siguientes etapas: una inicial con poca ganancia en la biomasa del fruto (hasta los 60 a 90 días después del pico de la floración-DDPF), seguida por una expansión rápida (hasta los 90 a 120 DDPF), una fase de crecimiento desacelerado (hasta los 150 DDPF) y un cuarto estadio con un fuerte incremento en acumulación de materia seca. La concentración de los micronutrientes en el fruto disminuyó durante los primeros 120 días después de la floración, y la tendencia en su acumulación fue similar al crecimiento del fruto, presentando el siguiente orden: Mn>Fe>B>Cu>Zn. No hubo una relación clara entre las variaciones de los micronutrientes foliares y su demanda por los frutos. A excepción de Mn, no se detectó efecto de la fertilidad del suelo en la concentración de los elementos en el fruto o en la hoja.

Palabras clave: *Coffea arabica* L., crecimiento del fruto, nutrición mineral, acumulación de nutrientes.

MICRONUTRIENTS IN COFFEE FRUITS AND LEAVES

An important factor to consider in mineral nutrition studies is related to the absorption and accumulation of the elements required by the different organs of the plant in each of the phenological stages of the crop. In order to determine the accumulation of Fe, Mn, Zn, Cu and B in coffee fruits (*Coffea arabica* L.) from the Castillo® Variety and its relationship with foliar concentration, samples of fruits and leaves from blooming to harvest were analyzed monthly in four Experimental Stations of Cenicafé. The accumulation of dry matter of the fruit over time followed a double sigmoid curve and, although there were some variations among localities, it was possible to distinguish the following stages: an initial low-gain stage in fruit biomass (up to 60-90 days after full bloom-DAF), followed by rapid expansion (up to 90-120 DAF), a phase of slower growth (up to 150 DAF) and a fourth stage with a strong increase in accumulation of dry matter. The concentration of micronutrients in the fruit decreased during the first 120 days after flowering and the accumulation trendline was similar to the growth of the fruit, showing the following order: Mn> Fe> B> Cu> Zn. There was no clear relationship between variations of foliar micronutrients and their demand for the fruit. Except for Mn, no effect of soil fertility was detected on the concentration of elements in the fruit or leaf.

Keywords: *Coffea arabica* L., fruit growth, mineral nutrition, accumulation of nutrients.

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

Uno de los aspectos importantes en los estudios de la nutrición mineral se relaciona con la absorción y la acumulación de los elementos requeridos por los diferentes órganos de las plantas en cada una de las etapas fenológicas del cultivo. La información que se genera a partir de ello permite conocer la demanda de los nutrientes y sirve de guía para ajustar los planes de fertilización.

En el cultivo de café, el suministro de fertilizantes debe satisfacer los requerimientos nutricionales de las plantas, tanto para mantener el crecimiento vegetativo como la formación de los frutos. Según Rena y Maestri (26), durante la etapa reproductiva, los frutos de café constituyen los vertederos preferenciales en la partición de nutrientes. Pese a lo anterior, la demanda de éstos por las plantas de café no varía en virtud de la producción (12, 27), pues ante una baja fructificación, el crecimiento de las ramas plagiotrópicas y la formación de nuevas hojas y ramas reemplazan a los frutos como vertedero de carbohidratos y nutrientes (22).

Una vez que las hojas de café finalizan su expansión, pasan a ser exportadoras potenciales de nutrientes (33). La degradación de compuestos contenidos en las células foliares maduras conlleva a la migración de fotoasimilados y nutrientes minerales móviles —en especial N y K— hacia vertederos como raíces y frutos, con la subsecuente reducción de éstos en la hoja de acuerdo con Calbo, (1989), citado por Valarini *et al.*, 11, 33).

Una vez fecundada la flor del café, el crecimiento del fruto experimenta diferentes fases, las cuales pueden variar según la variedad y las condiciones predominantes del sitio. Salazar *et al.* (31) indican que

para la variedad Colombia el crecimiento del fruto se ajusta a un modelo sigmoideal con tres fases, la primera de tipo logarítmico que se extiende hasta los 60 días, la segunda exponencial que va hasta los 180 días, y la tercera, de estabilización, que ocurre hasta los 240 días, cuando el fruto alcanza la madurez completa. Cunha *et al.* (13), Laviola *et al.* (21) y Ramírez *et al.* (25) sugieren que el crecimiento del fruto de café puede explicarse mediante el modelo sigmoideal doble, el cual de acuerdo con Cannell (6) comprende los estadios de “cabeza de alfiler” (“garrapata” o “puntilla”), expansión rápida, formación del endospermo, acumulación de materia seca (llenado) y maduración.

Conforme al desarrollo del fruto ocurren cambios en la concentración de los nutrientes en estos diferentes estadios del crecimiento y, por consiguiente, en su cantidad acumulada y la producción de la biomasa (20). De acuerdo con Moraes y Catani (24) la mayor acumulación de materia seca por el fruto ocurre a partir del cuarto mes de la floración y en los dos últimos meses (hasta el 40%). Ramírez *et al.* (25) señalan que durante los primeros 90 días después de la floración se acumula el 50% de los requerimientos totales de todos los nutrientes, a excepción del K.

Con relación a los micronutrientes, las cantidades requeridas por las plantas son relativamente pequeñas, debido a que constituyen parte de las enzimas o intervienen como sus activadores en lugar de conformar estructuras vegetativas (14). En la variedad Colombia, para producir 1.000 kg de café almendra debe disponerse de aproximadamente 5.625 kg de café cereza. Los nutrientes exportados desde el suelo a través de este volumen de cosecha se estiman en 78 kg, de los cuales 44,9% se

encuentran en la almendra, 47,4% en la pulpa, 2,6% en el pergamino y 5,1% en el mucílago. De los anteriores porcentajes, la participación de los micronutrientes es de 0,3% en la almendra, 0,2% en la pulpa, 0,7% en el pergamino y 1,3% en el mucílago (28).

Dado que en la actualidad no se cuenta con información acerca de la acumulación de micronutrientes en los frutos de café para la zona cafetera de Colombia, el presente estudio tuvo como objetivo determinar para regiones contrastantes del país las variaciones en la acumulación de hierro-Fe, manganeso-Mn, cinc-Zn, cobre-Cu y boro-B en los frutos de café desde la floración hasta la maduración y sus concentraciones en las hojas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La etapa experimental del estudio se realizó entre marzo y noviembre de 2010, en cuatro lotes de café (*Coffea arabica* L.) Variedad Castillo®, ubicados en cuatro Estaciones Experimentales (EE) del Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé, con características contrastantes en suelo y clima (Tablas 1 y 2). Las determinaciones de la materia seca y el análisis químico de las muestras recolectadas se efectuaron en el laboratorio de la Disciplina de Suelos de Cenicafe (Manizales, Caldas).

En cada localidad se efectuó una fertilización durante los meses de marzo-abril y otra entre septiembre y octubre, según los resultados de los análisis de suelos que se realizaron antes de iniciar la investigación (Tabla 3). Los planes en mención no incluían los micronutrientes

objeto de estudio y tampoco se realizaron aplicaciones de fertilizantes vía foliar.

Con base en los registros tomados en cada Estación Experimental se identificó el “día pico” de la floración (el de mayor evento en el año) en el mes de marzo de 2010. A partir de esta fecha, cada 30 días se tomaron muestras de frutos en las ramas del tercio productivo de 100 plantas que se seleccionaron aleatoriamente al iniciar la investigación. Este procedimiento se repitió durante los seis meses siguientes, hasta llegar al día pico de la cosecha en el mes de noviembre y completar así ocho muestreos. Con los frutos recolectados en cada evaluación se conformó una muestra compuesta.

Dado el tamaño de los frutos en los primeros tres meses, se recolectaron 40 frutos por planta para la primera evaluación, 20 en la segunda y 10 en la tercera, y para los siguientes cinco meses se tomaron cuatro frutos por planta. Luego de cada muestreo, para cuantificar la materia seca se dispusieron en una estufa 50 frutos por 72 h a 105°C. Los frutos restantes se secaron a 70°C y se analizaron sus contenidos de Fe, Mn, Zn, Cu y B mediante la metodología descrita por Carrillo *et al.* (5). En las mismas ramas donde se recolectaron los frutos también se tomaron muestras foliares en el tercer y cuarto nudo, contados a partir del ápice, para analizar la composición química de los mismos elementos mediante la metodología en referencia.

Con base en los valores de la materia seca y la concentración de los nutrientes en el fruto se calculó la acumulación de éstos en cada una de las épocas de muestreo, de acuerdo con la Ecuación <1>:

$$\text{Acumulación del nutriente } (\mu\text{g/fruto}) = [\text{Materia seca (g/fruto)} \times 10^6] \times [\text{Concentración del nutriente (mg.kg}^{-1}) \times 10^{-6}] \text{ <1>}$$

Tabla 1. Localización de las Estaciones Experimentales, característica de la plantación (lote de café seleccionado) y propiedades del suelo*.

	Estación Experimental			
	Naranjal	Líbano	El Rosario	Pueblo Bello
Localización				
Departamento	Caldas	Tolima	Antioquia	Cesar
Municipio	Chinchiná	Líbano	Venecia	Pueblo Bello
Ecotopo	206A	207B	203A	402
Latitud Norte	04° 58'	04° 54'	05° 58'	10° 25'
Longitud Oeste	75° 39'	75° 02'	75° 42'	73° 34'
Altitud (m)	1.381	1.456	1.635	1.134
Características de la plantación				
Fecha de siembra/zoca	2006	2006	2006	2007
Distancia de siembra (m)	1,0 x 1,0	1,0 x 1,0	1,4 x 1,4	1,0 x 2,0
Número ejes por planta	1,0	1,0	2,0	1,0
Sombra (%)	0	0	0	40
Propiedades químicas y textura del suelo				
pH	4,9	5,0	4,4	4,4
Materia orgánica (%)	14,9	18,5	12,1	9,7
K (cmol _c .kg ⁻¹)	0,23	0,41	0,75	0,45
Ca (cmol _c .kg ⁻¹)	2,62	1,30	0,40	2,21
Mg (cmol _c .kg ⁻¹)	0,66	0,39	0,44	0,59
Al (cmol _c .kg ⁻¹)	1,0	1,8	6,6	2,5
P (mg.kg ⁻¹)	6	6	46	11
S (mg.kg ⁻¹)	18	4	7,9	44
Fe (mg.kg ⁻¹)	455	350	538	479
Mn (mg.kg ⁻¹)	38	34	30	109
B (mg.kg ⁻¹)	0,14	0,42	0,49	0,48
Cu (mg.kg ⁻¹)	3,90	9,00	2,85	4,20
Zn (mg.kg ⁻¹)	16,50	33,00	3,50	4,80
Textura	Franca	Franca	Arcillosa	Arcillosa

* Resultado correspondiente a una muestra tomada de 0 a 20 cm de profundidad. pH: potenciométrico, relación suelo:agua 1:1. Materia orgánica: Walkley-Black. P: Bray II. K, Ca y Mg: acetato de amonio 1N. Al: KCl 1N. S turbimétrico, fosfato monocálcico 0,008 M. B: agua caliente. Fe, Mn, Zn y Cu: EDTA 0,01 M y Ac. amonio 1,0 M.

Tabla 2. Precipitación mensual (mm) entre marzo y noviembre de 2010 en las cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Estación Experimental	Mes									Total
	M	A	M	J	J	A	S	O	N	
Naranjal	181	202	391	321	538	311	380	311	443	3.078
Líbano	72	192	342	311	376	155	260	253	287	2.248
El Rosario	172	197	264	517	324	442	534	264	569	3.283
Pueblo Bello	160	249	349	415	236	427	331	200	213	2.580

Tabla 3. Nutrientes suministrados durante el año 2010* en los lotes experimentales.

Estación Experimental	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
	(kg.ha-año ⁻¹)			
Naranjal	280	60	260	0
Líbano	240	40	180	12
Pueblo Bello	120	40	130	15
El Rosario	260	20	180	12

* Marzo y septiembre en El Rosario y Líbano y, abril y septiembre en Naranjal y Pueblo Bello.

Para explicar el crecimiento de los frutos en función del tiempo, se utilizaron los modelos de regresión no-lineares sigmoidales con tres y cuatro parámetros (Ecuaciones <2> y <3>), de acuerdo a lo sugerido por Laviola *et al.* (16).

$$\hat{y} = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{x-x_0}{b}\right)} \quad \langle 2 \rangle$$

Donde

\hat{y} = Materia seca del fruto

a = Punto máximo de la curva

b = Parámetro de ajuste

x_0 = Punto de inflexión

$$\hat{y} = y_0 + \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{x-x_0}{b}\right)} \quad \langle 3 \rangle$$

Donde

\hat{y} = Materia seca del fruto

$a = y_{\max} - y_{\min}$

b = Parámetro de ajuste

x_0 = Punto de inflexión

y_0 = Punto mínimo de la curva (el intercepto)

Para el análisis de regresión se empleó el software SigmaPlot versión 10 de 2007.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento del fruto. La acumulación de la materia seca del fruto siguió una curva sigmoidal doble (Figura 1 y Tabla 4),

tendencia que se asemeja con lo reportado por Castro (9), Cunha *et al.* (13), Laviola *et al.* (24) y Ramírez *et al.* (25), pero que difiere parcialmente de la forma sigmoidal encontrada por Salazar *et al.* (31). Aunque se presentaron algunas variaciones entre las localidades, en todas fue posible distinguir cuatro etapas: una inicial con poca ganancia en la biomasa del fruto (hasta los 60 a 90 días después del pico de la floración-DDPF), seguida por una expansión rápida (hasta los 90 a 120 DDPF), una fase de crecimiento desacelerado (hasta los 150 DDPF) y un cuarto estadio con un fuerte incremento en acumulación de materia seca.

Al comparar entre Estaciones Experimentales, la fase inicial—crecimiento lento— tuvo una duración de 90 días en El Rosario, en tanto que en las demás localidades este período fue de 60 días. En Naranjal y El Rosario la segunda etapa—crecimiento rápido— transcurrió durante un mes, mientras que en Líbano y Pueblo Bello se desarrolló en dos meses. La fase desacelerada de crecimiento tardó 60 días en Naranjal y 30 días en los otros tres sitios; mientras que para todas las localidades la etapa final se desarrolló entre los 150 y 240 DDPF.

Una vez transcurridos 150 DDPF, los valores de la materia seca fueron similares para las cuatro localidades: El Rosario 0,299 g, Líbano 0,270 g, Naranjal 0,323

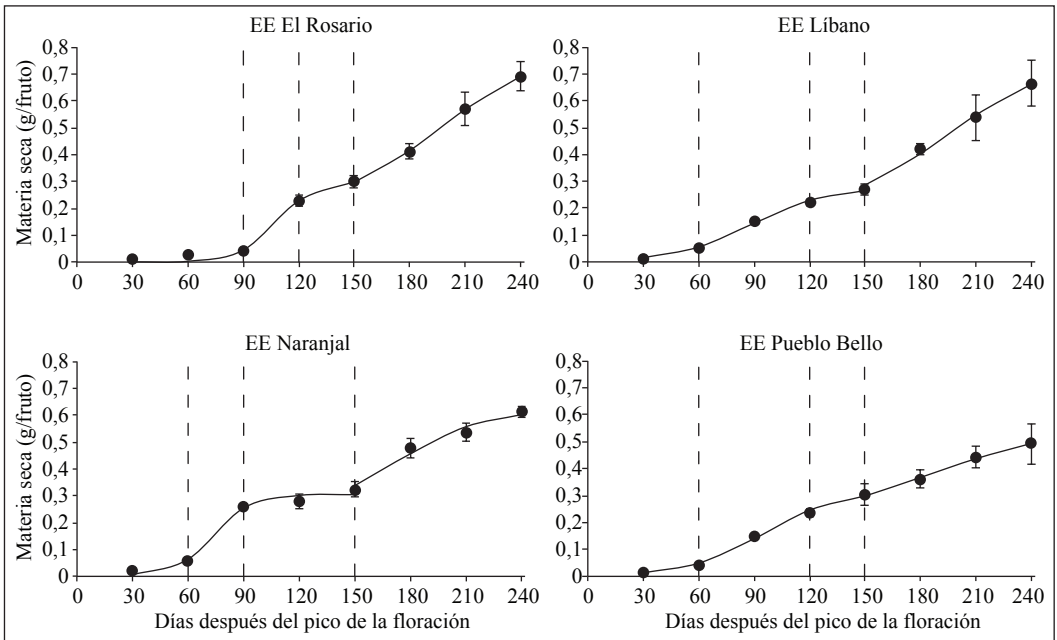


Figura 1. Acumulación de la materia seca en el fruto de café en respuesta al tiempo transcurrido entre la floración y la cosecha, en cuatro Estaciones Experimentales (EE) de Cenicafé. Las líneas punteadas delimitan los estadios del desarrollo del fruto.

g y Pueblo Bello 0,303 g. En el momento de la madurez de la cosecha, es decir, 240 DDPF, se registraron los siguientes valores: El Rosario 0,691 g, Líbano 0,665 g, Naranjal 0,612 g y Pueblo Bello 0,492 g. Si se toma como referencia a la Estación El Rosario, donde se registró el mayor peso, puede afirmarse que los frutos desarrollados en las Estaciones Experimentales Líbano, Naranjal y Pueblo Bello contenían 3,77%, 11,43% y 28,80% menos de materia seca, respectivamente.

Las diferencias entre las Estaciones pueden atribuirse a múltiples factores, siendo quizá más determinantes los componentes climáticos, como lo revelan los resultados obtenidos en Kenia por Cannell (4, 5) respecto a la lluvia, y en Brasil, por Laviola *et al.* (21) respecto a la temperatura. Cabe resaltar que los reportes de Gómez (16),

para Colombia, no indican influencia de los factores meteorológicos sobre el crecimiento del fruto pero sí sobre el crecimiento de estructuras vegetativas —nudos y hojas—, cuyos efectos se manifiestan en la cosecha del siguiente año. En cuanto a la disponibilidad del agua, las diferencias registradas entre las localidades estarían más relacionadas con la distribución de las lluvias que con su cantidad total (Tabla 2), pues el menor peso obtenido en la Estación Pueblo Bello pudiera deberse a una menor pluviosidad durante los dos meses previos a la cosecha. Se hubiera esperado un efecto benéfico del sombrío en el peso de los frutos en la Estación Pueblo Bello, como lo reportan los estudios desarrollados por Camargo *et al.* (3) y Castillo (8), sin embargo, la respuesta obtenida revela la influencia predominante de los factores de la zona en vez del microclima del ecosistema.

Tabla 4. Ecuaciones de regresión de la acumulación de la materia seca en el fruto de café en respuesta al tiempo transcurrido entre la floración y la cosecha en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Estación experimental	Período (DDPF)	Modelo	R ₂ (%)
Naranjal	30 a 150	$\hat{y} = 0,304/(1+\exp(-(x-73,449)/10,136))$	98,5
	120 a 240	$\hat{y} = 0,241+0,381/(1+\exp(-(x-174,108)/22,593))$	98,5
Libano	30 a 150	$\hat{y} = 0,279/(1+\exp(-(x-88,670)/20,585))$	99,7
	120 a 240	$\hat{y} = 0,162+0,614/(1+\exp(-(x-193,705)/31,302))$	99,6
El Rosario	30 a 150	$\hat{y} = 0,305/(1+\exp(-(x-108,602)/10,544))$	99,5
	120 a 240	$\hat{y} = 0,185+0,625/(1+\exp(-(x-196,048)/30,078))$	99,9
Pueblo Bello	30 a 150	$\hat{y} = 0,320/(1+\exp(-(x-95,213)/20,658))$	99,6
	120 a 240	$\hat{y} = 0,141+0,448/(1+\exp(-(x-178,719)/46,410))$	99,7

Los valores de la materia seca del fruto son mayores a los reportados para variedades Caturra (25, 31) y Catuaí amarillo (11). Parte de estas diferencias puede deberse al ambiente y manejo, y parte al componente genético; al respecto, Alvarado *et al.* (1) han tenido en cuenta el peso del grano como una característica deseable en los programas del mejoramiento genético para incrementar la productividad de la Variedad Castillo®.

Concentración de micronutrientes en el fruto. Las concentraciones de Fe, Mn, Zn, Cu y B en el fruto disminuyeron conforme se incrementó la materia seca del fruto a través de tiempo (Figura 2), resultado que se asemeja a los obtenidos por Catani *et al.* (10) y Ramírez *et al.* (25) para los elementos menores y por Chaves y Sarruge (11), Laviola *et al.* (18) y Sadeghian *et al.* (29, 30) para los macronutrientes. Esta reducción se asocia con un efecto de dilución en la concentración de los elementos como consecuencia del crecimiento del fruto (11, 32).

El promedio de la concentración de cada elemento —calculada a partir de los valores obtenidos para las cuatro localidades— se redujo así: Mn de 153 a 46 mg.kg⁻¹, Fe de 79 a 19 mg.kg⁻¹, B de 33 a 14 mg.kg⁻¹, Cu de 25 a 9 mg.kg⁻¹ y Zn de 24 a 5 mg.kg⁻¹. Lo

expuesto indica que el B y el Cu fueron los micronutrientes que en menor grado redujeron su concentración inicial en el fruto (58% y 64%, respectivamente), frente a Mn, Fe y Zn (70%, 76% y 79%, respectivamente).

Las mayores reducciones en las concentraciones de Mn, Fe, Cu y Zn ocurrieron durante los primeros 120 DDPF, tiempo después del cual tendieron a estabilizarse o presentar una disminución leve; en contraste, el B alcanzó valores bajos a los 150 DDPF, con fluctuaciones en los siguientes 90 días. El incremento en la concentración de B, dos y tres meses antes de la cosecha, estaría asociado a una mayor disponibilidad de agua en consecuencia del inicio de las lluvias en el segundo semestre del año (Tabla 2). Valencia (34) reporta para café una correlación positiva entre el nivel foliar de boro y la cantidad de agua retenida por el suelo. De acuerdo con Broadley *et al.* (2) la disponibilidad de boro se ve afectada fuertemente por el contenido de agua en el suelo ante condiciones de sequía, cuando disminuye el flujo de masa a las raíces.

Las mayores diferencias entre las localidades se registraron en los primeros 90 DDPF. En las Estaciones Pueblo Bello y El Rosario tendieron a presentarse los valores más altos de Mn y Cu prácticamente durante todo el

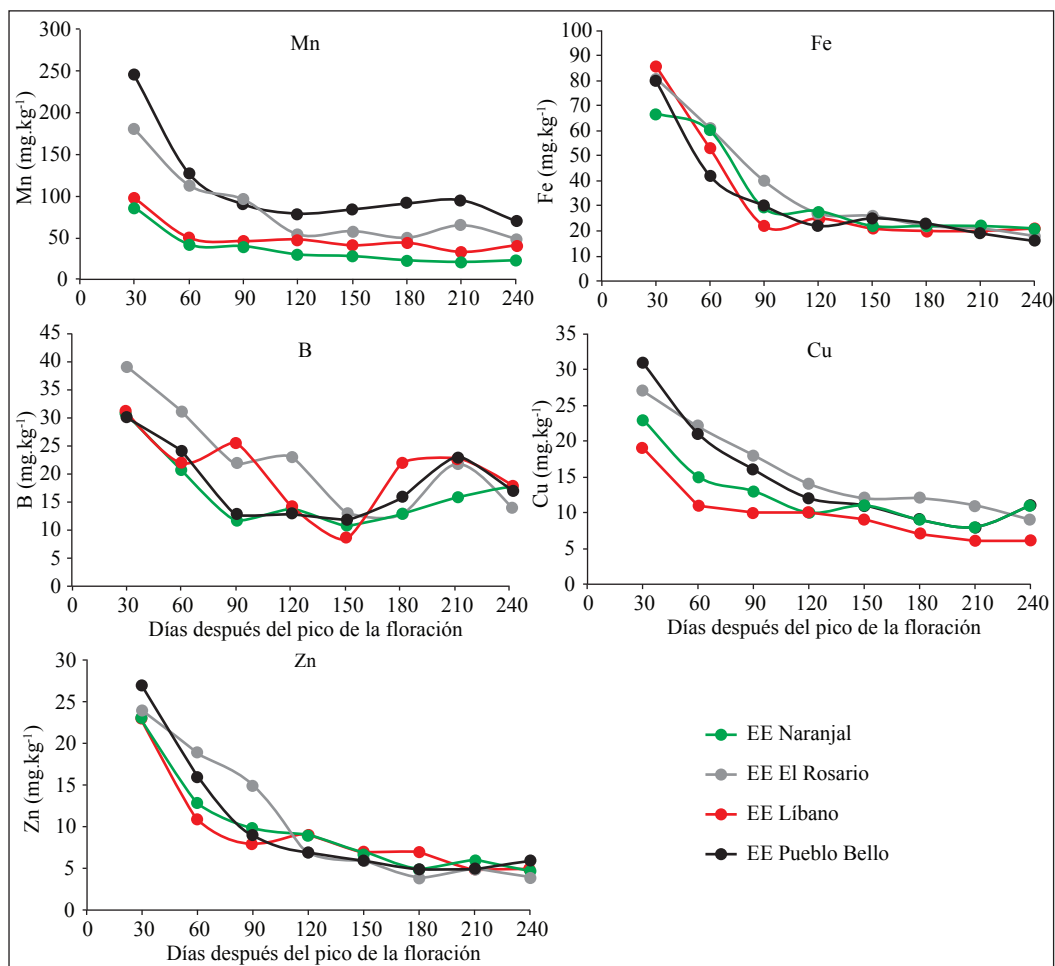


Figura 2. Concentración de manganeso-Mn, hierro-Fe, boro-B, cobre-Cu y cinc-Zn en frutos de café, en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales (EE) de Cenicafé.

tiempo de evaluación, en tanto que para Fe y Zn las concentraciones fueron similares en todas las estaciones, desde los 120 DDPF en adelante.

En la Tabla 5 se presenta la concentración de los micronutrientes analizados en frutos maduros, 240 días después del día pico de la floración. El orden hallado —Mn>Fe>B>Cu>Zn— difiere parcialmente

de los reportes de Ramírez *et al.* (25) para la variedad Caturra —B>Mn>Fe>Cu>Zn—, y de los resultados hallados por Sadeghian *et al.* (28) para la variedad Colombia. Estos últimos señalan que el Mn y Fe son los elementos predominantes en los frutos de café, seguidos por B, Zn y Cu; sin embargo, llaman la atención que pueden presentarse ciertas variaciones dentro de una misma localidad y entre ellas.

En la Estación Experimental Pueblo Bello se registraron los valores más altos de Mn y los más bajos de B en los frutos maduros (Tabla 5). Con respecto al Mn, el resultado puede relacionarse con los contenidos del elemento en el suelo, asociado al pH (Tabla 1); mientras que para el caso del B el factor determinante sería la disponibilidad hídrica a través de la lluvia efectiva que alcanza el suelo. El relativo alto contenido de Mn en la Estación El Rosario también podría deberse con el pH del suelo. En cuanto a los demás nutrientes, no existió una relación clara entre su concentración en el fruto y la fertilidad del suelo.

Acumulación de micronutrientes en el fruto.

En un sentido amplio, la tendencia en la acumulación de nutrientes evaluados fue similar al crecimiento del fruto (Figura 3). Como consecuencia de una mayor concentración de Mn en el fruto, su cantidad acumulada en este órgano fue mayor que los demás microelementos en las cuatro localidades y durante todo el período de evaluación. El Fe fue el segundo elemento más abundante en la mayoría de las evaluaciones, seguido por B, Cu y Zn.

En la Tabla 6 se consignan las cantidades acumuladas de los nutrientes analizados en los frutos maduros a los 240 DDPF. En los frutos de la EE Naranjal se detectaron los contenidos más bajos de Mn, en Líbano los menores contenidos de Cu, en El Rosario

los valores más bajos de Zn y en Pueblo Bello los menores de Fe y B. Las mayores diferencias entre localidades se detectaron para B y Mn, y las menores para Zn.

Los valores hallados para Mn son mayores, los de Fe y Cu parcialmente menores y los demás nutrientes similares que los registrados por Laviola *et al.* (19) para la variedad Catuaí en Brasil. Comparados con los resultados reportados por Ramírez *et al.* (25) para la variedad Caturra en Costa Rica, los contenidos de B fueron más altos (14,95 µg/fruto), mientras que los de Mn y Zn fueron menores (13,63 y 1,74 µg/fruto, respectivamente). Las diferencias en mención pueden asociarse tanto al material genético –variedad–, como al ambiente –clima y suelo– y el manejo de las plantaciones (4, 5).

Al expresar la acumulación de los nutrientes en términos relativos –como porcentaje del máximo valor alcanzado–, se detectan variaciones tanto entre elementos como localidades (Figura 4), siendo las tendencias similares a la cantidad absoluta (Figura 3). Dentro de los contrastes en referencia puede resaltarse que: i) en los primeros 60 DDPF ya se había acumulado el 28% de Fe en los frutos desarrollados en la Estación Naranjal, mientras que para la misma fecha la cantidad acumulada de B en El Rosario solo representaba el 6%, ii) transcurridos 120 DDPF, la acumulación de Zn bajo

Tabla 5. Concentración de Mn, Fe, B, Cu y Zn en frutos maduros de café, 240 días después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Estación Experimental	Mn	Fe	B	Cu	Zn
	(mg.ha ⁻¹)				
Naranjal	23	21	18	11	5
Líbano	41	21	18	6	5
Pueblo Bello	49	18	14	9	4
El Rosario	70	16	7	11	6

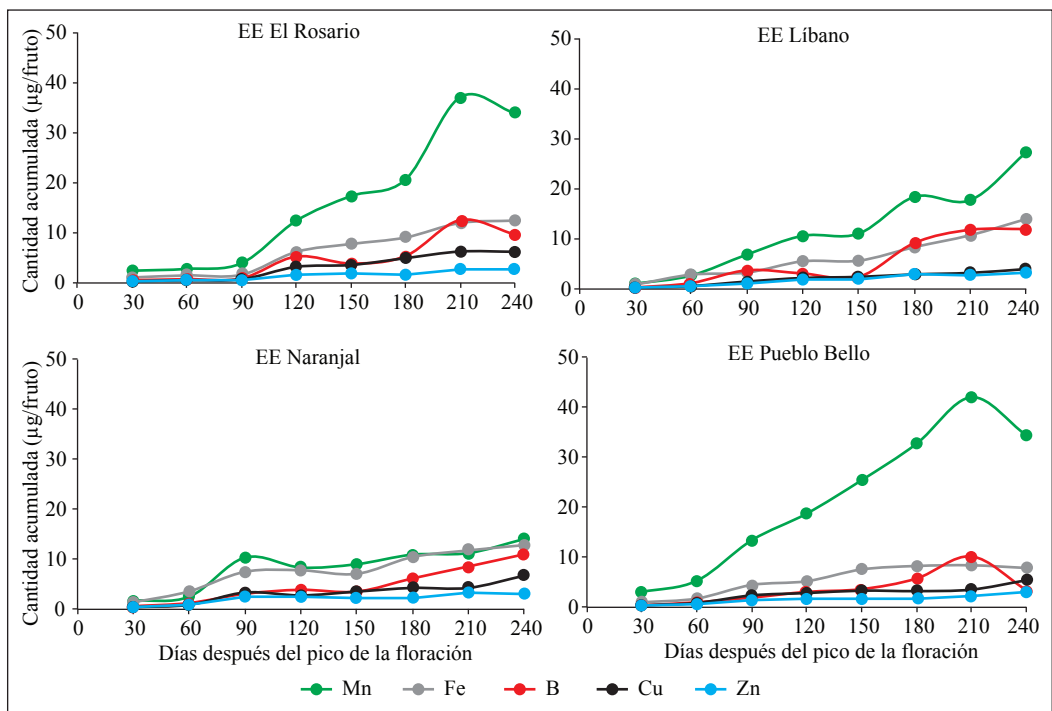


Figura 3. Cantidad acumulada de Mn, Fe, B, Cu y Zn en el fruto de café, en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales (EE) de Cenicafé.

Tabla 6. Contenido de Mn, Fe, B, Cu y Zn en el fruto maduro de café 240 días después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Estación Experimental	Mn	Fe	B	Cu	Zn
Naranjal	14,07	12,85	11,01	6,73	3,06
Líbano	27,28	13,97	11,98	3,99	3,33
Pueblo Bello	33,86	12,44	9,67	6,22	2,76
El Rosario	34,45	7,87	3,44	5,41	2,95

condiciones de Naranjal alcanzó el 78% y la de B en Pueblo Bello el 30%, y iii) a los 180 DDPF, es decir, 2 meses antes de la madurez de cosecha, el 98% de la cantidad total del Fe ya había sido almacenado en los frutos de la Estación Pueblo Bello, en tanto que la toma de B en El Rosario alcanzaba el 43%. Un común denominador en las cuatro localidades se observó para el

B, pues su acumulación durante los primeros 150 a 180 DDPF ocurrió de una manera más lenta que los demás elementos; en cambio, la mayor parte del Zn fue acumulada antes de los 120 DDPF.

Ramírez *et al.* (25) señalan que la mayor tasa de acumulación de B, Zn, Mn, Fe y Cu en frutos de café variedad Caturra ocurre en

el tercer mes después de la floración (32% a 45%), y que transcurridos 120 DDPF se ha almacenado en el fruto entre 66% y 74%. Los anteriores valores tienden a ser mayores que los registrados en este estudio, en cuyo caso se encontró una alta variabilidad entre elementos y sitios. Los reportes de Laviola *et al.* (19), para los micronutrientes, concuerdan con la anterior situación, y se atribuyen a las diferencias en la temperatura afectadas por la altitud.

Concentración foliar de micronutrientes.

Durante el tiempo comprendido entre la floración y la cosecha de los frutos ocurrieron cambios en las concentraciones foliares de Mn, Fe, B, Zn y Cu (Figura 5); sin embargo, y con excepción de Fe en la EE Pueblo Bello, no se evidenció un patrón

que pudiese relacionar las variaciones en mención con el crecimiento de los frutos en las diferentes localidades. En razón de ello, los cambios observados podrían atribuirse a las fluctuaciones de estos elementos en la solución del suelo, afectadas por la lluvia, antes que a la demanda por los frutos. Cabe resaltar que en ninguna de las plantaciones se suministraron micronutrientes vía fertilización y, por lo tanto, las diferencias obedecen a la disponibilidad de los nutrientes en la solución del suelo, gobernada por la humedad y la fertilidad del suelo.

Pocos estudios han demostrado relaciones claras entre la concentración de los nutrientes en la fuente-hoja y el vertedero-fruto. Ejemplos de ello son los reportes de Chaves y Sarruge (11) y Sadeghian *et al.* (29) para potasio,

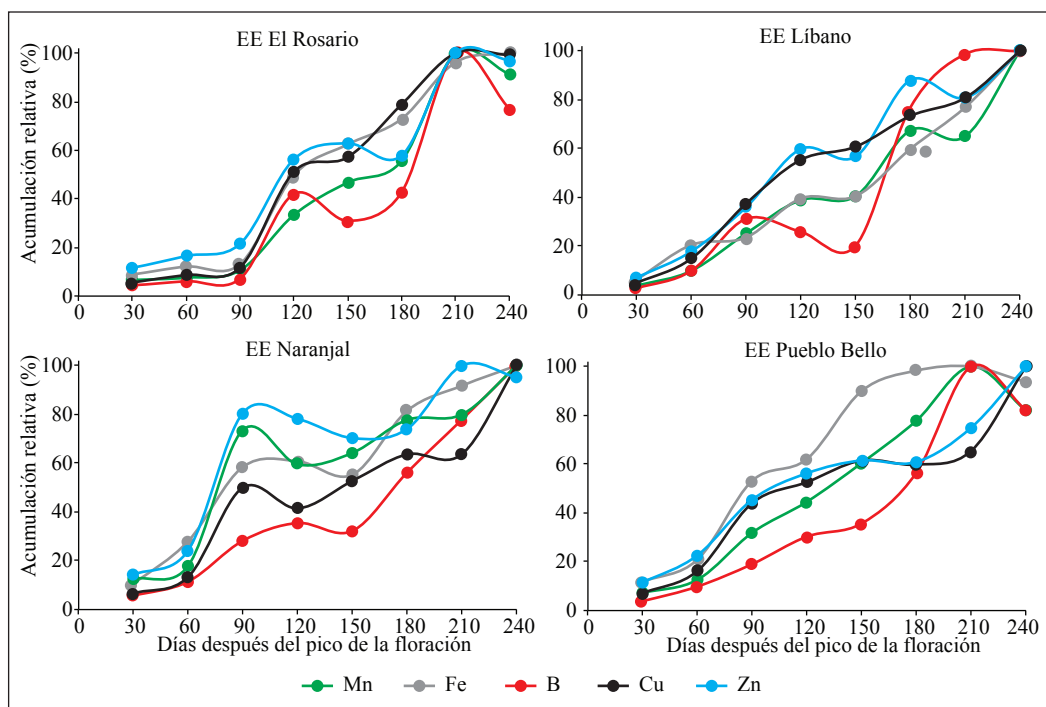


Figura 4. Acumulación relativa de Mn, Fe, B, Zn y Cu en el fruto de café en función de tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales (EE) de Cenicafé.

cuya respuesta fue relacionada con la alta demanda de este elemento y su gran facilidad para moverse vía floema (29). En divergencia con lo expuesto, los resultados obtenidos por Chaves y Sarruge (11) para Ca y Mg, y por Sadeghian *et al.* (29) para N y P, y los de Sadeghian *et al.* (30) para Ca, Mg y S, no revelan la re-movilización de éstos desde las hojas muestreadas. En cuanto a los microelementos, aunque Laviola *et al.* (19) justifican la reducción de B, Fe y Zn

en razón de las exigencias del fruto, luego del inicio del período reproductivo y en el estadio del crecimiento rápido, las tendencias registradas no siempre fueron concluyentes.

Parte de lo anterior puede deberse al hecho que los nutrientes requeridos por los frutos son proporcionados en mayor grado por las hojas más próximas a éstos (33), las cuales pueden no corresponder necesariamente a las que se toman en el muestreo y se

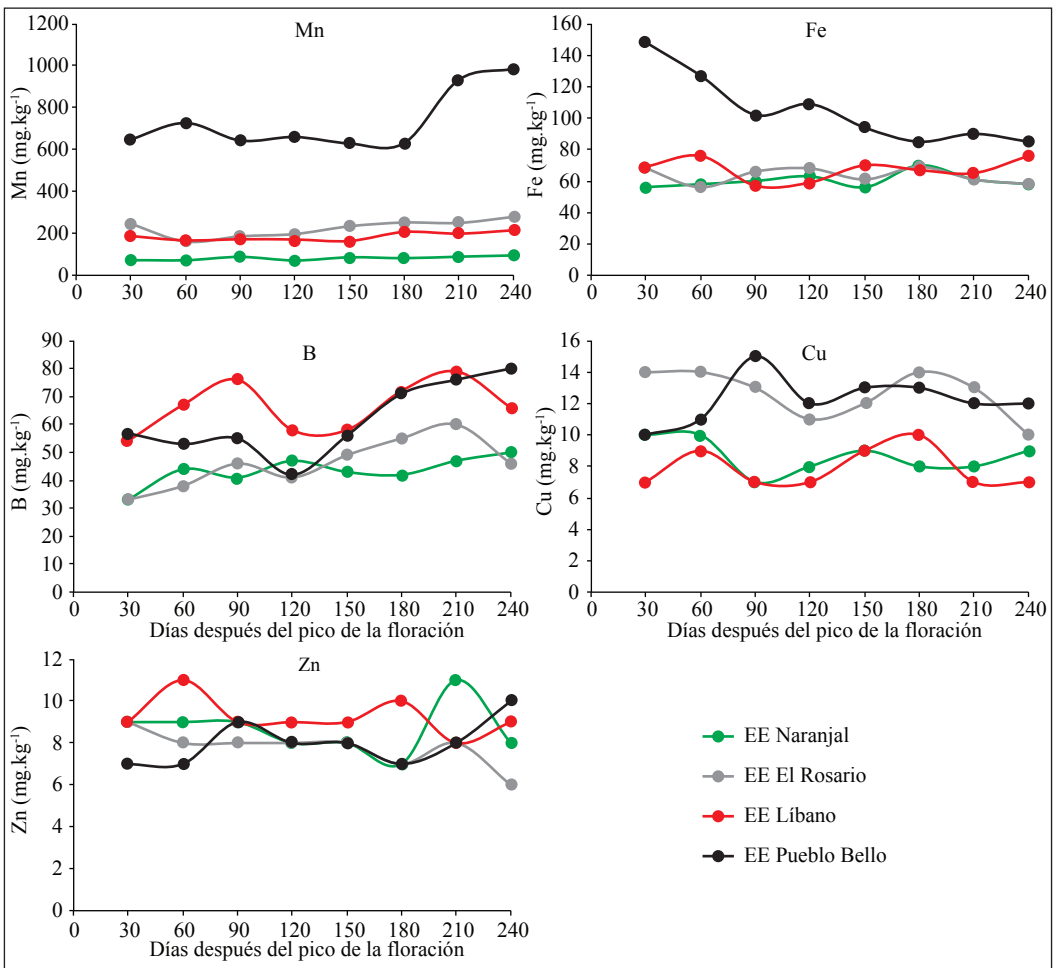


Figura 5. Concentraciones foliares de Mn, Fe, B, Cu y Zn en función de tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

analizan químicamente. Con relación a lo anterior, un hecho fundamental tiene que ver con el crecimiento de la rama entre la floración y la cosecha; en este sentido, las hojas muestreadas –tercero o cuarto par– generalmente están más cerca a los nudos con frutos al inicio del estudio que al final. El aspecto en discusión tiene más sentido cuando se trata de plantas de primera y segunda cosecha, en cuyo caso hay un mayor crecimiento de nuevos nudos en las ramas productivas después de las floraciones.

Refiriéndose al transporte de los nutrientes vía floema, los elementos objeto de estudio se caracterizan por ser de baja movilidad (23,

35), lo cual implicaría que su migración desde el tercero o cuarto par de hojas muestreadas hacia los frutos sea limitada, especialmente si la rama se prolonga luego de la floración y, por consiguiente, incrementa la distancia entre los puntos en mención.

En la Tabla 7 se presentan los valores promedio de las concentraciones de los micronutrientes en las hojas muestreadas. A excepción de cierta tendencia para Mn, no se encontró relación evidente entre los micronutrientes foliares y sus contenidos en el suelo, lo cual puede deberse a la relativa alta disponibilidad de estos elementos en la solución del suelo.

Tabla 7. Promedio de concentración de Mn, Fe, B, Cu y Zn en hojas de café, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Estación Experimental	Mn	Fe	B	Cu	Zn
	(mg.kg ⁻¹)				
Naranjal	82,13	60,25	43,38	8,63	8,63
Líbano	185,13	67,38	66,25	7,88	9,25
Pueblo Bello	225,63	63,38	46,00	12,63	7,75
El Rosario	732,25	105,00	61,25	12,25	8,00

Finalmente, los resultados del estudio permiten concluir que:

- El crecimiento del fruto, medido como la acumulación de la materia seca, se ajustó a una curva sigmoideal doble.
- La concentración de los micronutrientes en el fruto disminuyó durante los primeros cuatro meses después de la floración, resultado que se asoció con un efecto de dilución en respuesta al crecimiento del fruto.
- La tendencia en la acumulación de los micronutrientes se asemejó al crecimiento del fruto, presentando el siguiente orden: Mn>Fe>B>Cu>Zn.
- No se encontró una relación clara entre las variaciones de los micronutrientes foliares y su demanda por los frutos.
- A excepción de Mn, no se detectó efecto de la fertilidad del suelo en la concentración de los elementos en el fruto o en la hoja.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan sus agradecimientos a la señora Beatriz Mejía M., a los ingenieros John Wilson Mejía Montoya, José Raúl Rendón Sáenz, Jorge Camilo Torres Navarro y José Enrique Baute Balcazar, así como a Lady Juliet Vargas Gutiérrez y Diego Alejandro Arcila Vasco.

LITERATURA CITADA

1. ALVARADO A., G.; POSADA S., H.E.; CORTINA G., H.A. Castillo: Nueva variedad de café con resistencia a la roya. Chinchiná : Cenicafé, 2005. 8 p. (Avances Técnicos No. 337).
2. BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Function of nutrients: Micronutrients. p. 191-248. En: Marschner, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. San Diego : Academic Press, 2012.
3. CAMARGO, F.T. DE; FAVARIN, J.L.; BERNARDES, M.S.; LUNZ, A.M.P.; RIGHI, C.A.; ALVES, S.N.R.; REIS, A.R. Crescimento e maturação do fruto do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em um sistema arborizado e em monocultivo. [CD ROM]. Brasil: Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil, 2007.
4. CANNELL, M.G.R. Seasonal patterns of growth and development of Arabica coffee in Kenya: Effects of seasonal differences in rainfall on bean size. Kenya coffee 36(425):176-180. 1971.
5. CANNELL, M.G.R. Factors affecting Arabica coffee bean size in Kenya. Kenya coffee 39(465):342-352. 1974.
6. CANNELL, M.G.R. Physiology of the coffee crop. p. 108-134. En: CLIFFORD, M.N.; WILLSON, K.C. Coffee: Botany, biochemistry and production of beans and beverage. Kent : Croom Helm, 1985.
7. CARRILLO P., I.F.; MEJÍA M., B.; FRANCO A., H.F. Manual de laboratorio para análisis foliares. Chinchiná : Cenicafé, 1994. 52 p.
8. CASTILLO Z., J. Rendimiento de las variedades Típica y Bourbon del *C. arabica* L., en diferentes condiciones de cultivo. Cenicafé 11(5):137-142. 1960.
9. CASTRO, A.M. Efeito de desfrutificações seqüenciadas sobre o crescimento e a produção do cafeeiro arábico. Vinosa : UFV, 2002. 106 p. Tesis de Doutorado.
10. CATANI, R.A.; PELLEGRINO, D.; ALCARDE, J.C.; GRANER, C.A.F. Variação na concentração e na quantidade de macro e micronutrientes no fruto do cafeeiro, durante o seu desenvolvimento. Anais da escola superior de agricultura Luiz de Queiroz 24:249-263. 1967.
11. CHAVES, J.C.D.; SARRUGE, J.R. Alterações nas concentrações de macronutrientes nos frutos e folhas do cafeeiro durante um ciclo produtivo. Pesquisa agropecuaria brasileira 19(4):427-432. 1984.
12. CORRÊA, J.B.; GARCÍA, A.W.R.; COSTA, P.C. DA. Extração de nutrientes pelos cafeeiros Mundo novo e Catuaí. p. 35-41. En: Congresso brasileiro de pesquisas cafeeiras. Rio de Janeiro : Ministério da indústria e do comércio : Instituto brasileiro do café, 1986.
13. CUNHA, R.L.; MARTINS, S.C.V.; CELIN, E.F.; WOLFGRAMM, R.; BATISTA, K.D.; CATEN, A.T.; CHAVES, A.R. DE M.; DAMATTA, F.M. Variações no crescimento vegetativo e reprodutivo em resposta à manipulação da razão fonte:dreno, em *Coffea arabica* L. sob condições de campo. En: Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil. Brasília : Embrapa café, 2007.
14. DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. Micronutrientes. p. 327-354. En: FERNANDES, M.S. Nutrição mineral de plantas. Vinosa : Sociedade brasileira de ciências do solo : SBCS, 2006.
15. GALBO, A.G. Senescência em folhas e migração de solutos. p. 123-134. En: SODEK, L.; CASTRO, P.R.C.; NEVES, M.C.P. Reunião brasileira de fisiologia vegetal. Piracicaba : Sociedade brasileira de fisiologia vegetal, 1989.
16. GÓMEZ G., L. Influencia de los factores climáticos sobre la periodicidad de crecimiento del café. Cenicafé 28(1):3-17. 1977.
17. LAVIOLA, B.G.; MAURI, A.L.; MARTÍNEZ, H.E.P.; ARAÚJO, E.F.; NEVES Y.P. Influência da adubação na formação de grãos mocas e no tamanho de grãos de café (*Coffea arabica* L.). Coffee science 1(1):36-42. 2006.
18. LAVIOLA, B.G.; MARTÍNEZ, H.E.P.; SOUZA, R.B. DE; BARTOLOMEU, R.; ÁLVAREZ, V.H. Dinâmica de cálcio e magnésio em folhas e frutos de *Coffea arabica*. Revista brasileira de ciência do solo 31(2):319-329. 2007.
19. LAVIOLA, B.G.; MARTÍNEZ, H.E.P.; SALOMÃO, L.C.C.; CRUZ, C.D.; MENDONÇA, S.M.; ROSADO, L.D.S. Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em duas altitudes de cultivo: Micronutrientes. Revista brasileira de ciência do solo 31(6):1439-1449. 2007.
20. LAVIOLA, B.G.; MARTÍNEZ, H.E.P.; SALOMÃO, L.C.C.; CRUZ, C.D.; MENDONÇA, S.M. Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes

- de cultivo: Cálcio, magnésio e enxofre. Revista brasileira de ciência do solo 31(6):1451-1462. 2007.
21. LAVIOLA, B.G.; MARTÍNEZ, H.E.P.; SALOMÃO, L.C.C.; CRUZ, C.D.; MENDONÇA, S.M.; ROSADO, L.D.S. Acúmulo em frutos e variação na concentração foliar de NPK em cafeeiro cultivado em quatro altitudes. Bioscience 24(1):19-31. 2008.
 22. MALAVOLTA, E.; FAVARIN, J.L.; MALAVOLTA, M.; CABRAL, C.P.; HEINRICHS, R.; SILVEIRA, J.S.M. Repartição de nutrientes nos ramos, folhas e flores do cafeeiro. Pesquisa agropecuaria brasileira 37(7):1017-1022. 2002.
 23. MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. Principios de nutrición vegetal. Basel : Internacional potash institute, 2000. 692 p.
 24. MORAES, F.R.P. DE; CATANI, R.A. A absorção de elementos minerais pelo fruto do cafeeiro durante sua formação. Bragantia 23(26):331-336. 1964.
 25. RAMÍREZ, F.; BERTSCH, F.; MORA, L. Consumo de nutrimentos por los frutos y bandolas de café Caturra durante un ciclo de desarrollo y maduración en Aquiares, Turrialba, Costa Rica. Agronomía costarricense 26(1):33-42. 2002.
 26. RENA, A.B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. Informe agropecuario 11(126):26-40. 1985.
 27. RIAÑO H., N.M.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; CHAVES C., B. Acumulación de materia seca y extracción de nutrimentos por L. cv. Colombia en tres localidades de la zona cafetera central. Cenicafé 55(4):265-276. 2004.
 28. SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; ARCILA P., J. Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. Cenicafé 57(4):251-261. 2006.
 29. SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; GONZÁLEZ O., H. Acumulación de nitrógeno fósforo y potasio en los frutos de café. Cenicafé 63(1):7-18. 2012.
 30. SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; GONZÁLEZ O., H. Acumulación de calcio magnesio y azufre en los frutos de café. Manizales : Cenicafé, 2013. 8 p. (Avances Técnicos No. 430).
 31. SALAZAR G., M.R.; CHAVES C., B.; RIAÑO H., N.M.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Crecimiento del fruto de café *Coffea arabica* var. Colombia. Cenicafé 45(2):41-50. 1994.
 32. SOUZA, V.H. DA; MAESTRI, M.; BRAGA, J.M.; CHAVES, J.R.P. Variações no teor de alguns elementos minerais nas folhas e frutos de café *Coffea arabica* L. var. Mundo novo. Ceres 22(123):318-331. 1975.
 33. VALARINI, V.; BATAGLIA, O.C.; FAZUOLI, L.C. Macronutrientes em folhas e frutos de cultivares de café arábica de porte baixo. Bragantia 64(4):661-672. 2005.
 34. VALENCIA A., G. La deficiencia de boro en el cafeto y su control. Cenicafé 15(3):115-125. 1964.
 35. WHITE, P.J. Long-distance transport in the xylem and phloem. p. 49-70. En: Marschner, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. San Diego : Academic Press, 2012.

RESPUESTA DEL CAFÉ A LA APLICACIÓN DE SILICIO Y LOMBRINAZA DURANTE LA ETAPA DE ALMÁCIGO

Alveiro Salamanca Jiménez*; Siavosh Sadeghian Khalajabadi*

SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN KH., S. Respuesta del café a la aplicación de silicio y lombrinaza durante la etapa de almácigo. Revista Cenicafé 66 (2): 88-109. 2015

El silicio (Si) no es considerado elemento esencial para la mayoría de las plantas, pero tiene algunos efectos benéficos en muchos cultivos. Para seis unidades cartográficas de suelos de la zona cafetera colombiana, contrastantes en el contenido de Si disponible, se evaluó el efecto de su aplicación en almácigos de café (*Coffea arabica* L.). Para cada suelo se tuvieron 22 tratamientos resultantes de la combinación de dos niveles de lombrinaza (con y sin), cada uno con dos fuentes comerciales de Si, cinco dosis (0,21; 0,42; 0,84; 1,68 y 3,36 g/planta de Si), y un testigo. Por cada tratamiento se sembraron 15 plántulas de café variedad Colombia y se distribuyeron bajo un diseño completamente aleatorio en arreglo factorial. Después de 6 meses se determinó la rigidez estructural de los tallos, el peso de la biomasa seca de raíces y de la parte aérea de las plantas, la relación raíces:parte aérea, además de los niveles de Si, fósforo (P) y CIC en el suelo. Para la mayoría de los suelos, la utilización de lombrinaza tuvo un efecto positivo sobre el crecimiento del café durante la etapa de almácigo. La aplicación de las dosis más altas de Si, a partir de la fuente comercial rica en fósforo, aumentó el crecimiento de las plantas solo cuando las plantas crecieron en suelo sin lombrinaza. El efecto de las dosis y fuentes de este elemento fue asociado más con la aplicación de P en dicha fuente que con la utilización misma de Si, pues la fuente comercial con mayor contenido de Si no tuvo efectos considerables sobre el crecimiento del café en ninguno de los suelos.

Palabras clave: Abono orgánico, crecimiento, nutrición, zona cafetera.

COFFEE RESPONSE TO SILICON AND EARTHWORM MANURE APPLICATION DURING SEEDLING

The Silicon (Si) is not considered an essential element for most of plants, but some positive effects have been reported for many crops. The effect of Si application on coffee seedlings (*Coffea arabica* L.) was evaluated using soils from six cartographic units of the Colombian coffee region, contrasting in its available Si content. For each soil unit, 22 treatments resulting of combining two levels of earthworm manure (with and without), each one with two Si fertilizers, five doses (0.21, 0.42, 0.84, 1.68 and 3.36 g of Si per plant), and one control were evaluated. Each treatment consisted of 15 Colombia variety coffee seedlings distributed in a Completely Randomized Factorial Design. After six months, stem structural rigidity, dry weight of roots and aerial part of plants, root to shoot ratio, as well as soil levels of Si, phosphorus (P) and cationic exchange capacity were evaluated. A positive effect of earthworm manure on coffee seedling growth was registered for most of soils. Only when plants grew up without manure, the application of the highest doses of Si from the fertilizer with higher P content increased plant growth. Then, the effect of Si doses and sources was associated more with the P application in such fertilizer than the use of Si since the fertilizer richer in Si did not affect considerably coffee growth in any of the studied soils.

Keywords: Organic manure, growth, nutrition, coffee region.

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

El silicio (Si) es uno de los elementos de mayor abundancia en la naturaleza y su contenido en el suelo alcanza entre 23% y 35%. Las mayores fuentes de Si son los silicatos primarios, secundarios y el cuarzo (SiO_2), que es el mineral más común en los suelos y comprende del 90% al 95% de las fracciones de arena y limo. Las arenas poco meteorizadas pueden contener más del 40% de este elemento, mientras que suelos tropicales muy meteorizados contienen solo el 9% (17).

El Si es adsorbido en las superficies de los óxidos de Fe y Al, pero también es lavado en suelos altamente meteorizados. En la solución del suelo existe como ácido silícico (H_4SiO_4 ó $\text{Si}(\text{OH})_4$), forma en la cual las plantas lo absorben (19); su contenido varía entre 3 y 37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (17) y es controlado por la reacción de adsorción dependiente del pH. Según Matichenkov (28), la fracción soluble contribuye a restaurar la fertilidad de suelos degradados, neutraliza la toxicidad por Al^{3+} , hidrocarburos y metales pesados, reduce la lixiviación de N, P y K en áreas cultivadas y promueve la transformación de contaminantes activos en formas inertes.

El Si estimula el crecimiento de algunas plantas, por lo que ha sido considerado como “casi esencial” (10), o incluso esencial para un grupo de ellas (15). Su contenido puede variar entre 0,1% y 10% del peso seco y aún estar presente en cantidades mayores a los macronutrientes (13). El arroz (*Oriza sativa*) y la cola de caballo (*Equisetum arvense*), por ejemplo, contienen hasta 16% de este elemento (35).

En las plantas, el Si se acumula como polímero hidratado amorfo ($\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$) en las paredes de las células epidérmicas, o en las paredes primaria y secundaria de otras células de raíces, tallos, hojas e inflorescencias

(19), su transporte a través de la raíz es mediado por un transportador específico y por difusión pasiva (29). Ma *et al.* (25) al comparar arroz silvestre y un mutante que no absorbe Si, encontraron que la acumulación en el xilema es el paso más importante para almacenar una alta cantidad de Si en los tallos y que dicho proceso es controlado por un gen mapeado en el cromosoma 2 del arroz. Ma y Yamaji (24) describen en detalle los dos tipos de transportadores (Lsi1 y Lsi2) identificados molecularmente en la membrana plasmática de diferentes especies, entre ellas de café robusta, y que están involucrados en la absorción y distribución del Si en los tejidos. A partir de estos hallazgos en plantas acumuladoras y no acumuladoras, los mismos autores sugieren que factores como el nivel de expresión, la localización celular y la polaridad de Ls1 y Ls2 son también importantes para la acumulación de Si.

Diferentes autores como Epstein (13, 14), Matichenkov (28), Ma y Yamaji (23, 24) y Havlin *et al.* (17) describen los siguientes efectos benéficos del Si en los cultivos: incrementa la producción; tiende a mantener las hojas erectas que aumentan la interceptación de luz y con ello la fotosíntesis; favorece la resistencia a plagas y enfermedades; mejora la tolerancia a niveles altos de Fe, Mg, radiación y a condiciones de estrés hídrico, bajas y altas temperaturas, exceso de aluminio y salinidad; favorece el desarrollo de raíces de las plantas y aumenta su masa radical; promueve la formación de nódulos en leguminosas; e influye sobre la actividad enzimática y la composición mineral.

Varios autores también reportan efectos de este elemento sobre el desarrollo del café en las diferentes etapas del cultivo y la relevancia que puede tener en el manejo fitosanitario de ciertas plagas y enfermedades. En almácigos de café de las variedades

Catuai y Mondo novo, sembrados en una mezcla de estiércol bovino y material de subsuelo en relación 4:1, Pozza *et al.* (30) mencionan que la aplicación de 1 g de CaSiO_3 por kilogramo de sustrato, redujo el número de hojas infectadas y de lesiones causadas por mancha de hierro (*Cercospora coffeicola* L.). En un estudio similar con diferentes dosis de ácido silícico en café Catuai rojo, Botelho *et al.* (5) registraron una reducción del área de progreso bajo la curva del número de lesiones con el aumento de las dosis, pero no hubo un efecto significativo de éstas sobre la incidencia y severidad de la enfermedad. Para los dos estudios, la presencia de Si en el tejido foliar fue confirmada mediante técnicas de microscopía de barrido electrónico y microanálisis de rayos X.

Santos *et al.* (36) al evaluar la aplicación de cuatro dosis de SiO_2 (0; 0,32; 0,63 y 1,26 g.kg^{-1} de sustrato) a partir de silicatos de calcio y sodio, sobre la incidencia y severidad de mancha de hierro en almácigos de café, aseguran que el contenido de lignina en las plantas aumentó hasta una dosis de 0,52 g.kg^{-1} de SiO_2 (tendencia cuadrática), y que al incrementar las dosis se redujo linealmente el número de plantas enfermas en un 10,8%, al tiempo que con la mayor dosis ocurrió la menor área bajo la curva de progreso del número de plantas enfermas. Según Martinati *et al.* (26, 27) al aumentar la concentración de silicato de K en plantas de café disminuyó linealmente hasta en un 66% el número de lesiones causadas por roya (*Hemileia vastratix*), indicando que éstas son razones suficientes para sugerir el uso del Si como una alternativa ecológica para el manejo de enfermedades en café.

Para las condiciones de suelo y clima de la zona cafetera colombiana, se cita el estudio de Caicedo y Chavarriaga (6) con

suelo de la unidad Chinchiná, en el cual la respuesta (crecimiento) de los almácigos a una aplicación de 3, 6 y 9 g de Si fue mayor cuando estas dosis se combinaron con 3 g de DAP por planta. De igual manera, casas comerciales que distribuyen fertilizantes ricos en Si refieren algunas observaciones en diferentes especies incluyendo café, pero en general, la información experimental con Si en los cultivos es limitada. Por ello, con el presente experimento se buscó generar conocimientos acerca de la respuesta del café en la etapa del almácigo a la aplicación de este elemento, para diferentes suelos de la zona cafetera.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo bajo condiciones de almácigo, entre marzo de 2005 y febrero de 2006, en el Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, ubicado en el municipio de Manizales - Caldas, a 5° 0' de latitud Norte, 75° 36' longitud Oeste y 1.310 m de altitud. Para el año 2005 se registraron las siguientes condiciones climáticas: precipitación anual 3.107 mm, temperatura media 21,5°C, humedad relativa 82% y brillo solar 1.715 h.

Los suelos utilizados corresponden a seis unidades cartográficas de la zona cafetera, contrastantes en sus propiedades físicas y químicas (Tabla 1). Por cada unidad, el suelo se recolectó en los primeros 15 cm del perfil de un lote aledaño a un cafetal y que no había sido fertilizado en los últimos 10 años.

Como abono orgánico se usó lombrinaza obtenida a partir de la transformación de pulpa de café por lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) y por volteos continuos posteriores durante 2 meses, en el beneficiadero de Cenicafé. Dicha lombrinaza presentó una

humedad de 58,8%, pH ligeramente alcalino (7,4), 60,2% de cenizas y las siguientes concentraciones de nutrientes en base seca: 3,0% de N, 0,3% de P, 3,2% de K, 1,8% de Ca, 0,4% de Mg, 10.801 mg.kg⁻¹ de Fe, 272 mg.kg⁻¹ de Mn, 82 mg.kg⁻¹ de Zn, 67 mg.kg⁻¹ de Cu y 60 mg.kg⁻¹ de B.

Por cada unidad de suelo se evaluaron 22 tratamientos, resultantes de la combinación de dos niveles de lombrinaza (con y sin), dos fuentes de Si (FC1, FC2), cinco dosis de Si (0,21 0,42 0,84 1,68 y 3,36 g/planta) incorporadas en el sustrato antes del trasplante y un testigo sin aplicación del elemento para cada nivel de lombrinaza. Para los tratamientos con abono orgánico se utilizó la proporción recomendada por Cenicafé: tres partes de suelo por una de abono (v/v) (3:1) y como fuentes de Si se usaron dos fertilizantes granulados con la siguiente composición química:

- Fuente comercial 1 (FC1): 90% de SiO₂ y 3% de K₂O.
- Fuente comercial 2 (FC2): 75% de SiO₂, 7% de P₂O₅ y 3% de S, enriquecido con zeolita (mineral con alta CIC).

Por cada tratamiento, se llenaron 15 bolsas plásticas de 17 x 23 cm y en cada bolsa se trasplantó una plántula de café variedad Colombia. Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial (2 x 2 x 5 + 1) y alrededor de las 330 bolsas efectivas, por unidad de suelo, se incluyeron plántulas de café como bordes.

El almácigo fue instalado bajo una cobertura de malla polisombra y recibió el manejo agronómico recomendado por Arcila (1), para esta etapa fenológica del cultivo, concerniente a control de arvenses y manejo

fitosanitario. Al cabo de 6 meses, al finalizar la etapa de almácigo, se registró la siguiente información:

Como variables de respuesta se midieron el peso de la biomasa seca de raíces y de parte aérea, para las 15 plantas de todos los tratamientos.

Adicionalmente y para un número más reducido de repeticiones, debido a la complejidad y costo de las mediciones, se registró:

Para tres de las 15 repeticiones de los tratamientos correspondientes a las dosis 0 (Testigos), 1,38 y 3,36 g/planta con las dos fuentes, se evaluó en los sustratos el contenido de Si, el contenido de P en las hojas y para una mezcla compuesta del sustrato de dichas repeticiones se midió el nivel de P. El Si se determinó por el método colorimétrico, ajustado en el laboratorio de Cenicafé a partir de las metodologías descritas por Cenipalma (9), Hallmarck *et al.* (16), Korndörfer *et al.* (20) y Wang *et al.* (40). En tres repeticiones de estas dosis, para cuatro unidades de suelo, se midieron los cambios en la CIC ocasionados por los contenidos de zeolita en la fuente FC2, ya que según Curi *et al.* (12), este mineral incrementa la CIC en el suelo y favorece sus propiedades físicas y químicas, al igual que la remoción de metales pesados contaminantes. Los niveles de CIC y P fueron medidos con base en las metodologías descritas por Carrillo (7) y Carrillo *et al.* (8).

De igual manera, con el fin de corroborar si el Si absorbido podía ofrecer mayor resistencia en el tallo y a la vez, tener implicaciones prácticas para evitar plantas defectuosas cuando su transporte no es el más indicado, para las 15 plantas de los tratamientos correspondientes a las dosis 0

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de los suelos.

Propiedad	Chinchiná	200	Montenegro	San Simón	Suroeste	Timbío
Propiedades físicas						
Densidad aparente, g.cm ⁻³	0,78	1,02	0,80	1,30	0,73	0,52
Densidad real, g.cm ⁻³	2,35	2,63	2,45	2,64	2,23	2,01
Macroporos, %	21,32	17,32	24,54	18,65	18,43	31,87
Mesoporos, %	17,32	6,43	13,3	13,34	16,32	13,68
Microporos, %	28,02	37,55	29,5	18,73	32,47	28,42
Arenas, %	49,08	14,26	54,33	53,97	30,82	50,94
Limos, %	31,69	22,37	26,64	16,73	31,46	24,87
Arcillas, %	18,93	61,67	18,47	30,33	37,72	24,59
Resistencia a la penetración, kg.cm ⁻²	1,19	3,89	1,69	2,22	SD	1,00
Propiedades químicas						
pH	5,0	5,1	5,4	5,0	4,1	5,0
MO, %	8,3	6,1	7,9	4,3	9,5	20,7
N, %	0,35	0,27	0,33	0,2	0,39	0,69
K, cmol _c .kg ⁻¹	0,15	0,18	0,68	0,09	0,33	0,55
Ca, cmol _c .kg ⁻¹	0,9	1,7	6,1	3,6	0,8	6,3
Mg, cmol _c .kg ⁻¹	0,3	0,8	1,1	1,2	0,5	2,7
Na, cmol _c .kg ⁻¹	0,030	0,021	0,018	0,049	0,016	0,014
Al, cmol _c .kg ⁻¹	0,4	0,4	0,1	0,3	10	0,5
CIC, cmol _c .kg ⁻¹	21	14	20	11	24	35
P, mg.kg ⁻¹	2	2	12	3	3	2
Fe, mg.kg ⁻¹	123	161	124	265	233	260
Mn, mg.kg ⁻¹	13	42	31	18	26	35
Zn, mg.kg ⁻¹	4	0	8	1	2	7
Cu, mg.kg ⁻¹	8	5	1	1	3	4
B, mg.kg ⁻¹	0,2	0,29	0,41	0,07	0,27	0,3
S, mg.kg ⁻¹	6,2	2,9	5,2	4,5	0,3	2,1
Si, mg.kg ⁻¹	106,6	21,6	73,7	22,3	42,9	129,5

(Testigos), 1,38 y 3,36 g/planta se evaluó la rigidez estructural de los tallos en la máquina INSTRON 5569. Se trata de una propiedad mecánica que integra el módulo de elasticidad o de Young y el momento de inercia, y que permite conocer la capacidad de cualquier material para doblarse o deformarse después de aplicarle cierta carga o presión (3, 18).

El procedimiento para evaluar dicha propiedad consistió en cortar un trozo

de tallo de 8 cm de longitud, medidos a partir de la base de cada planta, luego de medir su diámetro y someterlo a una carga concentrada en su centro (ensayo de flexión en 3 puntos) a una velocidad de deformación de 5 mm.min⁻¹. Se asumió un comportamiento elástico y se registró la carga aplicada para deformar el trozo hasta 3 mm, segundo a segundo, durante 37 segundos. La rigidez estructural-EI (donde E representa el módulo de Young e I el

momento de inercia de la viga) se obtuvo para cada intervalo de tiempo mediante la Ecuación <1>.

$$EI = PL^3/48y <1>$$

Donde:

P: Fuerza aplicada hasta lograr la deformación y, N

L: Longitud de la viga (trozo), m

y: Deformación en el centro del trozo, m

Por cada unidad de suelo y tratamiento se estimaron los promedios de las variables relacionadas con la planta y el suelo (Si y CIC). Con dichas variables, se realizó un análisis de varianza al 5% por unidad de suelo bajo el modelo de análisis para el diseño experimental propuesto y se evaluó el efecto de las tres fuentes de variación (nivel de lombrinaza, fertilizante, dosis de Si) tanto a nivel individual como en interacción. Para los casos en que dicho análisis mostró efecto de las dosis de Si, éstas se compararon con el testigo sin aplicación de Si mediante la prueba de Dunnett.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan los valores de los cuadrados medios para cada una de las fuentes de variación con sus respectivas interacciones, para aquellas variables donde hubo efectos significativos al 1% y al 5%. En general, solo se registró efecto de la interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi para las variables relacionadas con la biomasa y la rigidez del tallo en la unidad Chinchiná, para el Si edáfico en San Simón y para la relación Raíz: Parte aérea en Timbío. Para las unidades y variables restantes, en su mayoría se resalta el efecto de la utilización de la lombrinaza y del tipo de fertilizante.

Peso de la biomasa seca de raíces

La mayor diferencia encontrada en casi todas las combinaciones suelo:lombrinaza estuvo asociada a la presencia del material orgánico en el sustrato, la cual aumentó significativamente la biomasa seca de raíces en los cinco suelos diferentes a la unidad Chinchiná (Figura 1).

Solo en la unidad Chinchiná se registró un efecto de la interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi (P=0,0014) sobre esta variable, y los mayores promedios del peso de raíces se registraron al utilizar lombrinaza en combinación con las dosis altas de la FC2. Al comparar los promedios entre las diferentes dosis de la FC2 con el testigo (Prueba de Dunnett al 5%), los mayores valores correspondieron a los obtenidos con 0,84 y 3,36 g de Si por bolsa en el suelo de la unidad Chinchiná. En ausencia de lombrinaza, el peso de raíces para la dosis de 0,42 g de Si a partir de la FC2, fue mayor que en el testigo.

En la unidad 200 el análisis de varianza indicó un efecto de las interacciones Lombrinaza*DosisSi (P=0,0255) y Fertilizante*DosisSi (P=0,0055), pero ninguna de las dosis de Si a partir de la FC2 fue diferente del testigo. Sin lombrinaza, la dosis de 3,36 g de Si por planta con la FC2, sobresalió frente al testigo según prueba Dunnett al 5%.

Para los suelos de las unidades Montenegro y San Simón se registró efecto de los niveles de lombrinaza (P<0,0001) pero no hubo efecto de los fertilizantes ni de las dosis de Si sobre el peso seco de raíces.

En el suelo de la unidad Suroeste hubo efecto de la interacción Lombrinaza*Fertilizante así como de la dosis de 0,84 g de Si con

Tabla 2. Valores de los cuadrados medios (CM) y niveles de significancia (al 1%** y al 5%*) para todas las variables estudiadas por unidad de suelo.

Fuente de variación	Biomasa raíces	Biomasa aérea	RRPA	Rigidez tallo	Silicio suelo	Fósforo foliar	CIC suelo
Unidad Chinchiná							
Lombrinaza	2,90 **	83,62 **	0,238 **	1,4E-4 ns	3664 **	0,103 **	197,5 **
Fertilizante	3,58 **	47,52 **	0,011 ns	1,2E-3 **	8,44 ns	7,7E-3 ns	
Lomb*Fert	0,10 ns	11,78 **	0,038 **	3,4E-5 ns	153,7 ns	0,019 ns	
DosisSi	0,67 **	6,63 **	0,018 **	3,2E-4 **	22,48 ns	9,3E-4 ns	53,43 **
Lomb*DosisSi	0,70 **	7,48 **	0,011 *	1,9E-4 *	3,20 ns	5,0E-4 ns	20,18 *
Fert*DosisSi	1,20 **	8,03 **	0,026 **	3,0E-4 **	40,39 ns	1,2E-3 ns	
Lomb*Fert*DosisSi	0,61 **	8,78 **	0,031 **	4,4E-4 **	0,17 ns	2,0E-4 ns	
Unidad 200							
Lombrinaza	62,58 **	1422 **	0,099 **	0,016 **		0,059 **	265,0 **
Fertilizante	2,05 **	55,84 **	0,021 **	2,1E-3 **		1,7E-5 ns	
Lomb*Fert	2,0E-3 ns	0,30 ns	7,4E-3 ns	7,7E-5 ns		7,4E-3 ns	
DosisSi	1,01 **	11,40 *	0,031 **	5,3E-4 ns		1,5E-4 ns	2,41 ns
Lomb*DosisSi	0,64 *	4,55 ns	3,6E-3 ns	7,4E-5 ns		4,8E-3 ns	1,48 ns
Fert*DosisSi	0,84 **	10,98 *	6,6E-3 ns	1,0E-4 ns		8,2E-4 ns	
Lomb*Fert*DosisSi	0,52 ns	7,11 ns	1,7E-3 ns	8,6E-6 ns		8,2E-4 ns	
Unidad Montenegro							
Lombrinaza	26,18 **	774,2 **	1,476 **	5,2E-3 **		0,042 **	
Fertilizante	0,82 ns	1,19 ns	2,9E-3 ns	1,6E-4 ns		2,0E-3 ns	
Lomb*Fert	9,3E-3 ns	5,31 ns	0,061 ns	5,7E-4 *		2,7E-4 ns	
DosisSi	0,18 ns	1,84 ns	0,061 *	1,7E-6 ns		1,5E-4 ns	
Lomb*DosisSi	0,18 ns	2,61 ns	0,017 ns	9,0E-5 ns		0,000 ns	
Fert*DosisSi	0,35 ns	1,78 ns	0,020 ns	1,5E-4 ns		3,3E-3 ns	
Lomb*Fert*DosisSi	0,72 *	2,47 ns	0,014 ns	1,2E-4 ns		2,8E-3 ns	
Unidad San Simón							
Lombrinaza	5,79 **	554,0 **	1,380 **	2,9E-3 **	456,6 **		209,8 **
Fertilizante	0,09 ns	1,10 ns	7,9E-3 ns	1,7E-4 ns	104,5 **		
Lomb*Fert	0,27 ns	0,25 ns	0,039 **	2,7E-5 ns	207,4 **		
DosisSi	0,31 ns	4,60 ns	0,034 **	2,5E-4 ns	79,08 **		5,28 ns
Lomb*DosisSi	0,19 ns	4,35 ns	0,015 *	1,3E-5 ns	30,75 ns		6,63 ns
Fert*DosisSi	0,56 ns	2,72 ns	0,015 **	5,0E-6 ns	26,75 ns		
Lomb*Fert*DosisSi	0,13 ns	0,61 ns	9,6E-3 ns	2,0E-4 ns	57,51 *		
Unidad Suroeste							
Lombrinaza	92,79 **	2107 **	0,388 **	0,03 **	132,5 *		
Fertilizante	0,68 ns	20,06 ns	0,053 **	2,4E-3 *	19,78 ns		
Lomb*Fert	5,65 **	47,18 **	7,4E-3 ns	3,8E-4 ns	6,98 ns		
DosisSi	0,86 ns	4,93 ns	0,040 **	1,6E-5 ns	150,4 ns		
Lomb*DosisSi	0,57 ns	4,20 ns	2,4E-3 ns	2,7E-5 ns	0,28 *		
Fert*DosisSi	0,38 ns	6,92 ns	3,2E-3 ns	9,1E-4 ns	50,17 ns		
Lomb*Fert*DosisSi	0,03 ns	1,43 ns	4,1E-3 ns	2,2E-4 ns	144,4 *		

Continúa...

...continuación

Fuente de variación	Biomasa raíces	Biomasa aérea	RRPA	Rigidez tallo	Silicio suelo	Fósforo foliar	CIC suelo
Unidad Timbío							
Lombrinaza	68,31 **	1764 **	0,243 **	0,018 **			
Fertilizante	3,63 **	45,91 **	2,0E-3 ns	2,6E-3 **			
Lomb*Fert	0,03 ns	2,60 ns	0,014 **	1,3E-5 ns			
DosisSi	0,80 *	6,97 ns	0,045 **	2,1E-5 ns			
Lomb*DosisSi	0,78 *	5,71 ns	2,4E-3 ns	3,8E-7 ns			
Fert*DosisSi	0,49 ns	8,82 ns	5,4E-3 *	4,9E-5 ns			
Lomb*Fert*DosisSi	0,34 ns	10,35 ns	6,5E-3 *	1,3E-4 ns			

RRPA= Relación Raíces: Parte aérea; CIC= Capacidad de intercambio catiónico; ns= no significativo; Casillas en blanco indican no estimación del valor de CM o ausencia de significancia del modelo según el análisis de varianza al 5%.

la FC1; las tres dosis más altas de la FC2 (0,84; 1,68 y 3,36 g/planta) exhibieron los mayores promedios en esta variable respecto a los testigos.

Para la unidad Timbío se encontraron diferencias entre los niveles de lombrinaza ($P<0,0001$) y entre los fertilizantes ($P=0,0004$), sobresaliendo la presencia de material orgánico y la FC2.

Dado que en la mayoría de los casos, las dosis de la FC1 no incrementaron significativamente el crecimiento de raíces de las plantas de café durante la etapa de almácigo, los anteriores resultados se relacionaron más con el contenido de fósforo en la fuente FC2 que con el contenido mismo de Si y en cierta medida coinciden con los resultados de Caicedo y Chavarriaga (6) quienes indican un efecto de la fuente FC1 sobre el peso de raíces de café variedad Colombia, pero solo cuando se combinó con 3 g de DAP por planta. No obstante, en otro estudio Ribeiro *et al.* (32), señalan que plantas de café variedad Catuai durante la etapa de almácigo tratadas con una dosis alta de Si, equivalente a 6 Mg.ha⁻¹ de silicato de calcio, exhibieron menor acumulación de materia seca en las raíces, equivalente a una reducción del

50% del crecimiento radicular diario, pero sin comprometer la disponibilidad hídrica o nutricional de la parte aérea.

Peso de la biomasa seca de partes aéreas

Al igual que para el crecimiento de raíces, en la unidad Chinchiná se registró efecto de la interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi ($P<0,0001$) y no se observaron diferencias entre los dos niveles de lombrinaza, mientras que en los cinco suelos restantes, el promedio de esta variable fue mayor con la utilización del abono orgánico (Figura 2).

En la unidad Chinchiná los mayores promedios de peso de la parte aérea frente al testigo (Dunnett, 5%) se registraron en presencia de lombrinaza con la aplicación de 3,36 y 0,84 g de Si por planta, a partir de la FC2. Sin Lombrinaza, la dosis 0,84 g de Si por planta a partir de la FC1 en Chinchiná, exhibió un mayor promedio comparada con el testigo.

Para el suelo de la unidad 200 hubo un efecto de la utilización de Lombrinaza ($P<0,0001$) y de la interacción Fertilizante*DosisSi ($P=0,0144$) sobresaliendo aquellos tratamientos con abono orgánico y la FC2. Sin Lombrinaza, igualmente las dosis 1,68 y 3,36 g de Si con

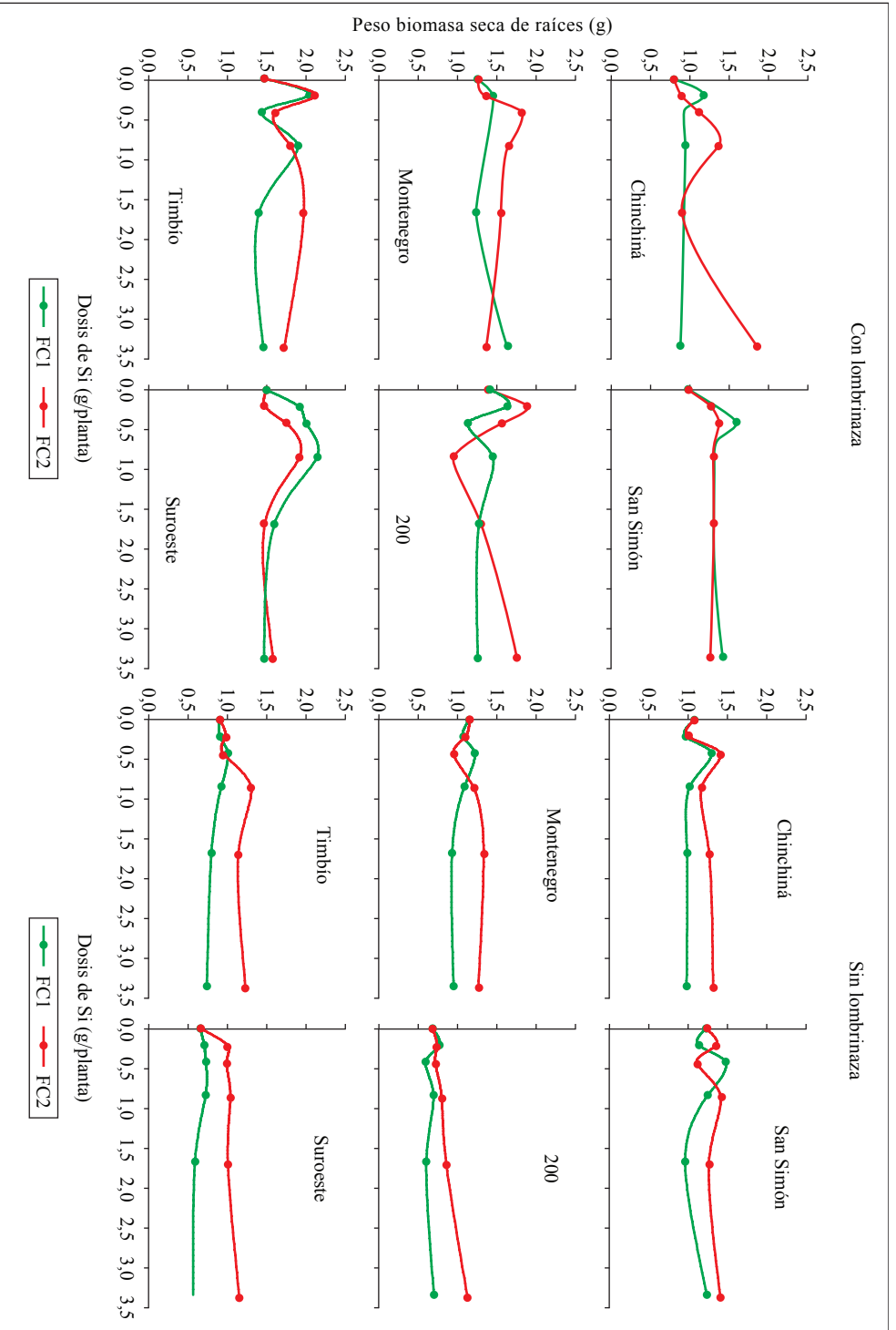


Figura 1. Peso de la biomasa seca de raíces en plantas de café sembradas en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y Si (FC= Fuente comercial de Si).

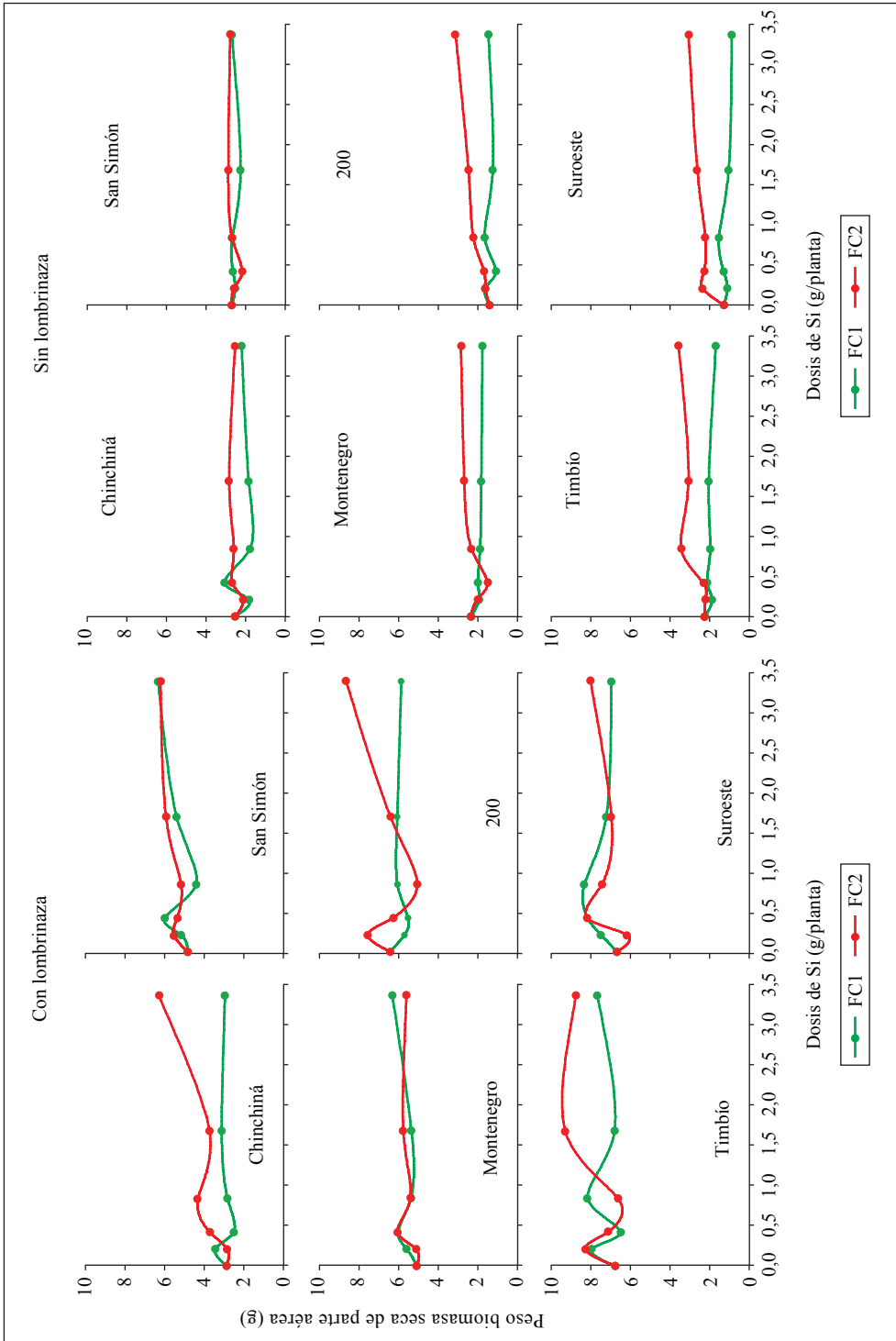


Figura 2. Peso de la biomasa seca de partes aéreas en plantas de café sembradas en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y de Si (FC= Fuente comercial de Si).

la FC2 incrementaron el peso de la parte aérea frente al testigo.

En las unidades Montenegro y San Simón hubo efecto solo de los niveles de lombrinaza ($P < 0,0001$) a favor de la aplicación de este abono orgánico, pero no de las fuentes ni las dosis de Si.

En la unidad Suroeste la interacción Lombrinaza*Fertilizante ($P = 0,0064$) afectó la biomasa de la parte aérea, sobresaliendo la aplicación de abono orgánico y en su ausencia, la utilización de las dosis 1,68 y 3,36 g de Si a partir de la FC2.

Para la unidad Timbío se registró un efecto de los niveles de Lombrinaza ($P < 0,0001$) a favor de la utilización de abono orgánico y también un efecto de los Fertilizantes ($P = 0,0010$) a favor de la FC2. No obstante, en ausencia de lombrinaza las dosis de 0,84 y 3,36 g fueron las que presentaron los mayores promedios de esta variable, comparados con el testigo sin aplicación de Si.

Similar a lo observado para las raíces en presencia de abono orgánico con la fuente FC1, no hubo efectos sobre la biomasa seca de la parte aérea de los almácigos en alguno de los suelos. Caicedo y Chavarriaga (6) también encontraron los mayores pesos de la parte aérea al incorporar 6 g de Si y 3 g de DAP al momento de la siembra. Aunque los mismos autores aseguran un efecto combinado de estos dos elementos, los resultados del presente estudio no permiten realizar la misma afirmación y corroboran el efecto positivo del fósforo sobre el vigor de las plantas. En otro estudio en Brasil, Ribeiro *et al.* (32) reportan que aunque la masa radicular disminuyó con altas dosis de Si, no hubo efecto sobre la biomasa aérea de las plantas ni sobre su asimilación

de CO_2 y la conductancia estomática. El mismo estudio menciona también que la aplicación de silicato de calcio no afectó significativamente el diámetro del tallo, la altura de las plantas, el área foliar ni el peso total de la biomasa seca de las plantas.

Relación raíces: parte aérea

Con excepción de la unidad 200, en todos los suelos la relación raíces:parte aérea de las plantas fue mucho mayor sin lombrinaza en las bolsas del almácigo que cuando las plantas crecieron con abono orgánico (Figura 3). La interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi afectó significativamente esta variable en Chinchiná ($P < 0,0001$) y Timbío ($P = 0,0145$) sobresaliendo las dosis de 0,42, 0,84 y 0,21 g de Si con la FC1 y de 0,42 y 3,36 g de Si a partir de la FC2 en Chinchiná, así como las dosis de 0,84, 0,21 y 0,42 g de Si a partir de la FC1 y 0,84 g de Si con la FC2 en Timbío.

Así mismo, se registró un efecto de la interacción Fertilizante*DosisSi en las unidades 200 ($P = 0,0326$) y San Simón ($P = 0,0093$), pero solo en esta última sobresalieron las dosis de 0,42 g de Si con la FC1 y 0,84 g de Si a partir de la FC2 en ausencia de lombrinaza, lo cual a su vez explica el efecto de la interacción Lombrinaza*DosisSi encontrado en la unidad San Simón ($P = 0,0101$).

Respecto al efecto único de los niveles de lombrinaza, éste fue registrado en los suelos de las unidades 200 ($P < 0,0001$), Montenegro ($P < 0,0001$) y Suroeste ($P < 0,0001$) sin aplicación de material orgánico.

La ausencia de lombrinaza permitió diferenciar mejor el efecto de cada suelo sobre la distribución de asimilados en las

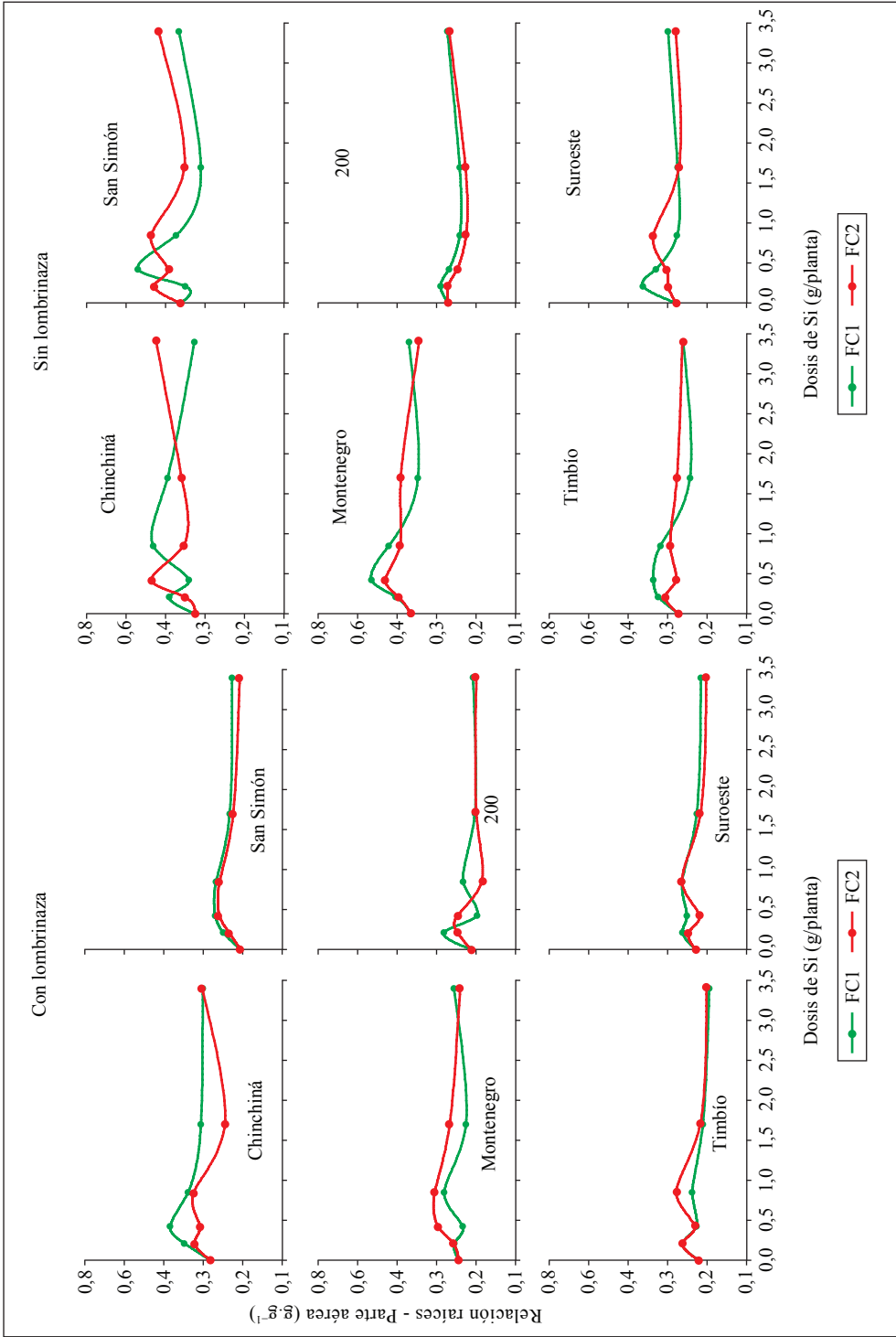


Figura 3. Relación raíces:parte aérea en plantas de café sembradas en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y de Si (FC= Fuente comercial de Si).

plantas, pues los mayores valores se registraron en los suelos de las unidades Chinchiná, San Simón, Montenegro y no se encontró alguna diferencia significativa entre los dos fertilizantes ni entre las dosis de cada fuente por unidad de suelo. En cambio, cuando se adicionó el abono orgánico la distribución de asimilados en las plantas fue similar tanto entre fuentes y dosis de Si como entre los suelos evaluados, lo cual refleja una capacidad intrínseca de las plantas de café para emitir una cierta proporción de raíces y de parte aérea en respuesta a las condiciones del sustrato. Lo anterior también resalta la importancia del uso de lombrinaza en la fertilidad del sustrato ya que su ausencia obliga a las plantas a producir más raíces en busca de nutrientes, afectando negativamente la acumulación de biomasa aérea.

Al respecto, Ribeiro *et al.* (32) reportan que la aplicación de silicato de calcio aumentó la proporción de raíces y a su vez disminuyó la relación raíces:parte aérea; no obstante, dado que los resultados de este estudio mostraron efecto de las Dosis de Si, pero en interacción con el tipo de fertilizante o el nivel de lombrinaza en solo dos de los suelos, no es posible concluir acerca del efecto del Si en la distribución de asimilados, contrario a lo que se reporta para otros nutrientes como el N, el cual reduce la proporción de raíces y aumenta la proporción de partes aéreas.

Rigidez estructural del tallo

Esta propiedad fue favorecida en todas las unidades de suelo por la aplicación de lombrinaza (Figura 4) y su comportamiento siguió un patrón similar al observado para el diámetro del tallo (datos no mostrados), debido a que se deriva directamente de éste. A mayor diámetro mayor fue la rigidez estructural.

Como en las variables relacionadas con la biomasa de la planta, la rigidez del tallo también fue afectada en la unidad Chinchiná por la interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi ($P < 0,0001$) a favor de la utilización de lombrinaza y la dosis más alta de Si como FC2 (3,36 g/planta), cuya combinación dio lugar a la mayor rigidez estructural del tallo, comparada con el testigo sin aplicación del elemento (Dunnett, 5%).

En las unidades 200, Suroeste y Timbío, hubo efecto de los niveles de lombrinaza ($P < 0,0001$; $P < 0,0001$; $P < 0,0001$) y de las fuentes de Si ($P = 0,0002$; $P = 0,0113$; $P < 0,0001$) a favor de la utilización de este abono orgánico y la FC2. En las unidades 200 y Suroeste, la dosis alta de la FC2 (3,36 g/planta), aumentó la rigidez estructural de los tallos en comparación con la dosis cero de cada suelo (Dunnett, 5%), mientras que en la unidad Montenegro se registró un efecto de la interacción Lombrinaza*Fertilizante ($P = 0,0185$) en la cual sobresalió la FC2 frente a la FC1, solo cuando no se aplicó lombrinaza.

Similar a lo reportado para las otras variables, en ninguno de los suelos se encontró efecto de la FC1.

Según Ma y Yamaji (23, 24) la mayoría de los efectos benéficos del Si en las plantas se atribuyen a su disposición en forma de SiO_2 en las paredes celulares de raíces, tallos, hojas y cáscaras, la cual a su vez funciona como una barrera física que aumenta la resistencia y la rigidez de dichos tejidos e impide mecánicamente la entrada o el daño causado por hongos e insectos. No obstante, dado posiblemente a que el café es considerado una planta no acumuladora de Si, el efecto de su aplicación sobre la rigidez estructural del tallo no fue evidente.

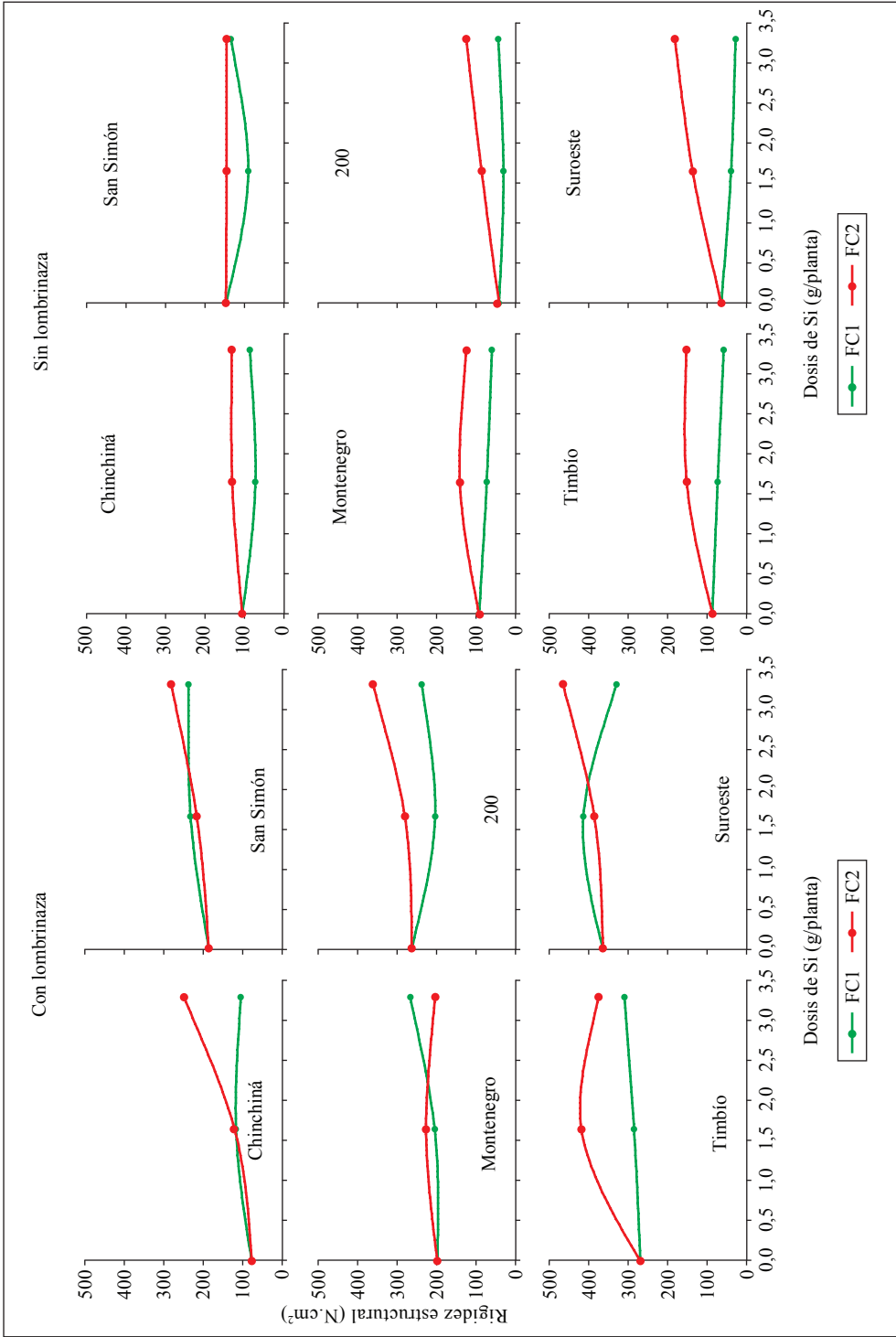


Figura 4. Rigidez estructural del tallo en plantas de café sembradas en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y de Si (FC= Fuente comercial de Si).

Contenido de Si en el suelo

En la mayoría de los suelos no se modificaron los contenidos de Si con la utilización de lombrinaza con respecto al suelo sin abono orgánico, con excepción de las unidades Chinchiná, San Simón y Suroeste, en las cuales se disminuyó el contenido de Si en el suelo en alguna de las combinaciones abono orgánico fertilizante (Figura 5).

Se registró un efecto negativo de la utilización de Lombrinaza en el suelo de la unidad Chinchiná ($P < 0,0001$), así como un efecto significativo de la interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi en las unidades San Simón ($P < 0,0142$) y Suroeste ($P = 0,0274$). Particularmente, en San Simón con lombrinaza, la aplicación de 1,68 g de Si por planta con los dos fertilizantes y de 3,36 g/planta en forma de la FC1, exhibieron menores promedios en los contenidos de Si que el testigo, mientras que en la unidad Suroeste sin lombrinaza se disminuyó el contenido de Si en el suelo con la aplicación de 3,36 g de Si por planta en forma de la FC1 con relación al testigo donde no se aplicó el elemento (Prueba Dunnett 5%).

En las unidades restantes, no hubo efecto de la lombrinaza ni de las fuentes y dosis de Si evaluadas sobre el contenido de este elemento en el sustrato al finalizar la etapa del almácigo.

Respecto al efecto negativo de la aplicación del Si sobre su contenido en el suelo, mencionado para estas tres unidades sin ser contraproducente para el crecimiento de las plantas, Savant *et al.* (38) aseguran que las diversas respuestas encontradas a partir de las aplicaciones de Si están relacionadas con los distintos factores y procesos involucrados en la cinética de su disolución en el suelo. Es posible que haya ocurrido polimerización

de este elemento, la cual según Berthelsen y Korndörfer (4) ocurre cuando se aumentan las concentraciones de Si y se incrementa el pH en el suelo, en presencia de hidróxidos de hierro y aluminio.

La poca respuesta del crecimiento de las plantas y del contenido de Si en el suelo a partir de los fertilizantes evaluados puede asociarse en parte a que los niveles iniciales de este elemento en las unidades estudiadas pueden considerarse altos (Tabla 1) si se comparan con suelos de otras regiones del mundo, con condiciones climáticas diferentes. De acuerdo con Korndörfer *et al.* (20) un contenido de 19 mg.L⁻¹ es considerado como el nivel crítico de Si soluble en el suelo por debajo del cual se espera una respuesta productiva del arroz a los fertilizantes silicatados; cultivo que según Rains *et al.* (31) es el que acumula en mayor cantidad este elemento. Korndörfer *et al.* (20) también afirman que cuando los niveles de Si en el suelo son bajos (<6 mg.L⁻¹), medios (6-24 mg.L⁻¹) o altos (>24 mg.L⁻¹), las cantidades de silicato de calcio necesarias para corregir las deficiencias de Si en el suelo y obtener una producción óptima de arroz son de 1.500, 1.120 y 0 kg.ha⁻¹, respectivamente.

En el café, aunque se ha comprobado su absorción en algunas variedades mediante microscopía de barrido electrónico y microanálisis de rayos X (5, 30) según los criterios descritos por Ma y Takahashi (22), los bajos contenidos foliares de Si en comparación con sus contenidos de Ca, lo catalogan como una planta poco o no acumuladora. Según Reis *et al.* (2007), citado por Botelho *et al.* (5), los contenidos de Si en la hojas de café varían entre 0,2 y 0,3 %, mientras que Caicedo y Chavarriaga (6) reportan niveles entre 0,1 y 0,5. Una estimación del contenido foliar de Si en este estudio registró valores entre 0,05% y 0,45%

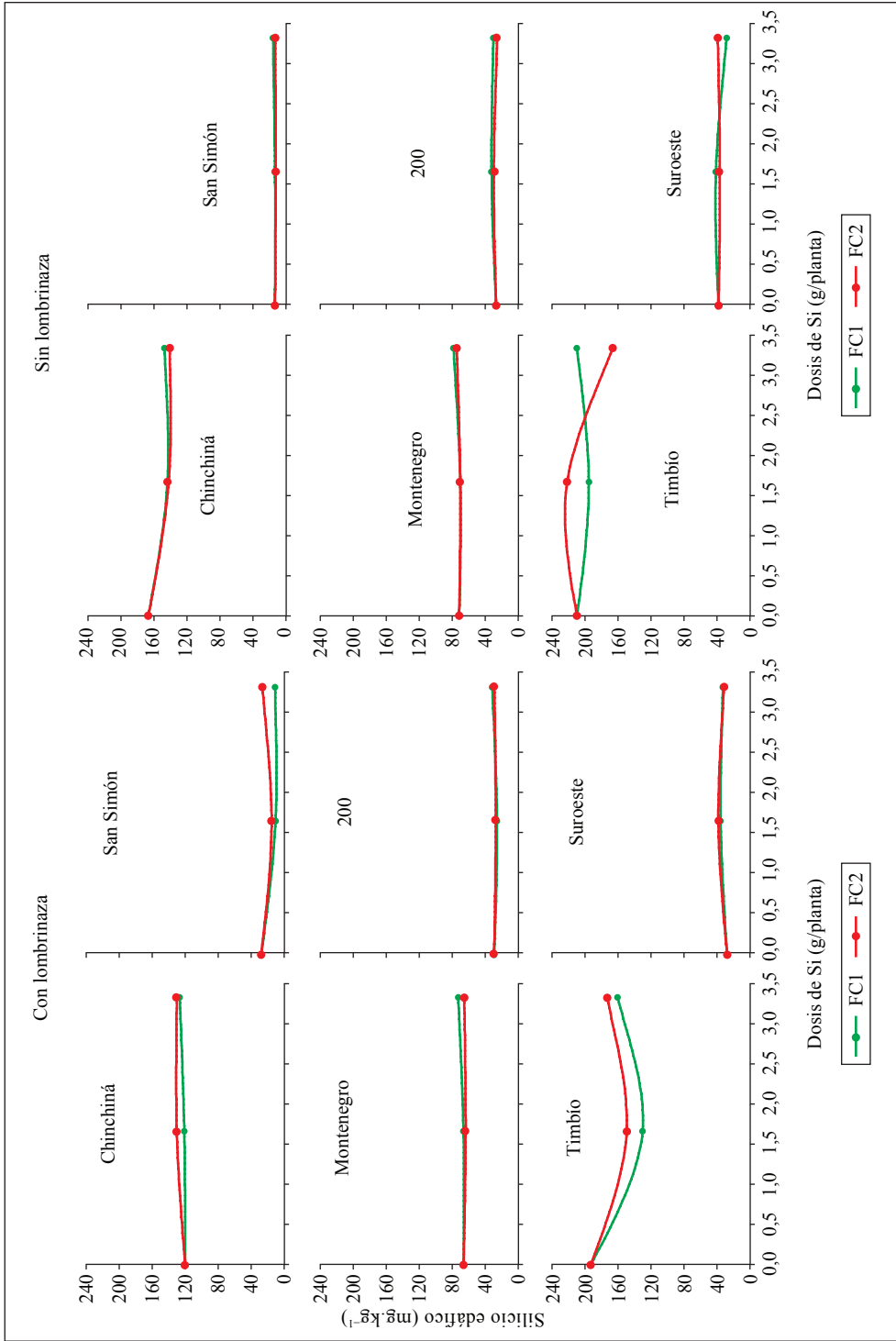


Figura 5. Contenido de Si en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y de Si (FC= Fuente comercial de Si).

pero dada la alta variabilidad de los datos y su baja correspondencia con las dosis de Si aplicadas no permitió hacer afirmación alguna respecto al efecto de la aplicación de este elemento sobre su absorción en el café en etapa de almácigo.

Como lo indican Ma y Yamaji (24) es necesario avanzar en la caracterización molecular y fisiológica de los transportadores de Si en diferentes especies, no solo para elucidar los mecanismos de acumulación de este elemento sino también para entender su verdadero papel en el reino vegetal, ya que una expresión apropiada de las proteínas transportadoras de Si en cultivos con una absorción ineficiente podría incrementar la acumulación de Si y, por consiguiente, aumentar la resistencia a múltiples tipos de estrés, para los cuales múltiples estudios ya han discutido los efectos benéficos de este elemento en varios cultivos de importancia económica.

Contenido de P en el suelo

Para esta variable se resalta la utilización del material orgánico, la cual incrementó los niveles de P en las diferentes mezclas suelos-lombrinaza (Figura 6), con un menor aumento registrado en los suelos derivados de cenizas volcánicas, relacionado con su alto poder para fijar este elemento, y que según Salamanca y Sadeghian (34) en las unidades Montenegro y Chinchiná alcanza valores de fijación de P de 51% y 81%, respectivamente.

Con relación al efecto de las fuentes de Si, en la mayoría de combinaciones suelo-lombrinaza el P edáfico incrementó solo con la aplicación del fertilizante FC2 y los mayores niveles del elemento se registraron con la dosis más alta de esta fuente (3,36 g/planta).

Se puede afirmar que la aplicación del Si no afectó la disponibilidad del P en el suelo para las plantas, ya que con la fuente FC1, más rica en Si (90% SiO₂), no se afectó el contenido de P en el suelo y su poca variación solo estuvo asociada con el aporte del fertilizante FC2 (7% de P₂O₅). Similar a este resultado, Ma y Takahashi (21) citan que la aplicación de Silicato de sodio y carbonato de sodio no afectaron el contenido foliar de P en plantas de arroz ni disminuyeron su adsorción en el suelo bajo dos condiciones de anegamiento.

A pesar de que estudios citados por Savant *et al.* (37) mencionan varios efectos del Si sobre la disponibilidad del P como una menor adsorción de este último en algunos suelos, Ma y Takahashi (21) afirman que no se debe descartar el efecto positivo sobre el pH del suelo, que causan algunas fuentes de Si como los silicatos de Ca y Na, lo cual tiende a aumentar la solubilidad del P. Al respecto, algunos datos de pH, medidos para una muestra compuesta de cada tratamiento, tampoco permitieron evidenciar el efecto de los fertilizantes y dosis de Si sobre esta variable, pero sí de la aplicación de lombrinaza, la cual disminuyó la acidez del suelo entre media unidad en los suelos de las unidades 200 y San Simón y hasta en una unidad en Suroeste. No obstante, la lombrinaza no afectó el pH de los suelos de las unidades Chinchiná, Montenegro y Timbío, asociado posiblemente con su capacidad buffer derivada de sus contenidos de materia orgánica y ceniza volcánica, lo cual determinó posiblemente también la magnitud de la respuesta de las plantas a la aplicación de silicio.

Por otra parte, Correa *et al.* (11) encontraron un efecto positivo de la aplicación combinada de P y Si sobre la producción del arroz en dos localidades de Colombia y

que la respuesta al superfosfato triple fue mayor cuando se aplicó la mayor cantidad de Si (500 kg.ha⁻¹); según Takahashi (39), el Si reduce la fijación del ácido fosfórico y promueve su utilización dentro de las plantas. Sin embargo, en el presente estudio tampoco se encontró algún efecto de las dosis de los fertilizantes sobre el contenido foliar de P, ya que éstos mostraron únicamente efecto del nivel de lombrinaza en los suelos de las unidades Chinchiná (P<0,0001), 200 (P=0,0003) y Montenegro (P<0,0001) a favor de la utilización de lombrinaza, pero no de los fertilizantes o dosis de Si (Tabla 2).

Como se indicó, las respuestas del café en términos de crecimiento en el presente estudio obtenidas con la dosis alta del fertilizante FC2, confirman lo reportado por Ávila *et al.* (2), que cuando se incluye pulpa descompuesta en los almácigos también puede presentarse una respuesta positiva del café a la aplicación de P.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

El efecto de las dosis media y alta de la FC2 sobre el comportamiento de la CIC en los sustratos del almácigo, para cuatro de los seis suelos estudiados, se presenta en la Figura 7. A pesar de que la magnitud del incremento no fue igual para todos los suelos, se corrobora que además del aporte de elementos que hace la lombrinaza, su utilización en los almácigos permite incrementar también el valor de la CIC en los sustratos; efecto más notable en las unidades Chinchiná, 200 y San Simón que en el suelo de Timbío. No obstante, el incremento en la CIC también puede relacionarse con el método utilizado en el laboratorio, el cual generalmente sobrestima el valor de esta propiedad en suelos con carga variable, como los de la zona cafetera, debido a que la CIC

exhibe una alta dependencia con respecto al contenido de carbono orgánico (33).

En la unidad Chinchiná se registró un efecto de la interacción Lombrinaza*DosisSi (P=0,0276) donde sobresalieron los dos niveles de lombrinaza en combinación con la aplicación de 1,68 g de Si por planta con la FC2 frente a los testigos (Prueba Dunnett 5%). Así mismo, se encontró efecto solo del nivel de Lombrinaza en los suelos de las unidades 200 (P<0,0001) y San Simón (P<0,0001), y en este último, al aplicar lombrinaza se incrementaron los valores de CIC para todas las dosis evaluadas, sobresaliendo también ligeramente la dosis de 3,36 g de Si por planta. Se confirma así, un posible efecto del contenido de zeolita en la FC2 sobre la CIC del suelo dependiendo del tipo de suelo y el uso o no de lombrinaza.

Los anteriores resultados permitirán orientar nuevas investigaciones para seguir avanzando en el entendimiento del papel del silicio en la nutrición del café en la zona cafetera colombiana y corroborar los efectos benéficos reportados en otros países y en otras etapas de este cultivo.

Puede concluirse que:

Dado que no se encontraron efectos considerables del fertilizante con mayor contenido de Si (FC1) sobre las variables biológicas evaluadas, puede afirmarse que la aplicación de Si en suelos con características similares a las unidades evaluadas en el presente estudio no mejora el crecimiento del café durante la etapa de almácigo. Sin embargo, cuando las plantas crecieron en suelo sin lombrinaza, la aplicación de las dosis más altas de Si, a partir de la fuente comercial rica en P, sí aumentó el vigor de las plantas, por lo que el efecto de las dosis

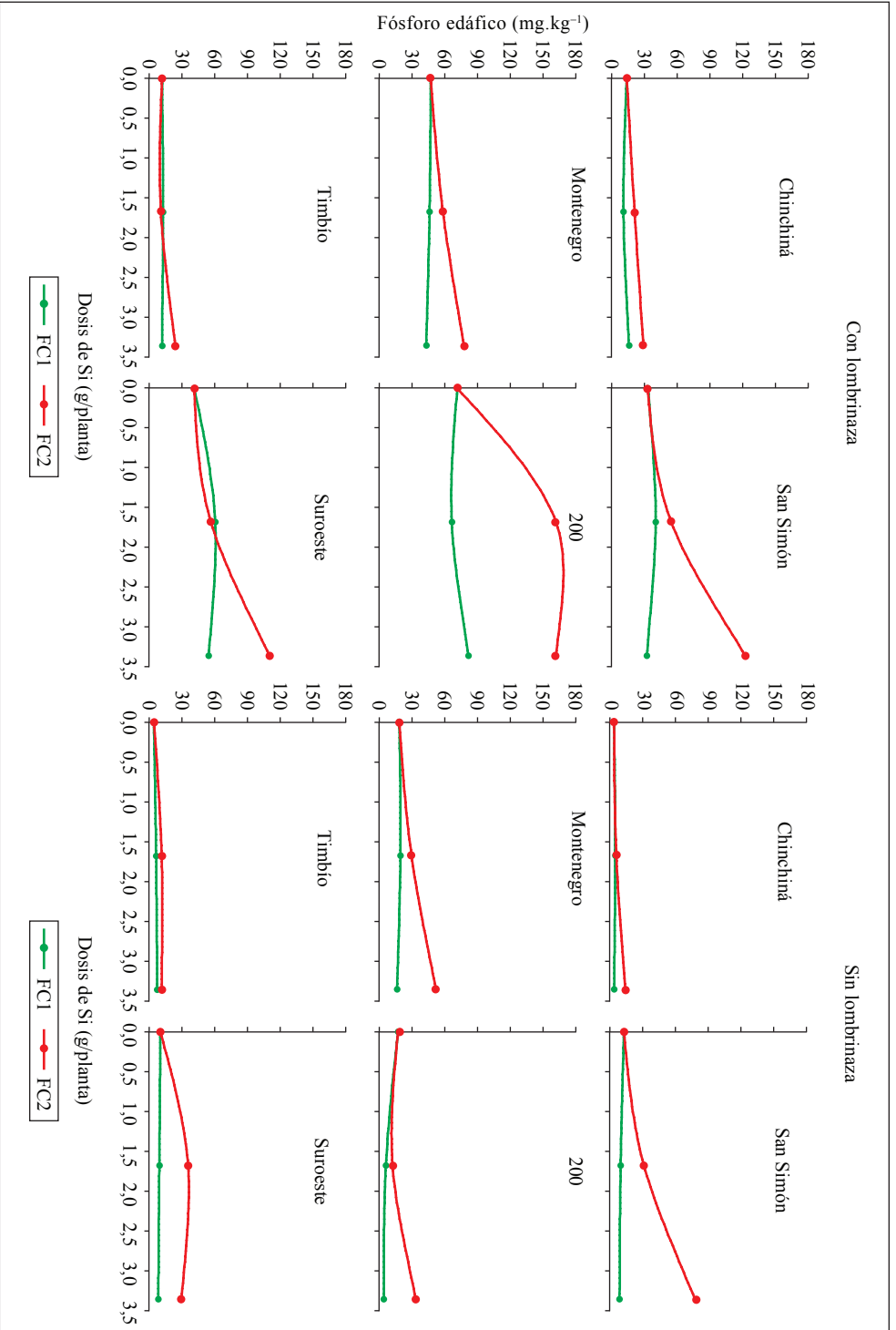


Figura 6. Contenido de P en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y de Si (FC= Fuente comercial de Si).

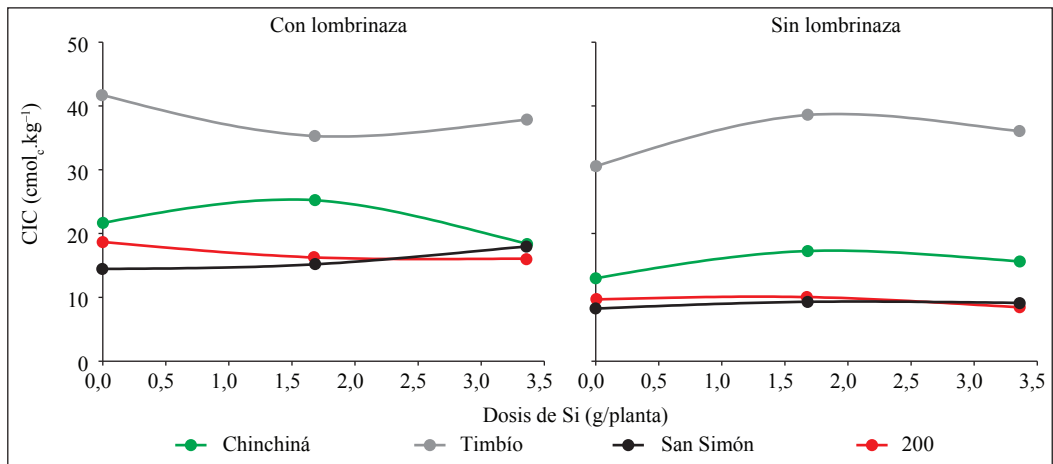


Figura 7. CIC en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y Si.

y fuentes de este elemento fue asociado más con la aplicación de P en dicha fuente, que con la utilización misma de Si.

Este estudio permitió corroborar que la utilización de lombrinaza bien descompuesta en las bolsas de almacigo y en algunos casos la adición de P, pueden ser suficientes para obtener almacigos vigorosos y llevar al campo plantas de café de buena calidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a todas las personas que contribuyeron para la realización de este experimento especialmente a: Santiago Ramírez y Mauricio Castillo de la empresa C.I. Agromil Ltda. por el apoyo financiero; los coordinadores de las Estaciones Experimentales, Juan Carlos García, Celso Arboleda (QEPD), Carlos Rodrigo Solarte, Jhon Wilson Mejía y los Extensionistas Luis Ever Rodríguez y Jairo Ramírez, por su ayuda en la recolección de los suelos, y al personal de la Cooperativa Acción Plus (antes Coopservin), que colaboró en la elaboración del almacigo y lavado de raíces.

LITERATURA CITADA

1. ARCILA P, J. Establecimiento y administración del cafetal. p. 87-99. En: ARCILA P, J.; FARFÁN V., F.F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná : Cenicafé, 2007.
2. ÁVILAR, W.E.; SADEGHIAN K., S.; SÁNCHEZ A., P.M.; CASTROF, H.E. Producción de almacigos de café en el departamento de Santander con diferentes fuentes de materia orgánica y de fósforo. *Avances Técnicos Cenicafé* 356:1-12. 2007.
3. BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R., JR. *Mecánica de materiales*. Bogotá : McGraw Hill, 1993. 738 p.
4. BERTHELSEN, S.; KORNDÖRFER, G.H. Methods for silicon analysis in soil, plant and fertilizers. [En línea]. Amsterdam : Siliforce, 2003. <http://www.siliforce.com/pdf/7c/Suzanne%20-%20Methods%20For%20Si%20Analysis%20Plant%20Soil%20Fert%2003.pdf>. Consultado en junio de 2015.
5. BOTELHO, D.M.S.; POZZA, E.A.; ALVES, E.; BOTELHO, C.E.; POZZA, A.A.A.; RIBEIRO JÚNIOR, P.M.; DE SOUZA, P.E. Efeito do silício na intensidade da cercosporiose e na nutrição mineral de mudas de cafeeiro. *Arquivos do instituto biológico* 78(1):23-29. 2011.
6. CAICEDO M., L.M.; CHAVARRIAGA M., W. Efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almacigo de plántulas de café variedad Colombia. *Agronomía* 15(1):27-37. 2007.

7. CARRILLO, I.F. Manual de laboratorio de análisis de suelos. Chinchiná : Cenicafé, 1985. 111 p.
8. CARRILLO, I.F.; MEJÍA M., B.; FRANCO, H.F. Manual de laboratorio para análisis foliares. Chinchiná : Cenicafé, 1994. 52 p.
9. CENIPALMA. Método para la determinación de Si disponible en el suelo. Bogotá: Cenipalma, (s.f.). 4p.
10. CHEN, J.; CALDWELL, R.; ROBINSON, C.; STEINKAMP, R. Silicon: The estranged medium element: Bulletin 341. Florida: University of Florida : Environmental horticulture department : Florida cooperative extension service : Institute of food and agricultural sciences, 2000. 5 p.
11. CORREA, F.J.; DATNOFF, L.E.; OKAD, K.; FRIESEN, D.K.; SANZ, J.I.; SNYDER, G.H. Effects of fertilization on disease development and yields of rice in Colombia. En: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Eds) Silicon in agriculture. Amsterdam : Elsevier science, p. 313-322. 2001.
12. CURI, A.; GRANDA, W.J.V.; LIMA, H.M.; SOUZA, W.T. Las zeolitas y su aplicación en la descomposición de efluentes mineros. Información tecnológica 17(6):111-118. 2006.
13. EPSTEIN, E. Silicon. Annual review of plant physiology and Plant molecular biology 50:641-664. 1999.
14. EPSTEIN, E. Silicon in plants: Facts vs. concepts. En: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Eds) Silicon in agriculture. Amsterdam : Elsevier science, p. 1-15. 2001.
15. EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. 2ed. Sunderland : Sinaur associates, 2004. 400 p.
16. HALLMARK, C.T.; WILDING, L.P.; SMECK, N.E. Silicon. En: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Eds) Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties. Madison : ASA : SSSA, p. 263-273. 1982.
17. HAVLIN, J.; TISDALE, S.; NELSON, W.; BEATON, J. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. New Jersey : Prentice Hall, 2014. 258 p.
18. JACKSON, J.H.; WIRTZ, H.G. Estática y resistencia de materiales. México : McGraw Hill, 1984. 392 p.
19. KAUFMAN, P.; DAYANANDAN, P.; FRANKLIN, C. Structure and function of silica bodies on the epidermal system of grass shoots. Annals of botany 55(4):487-507. 1985.
20. KORNDÖRFER, G.H.; SNYDER, G.H.; ULLOA, M.; POWELL, G.; DATNOFF, L.E. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. Journal of plant nutrition 24(7):1071-1084. 2001.
21. MA, J.F.; TAKAHASHI, E. Effect of silicate on phosphate availability for rice in a P-deficient soil. Plant and soil 133(2):151-155. 1991.
22. MA, J.F.; TAKAHASHI, E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Amsterdam : Elsevier, 2002. 281 p.
23. MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. Trends in plant science 11(8):392-397. 2006.
24. MA, J.F.; YAMAJI, N. A cooperated system of silicon transport in plants. Trends in plant science 20(7):435-442. 2015.
25. MA, J.F.; MITANI, N.; NAGAO, S.; KONISHI, S.; TAMAI, K.; IWASHITA, T.; YANO, M. Characterization of the silicon uptake and molecular mapping of the silicon transporter gene in rice. Plant physiology 136(2):3284-3289. 2004.
26. MARTINATI, J.C.; HARAKAVA, R.; GUZZO, S.D.; TSAI, S.M. The potential use of a silicon source as a component of an ecological management of coffee plants. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. Paris : ASIC, p. 1112-1115. 2006.
27. MARTINATI, J.C.; HARAKAVA, R.; GUZZO, S.D.; TSAI, S.M. The potential use of a silicon source as a component of an ecological management of coffee plants. Journal of phytopathology 156(7/8):458-463. 2008.
28. MATICHENKOV, V. Silicon in food agriculture and environment. [En línea]. Pushchino : Institute of basic biological problems russian academy of sciences, 2004. Disponible en internet: [Http://sifertilizer.com/2/silicon.htm](http://sifertilizer.com/2/silicon.htm). Consultado en Noviembre de 2004.
29. MITANI, N.; MA, J.F. Uptake system of silicon in different plant species. Journal of experimental botany 56(414):1255-1261. 2005.
30. POZZA, A.; ALVES, E.; POZZA, E.; CARVALHO, J. DE; MONTANARI, M.; GUIMARÃES, P.; SANTOS, D. Efeito do silício no controle da cercosporiose em três variedades de cafeeiro. Fitopatologia brasileira 29(2):185-188. 2004.

31. RAINS, D.W.; EPSTEIN, E.; ZASOSKI, R.J.; ASLAM, M. Active silicon uptake by wheat. *Plant and soil* 280(1):223-228. 2006.
32. RIBEIRO, R.V.; SILVA, L. DA; RAMOS, R.A.; ANDRADE, C.A. DE; ZAMBROSI, F.C.B.; PEREIRA, S.P. O alto teor de silício no solo inibe o crescimento radicular de cafeeiros sem afetar as trocas gasosas foliares. *Revista brasileira de ciência do solo* 35(3):939-948. 2011.
33. SADEGHIAN K., S.; ZAPATA H., R.D. Propiedades relacionadas con la adsorción de cationes intercambiables en algunos suelos de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé* 63(2):79-89. 2012.
34. SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S. Almácigos de café con distintas proporciones de lombrinaza en suelos con diferente contenido de materia orgánica. *Cenicafé* 59(2):91-102. 2008.
35. SALISBURY, F.; ROSS, C. *Fisiología vegetal*. México : Iberoamericana, 1994. 759 p.
36. SANTOS B., D.M.; POZZA, E.A.; POZZA, A.A.A.; CARVALHO, J.G.; BOTELHO, C.E.; SOUZA, P.E. Intensidade da cercosporiose em mudas de cafeeiro em função de fontes e doses de silício. *Fitopatologia brasileira* 30(6):582-588. 2005.
37. SAVANT, N.K.; SNYDER, G.H.; DATNOFF, L.E. Silicon management and sustainable rice production. *Agronomy journal* 58:151-199. 1997.
38. SAVANT, N.K.; KORNDÖRFER, G.H.; DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. Silicon nutrition and sugarcane production: A review. *Journal of plant nutrition* 22(12):1853-1903. 1999.
39. TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. En: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; HIRATA, H. (Eds) *Science of the rice plant: Physiology*. Tokyo : Food and agriculture policy research center, p. 420-433. 1995.
40. WANG, J.J.; DODLA, S.K.; HENDERSON, R.E. Soil silicon extraction with seven selected extractants in relation to colorimetric and IPC determination. *Soil science* 169:861-870. 2004.

VALIDACIÓN EN EL CAMPO DE UN MÉTODO DE MUESTREO PARA EVALUAR LA CALIDAD EN LA RECOLECCIÓN DE CAFÉ

Rubén Darío Medina Rivera*; Esther Cecilia Montoya Restrepo*; Hernando García Osorio*

MEDINA R., R.D.; MONTOYA R., E.C.; GARCÍA O., H. Validación en el campo de un método de muestreo para evaluar la calidad en la recolección de café. Revista Cenicafé 66 (2): 110-120. 2015

Dado que el caficultor no cuenta con un método de muestreo ágil y confiable con respaldo estadístico, que le permita evaluar labores de recolección para establecer políticas de incentivo y pagos o ejercer acciones correctivas, se validó un método de muestreo denominado "plan surco" en la Estación Central Naranjal de Cenicafé, donde se registraron el número de frutos maduros dejados en el árbol y el número de frutos dejados en el suelo después de realizada la labor de recolección, en 17 jornadas de cosechas principales. Dicho método se validó a partir de la estimación de los parámetros promedio de frutos maduros dejados en el árbol y promedio de frutos dejados en el suelo, frente a la estimación por intervalos obtenida para estos mismos parámetros con el muestreo aleatorio simple. Con los resultados se estableció que de 17 jornadas evaluadas, en 13 de ellas, la diferencia absoluta entre las estimaciones con los dos métodos fue menor de un fruto, para el promedio de frutos maduros dejados en el árbol, mientras para el promedio de frutos dejados en el suelo, en 14 de las 17 jornadas, la diferencia absoluta fue menor o igual a 1, lo que indica que el método plan surco, es una herramienta administrativa con la cual puede evaluarse la calidad de recolección, tomando una muestra de 60 árboles en un lote.

Palabras clave: Plan surco, muestreo no probabilístico, estimación.

FIELD VALIDATION OF A SAMPLING METHOD TO EVALUATE HARVESTING QUALITY

Since coffee growers do not have a fast and reliable method of sampling with statistical support that enable them to assess harvest work to establish incentive and payments policies or to exercise corrective actions, a sampling method called "Plan surco" was validated at the Naranjal Central Station of Cenicafé. The number of ripe fruits left on the tree and on the ground after harvesting during 17 working days was recorded. This method was validated by estimating the average parameters of ripe fruits left on the tree and the average of ripe fruits left on the ground compared with the interval estimation obtained for these parameters with simple random sampling. The results established that in 13 out of the 17 evaluated workdays the absolute difference between the estimates with both methods was less than one fruit for the average ripe fruits left on the tree, while in 14 out of the 17 evaluated workdays the absolute difference for the average fruit left on the ground was less or equal to 1. This indicates that the method "Plan surco" is a management tool that can be used to assess the harvest quality taking a sample of 60 trees in a plot.

Keywords: Plan surco, non-probability sampling, estimation.

*Investigador Científico I, Investigador Científico III y Auxiliar III de Investigación, respectivamente. Disciplina de Biometría. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El cultivo del café es un proceso donde intervienen factores climáticos, biológicos y sociales entre otros, que hacen de ésta una actividad compleja y de gran dedicación. Para lograr que su negocio sea rentable, el productor debe conocer las condiciones y estado actual de las actividades que se realizan, como lo es el proceso de recolección, el cual representa entre 38,8% y 52,3% de los costos totales de producción (4).

Conocer qué tan bien se realiza la labor de recolección, en cuanto al número de frutos maduros que se dejan en el árbol (eficacia), la cantidad de frutos dejados en el suelo (pérdidas) y el número de frutos verdes en la masa cosechada (calidad), permite saber la cantidad de ingresos que el caficultor deja de percibir y advertir las posibles disminuciones futuras en calidad y producción como consecuencia de una mala recolección. Así mismo, a partir de esta información es posible obtener indicadores, los cuales se constituyen en una fuente de información que, integrada a los procesos de toma de decisiones, pueden favorecer el desempeño de las empresas cafeteras, al contribuir a la eficacia de los actores del mismo y a la mejor asignación y distribución de los recursos humanos, materiales y financieros, fijando además, políticas de pago a partir de estándares de calidad.

Teniendo en cuenta que los métodos utilizados por algunos caficultores para obtener esta información es subjetivo y no se conoce la confiabilidad de los mismos, se validó el método de muestreo por surcos con respaldo estadístico y con una probabilidad conocida de aciertos con respecto a lo obtenido con el muestreo aleatorio, para entregar una herramienta al caficultor que le permita evaluar la recolección, de manera rápida, confiable y menos costosa.

Partiendo de la situación anterior y dada la importancia y necesidad de contar con un método de muestreo ágil y confiable para evaluar los indicadores de eficacia y pérdidas en el proceso de la recolección del café, Gutiérrez (3) determinó estadísticamente el número de árboles necesarios a seleccionar para obtener las estimaciones del promedio de las variables frutos maduros dejados en el árbol y el suelo, utilizando dos trayectorias no probabilísticas, con respecto a las estimaciones obtenidas con un muestreo probabilístico. La primera trayectoria (plan surco), consistió en recorrer en línea recta y a través de los surcos el lote recolectado (Figura 1a), una vez ubicado en uno de los árboles centrales del primer surco, se seleccionó el número de árboles a evaluar, según el número de surcos en el lote. La segunda trayectoria (Figura 1b), consistió en recorrer en diagonal los surcos del lote recolectado, seleccionando un número establecido de árboles. Con los resultados obtenidos, Gutiérrez (3), concluyó que el número de árboles para estimar los promedios de las variables asociadas a la eficacia (número de frutos maduros dejados en el árbol después de la recolección) y pérdidas (número de frutos dejados en el suelo), en una jornada de recolección de café es de 90 árboles. En cuanto a la evaluación de los dos métodos de muestreo propuestos, en las Tablas 1 y 2, se presenta el promedio por jornada para ambas trayectorias, para las variables número de frutos dejados en el árbol y en el suelo.

Para la variable, número de frutos dejados en el árbol, con la trayectoria en línea recta se presentó un mayor número de casos (sitio y jornada) donde el promedio cayó en los intervalos de estimación para el promedio obtenido, con el diseño de muestreo aleatorio (Tabla 1).



Figura 1. Trayectorias para evaluar indicadores de eficacia y pérdidas en el proceso de la recolección del café.

Para la variable número de frutos dejados en el suelo, las dos trayectorias tienen el mismo comportamiento con respecto a la estimación obtenida con el diseño de muestreo aleatorio (Tabla 2).

Por otra parte, se determinó que el tiempo medio invertido con las dos trayectorias para contar el número de frutos maduros dejados en el árbol y en el suelo en 81 árboles, estuvo entre 68 y 95 min, con una confiabilidad del 95%.

Se recomendó finalmente, la trayectoria en línea recta, porque además de tener un soporte estadístico con respecto al muestreo aleatorio, fue fácil de aplicar en el campo.

A partir de dicha recomendación, se hizo la validación de la trayectoria en línea recta, la cual será referida en adelante como muestreo en surcos o plan surco.

MÉTODO

En la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé, en 17 jornadas de la cosecha principal, se evaluó la labor de recolección en lotes de café, con diferentes condiciones

de variedad, densidad y edad utilizando dos métodos de muestreo: el muestreo aleatorio simple (método 1) y el método del plan surco (método 2) siendo este último de tipo no probabilístico, de la siguiente manera:

Método 1. En el lote, del total de árboles recolectados en la jornada se seleccionaron aleatoriamente 60 árboles, y en ellos se contó el número de frutos maduros sin recolectar en el árbol (incluyendo sobremaduros y secos) y el número de frutos dejados en el suelo.

Método 2. Identificada el área del lote que fue recolectado durante la jornada, se seleccionó al azar el árbol central del primer surco, para iniciar la trayectoria en línea recta a través de los surcos, en los cuales se seleccionaron 90 árboles de acuerdo con los siguientes criterios:

- Si el número de surcos es menor que 90 (tamaño de muestra), entonces se toma en cada surco m árboles, de tal manera que al final del recorrido se tengan los 90 árboles, donde m es el número entero más cercano al cociente entre 90 y el número de surcos recolectados ($90/\text{número de surcos recolectados}$).

Tabla 1. Intervalo para la estimación del promedio del número de frutos dejados en el árbol, según el muestreo aleatorio simple y el promedio obtenido con las trayectorias, para cada sitio y cada jornada.

Sitio	Jornada	Número promedio de frutos dejados en el árbol			
		Aleatorio		Trayectorias	
		LI	LS	Recta	Diagonal
La Soledad	1	0,6	1,8	0,8	0,6
	2	0,5	1,1	1,8	1,6
	3	0,8	1,5	1,3	2,4
	4	0,4	1,2	1,5	1,6
Naranjal	1	2,1	4,4	3,2	2,9
	2	1,4	2,8	3,4	3,5
	3	2,9	5,3	3,9	5,1
	4	2,8	4,8	5,0	6,0

LI: Límite inferior; LS: Límite superior.

Tabla 2. Intervalo para la estimación del promedio del número de frutos dejados en el suelo, según el muestreo aleatorio simple y el promedio obtenido con las trayectorias, para cada sitio y cada jornada.

Sitio	Jornada	Número promedio de frutos dejados en el suelo			
		Aleatorio		Trayectorias	
		LI	LS	Recta	Diagonal
La Soledad	1	1,1	2,6	1,0	1,9
	2	2,3	4,1	6,2	5,2
	3	2,6	7,8	3,4	3,7
	4	0,7	1,4	1,1	0,7
Naranjal	1	7,6	10,3	10,8	11,9
	2	6,6	9,6	10,8	7,1
	3	5,2	7,3	9,5	7,5
	4	1,9	3,4	4,1	4,6

LI: Límite inferior; LS: Límite superior.

- Si el número de surcos es mayor que 90, entonces se toma un árbol cada k surcos, donde k es el entero más cercano al cociente entre el número de surcos recolectados y 90 (número de surcos recolectados/90).
- Si el número de surcos es igual al tamaño de muestra (90), entonces se toma un árbol por surco.

Con los registros de cada método de muestreo y jornada, se realizó el siguiente análisis estadístico utilizando el SAS (5) versión 9.4.

Con la información del método 1, se obtuvieron los promedios y errores de estimación asociados al promedio de frutos maduros dejados en el árbol y el promedio de frutos dejados en el suelo, y se construyó la estimación por intervalos de los parámetros correspondientes, con un coeficiente de confianza del 95%.

Con el promedio de los errores de estimación asociados al promedio del número de frutos en el árbol y frutos en el suelo, se procedió a verificar si éste fue mayor a un fruto, según

la prueba de t al 5%, en caso contrario se validó el error de estimación para el tamaño de muestra fijado en 90 árboles.

Con los datos obtenidos en el método 2, se obtuvo la estimación del promedio de frutos maduros dejados en el árbol y el promedio de frutos dejados en el suelo.

Para cada parámetro se identificaron cuántas de las estimaciones obtenidas con el método 2 cayeron en los respectivos intervalos de confianza construidos con el método 1, para obtener así, la proporción de estimaciones que caen dentro del intervalo y se verificó si esta proporción es mayor al 90%, según la prueba t al 5%, con lo cual se habrá cumplido con la validación del método en surcos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Tablas 3 a la 6, se presenta para cada jornada, independientemente de las características de los lotes, los percentiles 25, 50, 75, mínimo y máximo observados, para las variables número de frutos maduros dejados en el árbol y número de frutos dejados en el suelo por árbol, después de la recolección, obtenidos con el muestreo aleatorio simple y el muestreo en surcos.

Para la variable número de frutos maduros dejados en el árbol, se presentó que en la jornada 2, el 50% de los árboles evaluados tenían aproximadamente hasta 8 frutos maduros dejados en el árbol, utilizando los dos métodos de muestreo (Tabla 3 y 4). El número máximo de frutos maduros dejados en el árbol por jornada estuvo entre 8 y 58 frutos para el muestreo aleatorio simple (Tabla 3), mientras que con el muestreo en surcos, el número máximo de frutos maduros dejados en el árbol osciló entre 10 y 55 frutos (Tabla 4).

Con el muestreo aleatorio simple, se observó para la jornada 8, que el 75% de los árboles registraban 18 ó menos frutos dejados en el suelo (Percentil 75) y para al menos uno de los árboles se registró un máximo de 55 frutos dejados en el suelo (Tabla 5).

Para el muestreo en surcos, se observó en la jornada 8, hasta 11 frutos dejados en el suelo para el 75% de los árboles y un máximo de 35 frutos dejados en el suelo (Tabla 6), lo que indica que el método de muestreo en surcos coincide con las descripciones obtenidas al utilizar el muestreo aleatorio.

Con los registros obtenidos utilizando el método de muestreo aleatorio simple, para cada una de las jornadas se construyó la estimación del promedio de número de frutos maduros dejados en el árbol y número de frutos dejados en el suelo por árbol, con un coeficiente de confianza del 95% (Tablas 7 y 8).

El promedio de frutos maduros dejados en el árbol obtenido con el método de muestreo en surco cayó en 15 de los 17 intervalos de estimación, para el promedio de frutos maduros dejados en el árbol obtenido con el diseño de muestreo aleatorio (Tabla 7), mientras que para la variable número de frutos dejados en el suelo, 12 de los 17 promedios obtenidos con el método de muestreo en surco cayeron en los intervalos de estimación del muestreo aleatorio simple (Tabla 8).

De las 17 jornadas evaluadas, en 13 de ellas, la diferencia absoluta entre las estimaciones con los dos métodos, es menor de un fruto, para los frutos maduros dejados en el árbol, a excepción de una de las jornadas, cuya diferencia fue de 4,1 frutos. Para los frutos dejados en el suelo, en 14

Tabla 3. Mínimo, percentiles y máximo para el número de frutos maduros dejados en el árbol por jornada, obtenidos con el muestreo aleatorio simple.

Jornada	Mínimo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Máximo
1	0	0	2	4,5	14
2	0	3	7,5	13	54
3	0	0	2	5,5	38
4	0	2	4	10	40
5	0	0	1	3	17
6	0	0	1	2	57
7	0	1	3	10	30
8	0	1	3	6	58
9	0	0	1	3	13
10	0	0	1	3	8
11	0	0,5	2	4,5	18
12	0	0	1	2,5	9
13	0	0	1	3	19
14	0	0	1	4	24
15	0	0	0	1,5	45
16	0	1	2	4	9
17	0	0	1	2	22

Tabla 4. Mínimo, percentiles y máximo para el número de frutos maduros dejados en el árbol por jornada, obtenidos con el muestreo en surco.

Jornada	Mínimo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Máximo
1	0	1	3	5	35
2	0	4	7	11	22
3	0	0	1	3	47
4	0	1	3	8	55
5	0	0	2	4	25
6	0	0	1	3	23
7	0	0	2	7	34
8	0	1	2,5	5	45
9	0	0	1	2	22
10	0	0	1	4	12
11	0	1	2	8	34
12	0	0	2	3	10
13	0	0	1	3	34
14	0	0	1	3	17
15	0	0	0	3	21
16	0	1	2	4	13
17	0	0	1	2	13

Tabla 5. Mínimo, percentiles y máximo para el número de frutos dejados en el suelo por jornada, obtenidos con el muestreo aleatorio simple.

Jornada	Mínimo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Máximo
1	0	0	0	1	7
2	0	1	5,5	12	29
3	0	0	0	3	11
4	0	2	3	6,5	15
5	0	0	2	4	11
6	0	0	1	4	9
7	0	2	3	7	15
8	0	4	10	18	55
9	0	0	0	1,5	11
10	0	0	2	3	11
11	0	0	2	3	8
12	0	0,5	2,5	4	15
13	0	0	1	4,5	16
14	0	2	3	5	14
15	0	0	1	5,5	15
16	0	1	2	4	12
17	0	1	2	4,5	31

Tabla 6. Mínimo, percentiles y máximo para el número de frutos dejados en el suelo por jornada, obtenidos con el muestreo en surco.

Jornada	Mínimo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Máximo
1	0	0	0	1	4
2	0	0	1	2	13
3	0	0	1	3	17
4	0	0	1	2	9
5	0	1	3	5	26
6	0	1	2	3	12
7	0	2	5	8	24
8	0	3	7	11	35
9	0	0	0	1	17
10	0	0	2	3	10
11	0	1	2	4	11
12	0	0	1	3	14
13	0	0	0	3	10
14	0	0	2	5	19
15	0	0	2	5	16
16	0	0	2	4	16
17	0	1	2	5	20

Tabla 7. Intervalo para la estimación del promedio del número de frutos maduros dejados en el árbol, según el muestreo aleatorio simple y el promedio obtenido con el plan surco para cada jornada.

Jornada	Muestreo aleatorio		Plan surco
	Límite inferior	Límite superior	Promedio
1	2,2	3,9	3,5
2	6,6	16,6	7,5
3	2,4	6,3	3,5
4	5,1	9,3	6,1
5	1,5	3,3	2,9
6	0,4	4,2	2,1
7	4,1	7,7	5,0
8	4,1	8,1	4,1
9	1,5	3,0	2,1
10	1,4	2,6	2,7
11	2,3	4,3	5,2
12	1,2	2,3	2,2
13	1,2	3,1	3,0
14	1,8	3,8	2,3
15	0,6	4,0	2,2
16	2,1	3,3	2,7
17	0,9	2,6	1,5

Tabla 8. Intervalo para la estimación del promedio del número de frutos dejados en el suelo, según el muestreo aleatorio simple y el promedio obtenido con el plan surco para cada jornada.

Jornada	Muestreo aleatorio		Plan surco
	Límite inferior	Límite superior	Promedio
1	0,3	1,2	0,6
2	4,6	10,7	1,4
3	1,2	2,6	2,1
4	3,5	5,4	1,3
5	1,9	3,1	3,5
6	1,4	2,7	2,4
7	3,4	5,5	5,3
8	10,5	15,5	7,6
9	0,7	2,0	1,5
10	1,5	2,8	2,3
11	1,5	2,6	2,5
12	2,2	3,7	2,0
13	1,6	3,3	1,8
14	2,8	4,4	3,3
15	2,1	3,9	3,4
16	1,9	3,2	2,9
17	2,0	4,3	3,9

de las 17 jornadas, la diferencia absoluta fue menor o igual a 1, y para las demás jornadas osciló entre 3 y 6 frutos.

En cuanto al promedio de los errores de estimación asociados al promedio del número de frutos maduros dejados en el árbol y frutos dejados en el suelo obtenidos con el muestreo aleatorio simple, fue estadísticamente igual a un fruto, según prueba de t al 5% (Tabla 9), con lo cual se estaría verificando lo encontrado por Gutiérrez (3) en cuanto al error de estimación para el tamaño de muestra fijado en 90 árboles.

Por otra parte, el tiempo medio invertido con el método en surcos para contar en 90 árboles el número de frutos maduros dejados en el árbol y en el suelo, fluctuó entre 39 y

91 min./jornada, con dos operarios, teniendo en cuenta que fueron los mismos operarios en igualdad de condiciones, quienes realizaron todas las evaluaciones.

Pero, hasta dónde es posible disminuir el número de árboles a seleccionar para realizar el plan de muestreo en surco, de tal manera que el error de estimación no supere al obtenido con el muestreo aleatorio?

Para resolver este interrogante, se aplicó un método de simulación basado en remuestreo. Dicho método denominado *Bootstrap*, propuesto por Efron (1) y Efron y Tibshirani (2), tiene como idea central aproximar la distribución de muestreo de un estadístico y de sus propiedades, basado en una muestra empírica a partir de simulación, esto es, a partir de

Tabla 9. Promedio y error estándar de los errores de estimación obtenidos con el muestreo aleatorio simple, para cada variable asociada a los indicadores de calidad de recolección.

Variable	Promedio	Error estándar
Frutos maduros dejados en el árbol	1,44*	0,259
Frutos dejados en el suelo	0,99*	0,171

* Promedio errores de estimación igual a 1, según prueba t al 5%.

una muestra aleatoria con n observaciones, se extraen B muestras independientes con reposición. Para cada una de las B muestras se obtiene el valor del estadístico (estimador), obteniendo una aproximación a su distribución muestral, a partir de la cual es posible valorar el error estadístico, bien sea en cuanto a sesgo, el error estándar o tasa de error en la estimación con el estadístico definido (2).

La estimación *Bootstrap* del error estándar del estadístico, se obtiene mediante la Ecuación <1>.

$$\hat{\sigma}_{Boot} = \left(\sum_{i=1}^B (\hat{\theta}^{*i} - \hat{\theta}^{**})^2 / (B - 1) \right)^{1/2} <1>$$

$$\hat{\theta}^{**} = \frac{\sum_{i=1}^B \hat{\theta}^{*i}}{B}$$

Donde $\hat{\theta}^{**}$ corresponde a la estimación *Bootstrap* de la media de la distribución muestral *Bootstrap*.

Para obtener estimaciones del sesgo del estadístico de interés, se toma la diferencia entre la estimación del estadístico objetivo, obtenido con los datos de la muestra original, y la obtenida con el *Bootstrap* (Ecuación <2>).

$$Sesgo_{Boot}(\hat{\theta}) = \hat{\theta}^{**} - \hat{\theta} <2>$$

Para cada jornada y con la muestra de árboles seleccionados con el muestreo aleatorio simple, en la cual se hizo la evaluación de las variables número de frutos maduros dejados en el árbol y número de frutos dejados en el suelo por árbol (variables de interés) después de la recolección, se analizó la distribución de los errores de estimación con diferentes tamaños de muestra de 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80 y 90. Al no asumir una determinada distribución teórica *a priori*, se utilizó la muestra original y se generaron 2.000 submuestras para cada una de las 17 jornadas, que sirvieron de base para estimar de forma inductiva la distribución muestral de las variables de interés, con sus respectivos intervalos de confianza, utilizando el método de los percentiles.

En la Figura 2, se ilustra la distribución muestral del estadístico número promedio de frutos dejados en el árbol, con muestras de 40, 50, 55 y 60 árboles, a partir de los datos observados en la jornada 1, con el muestreo aleatorio simple. Es posible verificar, que la distribución del estadístico es normal, pero que al aumentar el tamaño de la muestra, disminuye la desviación de los estadísticos (error estándar).

En la Figura 3, se presenta para cada una de las variables de respuesta número de frutos en el árbol (NFA) y número de frutos en el suelo (NFS) el error promedio de estimación, de acuerdo al tamaño de las submuestras extraídas de las muestras aleatorias originales de cada jornada. Pasar de una selección de 90 árboles en el lote a una de 60 árboles, implica aumentar el error de estimación en 0,22 frutos en la variable número de frutos en el árbol, mientras en la variable frutos dejados en el suelo dicho error de estimación se incrementa en 0,18 frutos. Dado que la magnitud de los aumentos en el error de estimación no supera los

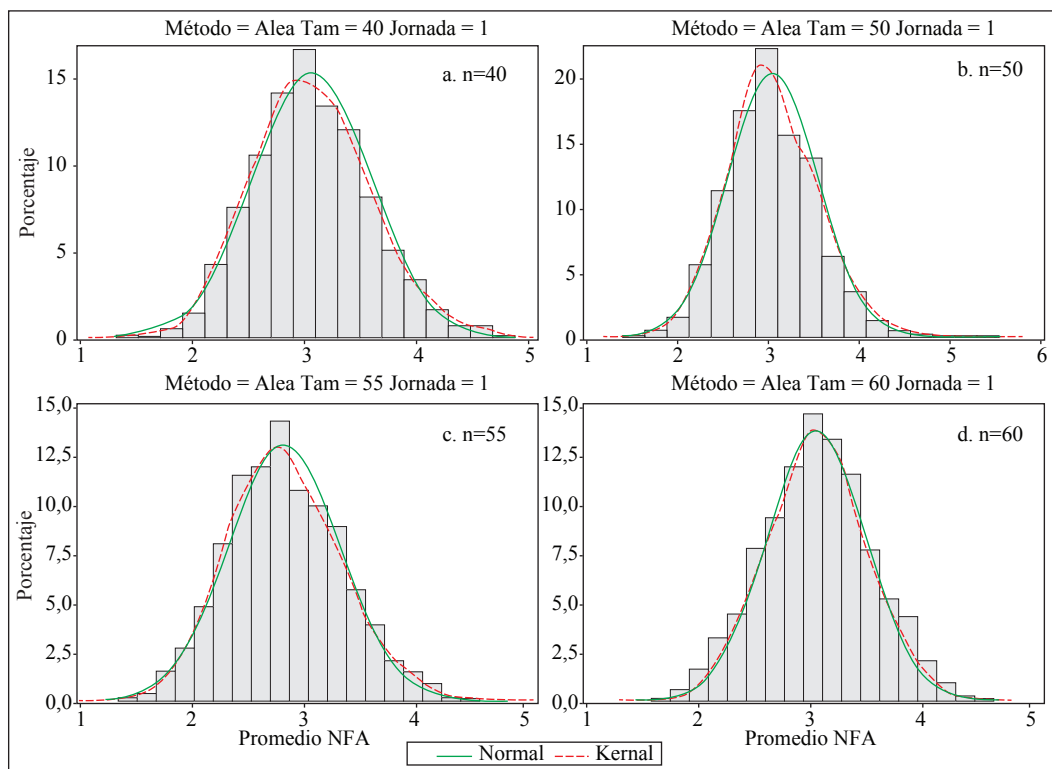


Figura 2. Distribución muestral del número promedio de frutos dejados en el árbol, para la jornada 1, con muestras de 40, 50, 55 y 60 árboles seleccionados.

0,3 frutos y que disminuir la muestra en 30 árboles se traduce en menor tiempo y facilidad de evaluación, se establece que 60 árboles por lote es un tamaño de muestra adecuado para la aplicación del muestreo en surcos. Además, con este número de plantas se mantiene la probabilidad entre el 70% y 83% de que las estimaciones con el muestreo en surco queden incluidas en el intervalo de las estimaciones obtenidas con el muestreo aleatorio. En cuanto al sesgo del promedio obtenido con el muestreo en surcos y el muestreo aleatorio, éste no supera los 0,22 frutos.

En general, con este trabajo se validó un método de muestreo denominado plan surco,

propuesto y evaluado para la estimación de indicadores de recolección de café. Esta validación permite sugerir al caficultor una herramienta administrativa para evaluar las labores de recolección, con el fin de establecer políticas de incentivo y pagos e incluso tomar correctivos.

Puede concluirse que los errores de estimación asociados al promedio del número de frutos maduros dejados en el árbol y frutos dejados en el suelo, obtenidos con el muestreo aleatorio simple, no superan un fruto, con un tamaño de muestra de 60 árboles. Teniendo en cuenta estos resultados, el tamaño de muestra para utilizar el muestreo en surcos puede ser de 60 árboles, dado que el sesgo

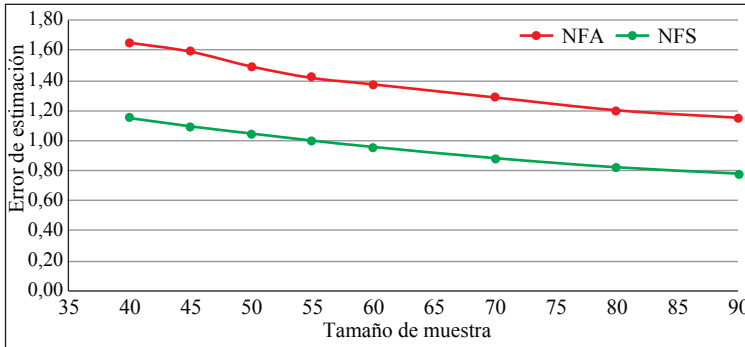


Figura 3. Error de estimación de acuerdo al número de árboles seleccionados en las submuestras a partir de la muestra aleatoria original.

no supera los 0,22 frutos y dicho método puede ser utilizado independientemente de las características del lote.

Para la variable número de frutos maduros dejados en el árbol, el método de muestreo en surcos tiene el mismo comportamiento con respecto a la estimación obtenida con el diseño de muestreo aleatorio, con una probabilidad del 82% de que las estimaciones queden incluidas en los intervalos de confianza construidos con el muestreo aleatorio.

LITERATURA CITADA

1. EFRON, B. Bootstrap methods: Another look at the Jackknife. *The annals of statistics* 7:1-26. 1979.
2. EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. [Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy]: *Rejoinder. Statistical science* 1(1):77. 1986.
3. GUTIÉRREZ, M., A. Propuesta de un método de muestreo para la evaluación de indicadores asociados a la recolección de café. Cali : Universidad del Valle. Facultad ingeniería. Escuela de ingeniería industrial y estadística, 2006, 81 p. Tesis: Estadístico.
4. MADR. CCI. Servicio de información agropecuaria. Estructura de costos II semestre 2010. [En línea]. Bogotá : Agronet, (s.f.). Disponible en internet: [Http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/public/boletines/Costos2010trim2/costos2010T2_archivos/frame.htm](http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/public/boletines/Costos2010trim2/costos2010T2_archivos/frame.htm). Consultado el 25 de Octubre de 2014.
5. SAS 9.4 TS Level 1M1 X64_7PRO platform. *North Carolina* : SAS Institute : Cary, 2012.

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

DIRECCIÓN

Hernando Duque O., Ing. Agrónomo M.Sc.
Ángela Liliana Zapata R., Administradora de Empresas M.Sc.

DISCIPLINAS DE INVESTIGACIÓN

Calidad

Gloria Inés Puerta Q., Ing. Química, Ing. Alimentos M.Sc.
Andrés Mauricio Villegas H., Ing. Agrónomo M.Sc.*
Aristóteles Ortiz, Químico, M.Sc.
Claudia Patricia Gallego A., Bacterióloga **
Mariana Santos R., Medica Veterinaria Zootecnista
Luz Fanny Echeverry G., Química
Jenny Paola Pabón U., Ing. Agrícola M.Sc.
Lady Juliet Vargas G., Ing. de Alimentos
Duván Gallego A., Tecnólogo en Producción Agrícola
Jazmín Vanessa López R., Tecnóloga Química
Alexis Uriago Y., Técnico en Producción Agrícola
Paola Andrea Calderón T., Tecnólogo en producción agropecuaria ecológica
Gustavo Echeverri M.

Gestión de Recursos Naturales y Conservación

Nelson Rodríguez V., Ing. Químico Ph.D.
Diego Antonio Zambrano F., Ing. Químico
Juan Carlos López N., Microbiólogo **
Rocío Espinosa A., Médico Veterinario y Zootecnista **
Andrés Mauricio López L., Médico Veterinario y Zootecnista **
Laura Vanessa Quintero Y., Ing. Química **
Jenifer Andrea Galeano S., Bióloga
Viviana Lorena Bohórquez Z., Bióloga
Cristy Mayerly González D., Ing. Ambiental
Andrés Felipe Osorio O., Ing. Químico
Claudia Rocío Gómez P., Tecnóloga Química
Olga Lucía Vargas I., Ing. Forestal Ph.D.
Samuel Castañeda
Walter Mauricio Osorio O.
Oscar Darío Yépez C., Aprendiz Universitario
Julieth Arias A., Aprendiz

Fisiología vegetal

Claudia Patricia Flórez R., Ing. Agrónomo Ph.D.
Jenny Lorena Aguirre M., Ing. de Alimentos
Claudia Yoana Carmona G., Ing. Agrónomo
Lizardo Norbey Ibarra R., Ing. Agrónomo
Carlos Andrés Unigarro M., Ing. Agrónomo M.Sc.
Mauricio Jiménez S., Ing. Agrónomo
Constanza Andrea Isaza M., Química Industrial
Braian Alejandro López O., Ing. Agrónomo
Marta Bibiana Escobar P., Tecnóloga Química
Claudia Marcela Mora A. **
Mario Franco A.
Braian Alejandro López O. **
Claudia Patricia Valencia V.

José Robín García C.
Marlio Fernando Abella D.

Suelos

Siavosh Sadeghian K., Ing. Agrónomo Ph.D.
Hernán González O., Ing. Agrónomo M.Sc.*
Luis Fernando Salazar G., Ing. Agrónomo M.Sc.*
José Horacio Rivera P., Ing. Agrónomo Ph.D.
Luz Adriana Lince S., Ing. Agrónomo, Geóloga**
Alveiro Salamanca J., Ing. Agrónomo Ph.D.
Vanessa Catalina Díaz P., Química
Janeth Escudero A., Microbióloga Industrial y Ambiental
Fabio Alexis Torres A., Ing. Agrónomo Esp.
Andrés Felipe Castro Q., Ing. Agrónomo M.Sc.
Wadi Andrey Castaño C., Ing. Agrónomo
César Augusto Gallego M., Ing. Agrónomo
Víctor Félix Alarcón T., Ing. Agrícola
Claudia Marcela Ospina F., Tecnóloga Química
John Andersson Giraldo F. Tecnólogo en Administración de Empresas Agropecuarias
Arturo Gómez V.

Fitotecnia

Francisco Fernando Farfán V., Ing. Agrónomo M.Sc.
Juan Carlos García L., Ing. Agrónomo Ph.D.
José Raúl Rendón S., Ing. Agrónomo M.Sc.
Leidy Tatiana Bermúdez F., Ing. Agrónomo
Nathalia Díaz M., Ing. Agrónomo
Leonardo Arvey Sánchez P., Ing. Agrónomo
Luisa Marcela Cerquera Barrera, Ingeniera Agrícola
Jorge Alexis Ramos Puentes, Ing. Agrícola
Carlos Augusto Ramírez C., Tec. Técnicas Forestales **
Albenis Tovar Pedreros, Tecnólogo en Producción Agrícola
Marco Fidel Cardona de la Cruz, Tecnólogo en Administración y Producción Limpia de Café
Miguel Ángel Erazo Robayo, Tecnólogo en Agricultura de Precisión

Mejoramiento Genético

José Ricardo Acuña Z., Biólogo Ph.D.
Diana María Molina V., Bacterióloga Ph.D.
Carlos Ernesto Maldonado L., Ing. Agrónomo M.Sc.*
Alexa Yadira Morales C., Bióloga
Ligia Belén Suescún P., Ing. de producción Biotecnológica
Henry Mauricio Salas M., Ing. Agrónomo
Conrado Antonio Quintero D., Administrador Financiero
Carlos Augusto Vera A., Administrador Financiero
Jairo Jaramillo O., Tec. en Electrónica **
Gilbert Rodríguez Q., Técnico Profesional en Desarrollo de Producción Pecuaria
Jhon Esteban Quintero A., Técnico en Producción de Café
Jhon Jairo Cuellar V., Tecnólogo en Producción Agrícola
Hernán Díaz C.
Cruz Elena Díaz M.
Omar Villarreal
Sandra Liliana Largo V.

Entomología

Pablo Benavides M., Ing. Agrónomo Ph.D.
Carmenza E. Góngora B., Microbióloga Ph.D.
Zulma Nancy Gil P., Ing. Agrónomo Ph.D.
Luis Miguel Constantino C., Biólogo Entomólogo M.Sc.
Marisol Giraldo J., Ing. Agrónomo M.Sc.*
Flor Edith Acevedo B., Ing. Agrónomo*
Lucio Navarro E., Biólogo*
Leidy Johanna Tapias I., Química Industrial
Aníbal Arcila M., Ing Agrónomo
Mauricio Jiménez Q., Tec. Administración Agropecuaria
Juan Paulo Pimentel S., Tec. Adm. Empresas Agropecuarias
Juan Carlos Ortiz F.
Carlos Alberto Quintero A.
Diana Soraya Rodríguez A., Tec. en Producción de Café
Claudia Bibiana Tabares B.
Fáber de Los Ríos P.
Diana Marcela Giraldo V.

Agroclimatología

Carolina Jaramillo G., Ing. Agrónoma, Ph.D
Carolina Ramírez C., Ing. Agrícola
Juan Gabriel Álvarez V., Ing. Agrícola
Arley Valencia S., Ing. Electrónico**
Mauricio Serna O., Ing. Electrónico
Wíllmar A. Rendón G., Tec. en Sistemas Informáticos
Jorge Hernán Marulanda E., Tec. en Electrónica
Jhony Andrey Sánchez E., Tecnólogo en Sistemas
Myriam Giraldo M.
Luis Gonzaga Henao R.
Fabián Sánchez L.
Luis Fernando Torres Q.
Orlando Salazar G.

Fitopatología

Álvaro León Gaitán B., Microbiólogo Ph.D.
Nancy del Carmen Arciniegas B., Ing. Agrónoma, M.Sc.
Juan Manuel López V., Ing. Agrónomo, M.Sc.
Ferneý López F., Ing. Agrónomo/Contador
Camilo Efrén López D., Ing. Agrónomo **
Alejandra María Hoyos G., Ing. Agrónomo
Carlos Alberto Zuluaga E., Tec. en Mantenimiento en Comp. y Redes
Henry Hugo Salcedo V., Técnico en Producción Agrícola
Adriana Paola Gómez C., Tecnólogo admón. y producción limpia de café
Carlos Arturo González V.
Jorge Dicksson Ocampo M.
Jaroliver Cardona G.
Juan Carlos López C.
Leidy Lorena Corrales V., Aprendiz

Sostenibilidad

Juan Mauricio Rojas A., Ing. Alimentos M.Sc.
Gloria Esperanza Aristizábal V., Lic. Bióloga y Química M.Sc.
María Cristina Chaparro C., Química M.Sc.
Janeth Alexandra Zuluaga M., Economista Empresarial M.Sc.
Paola Andrea Espejo G. Antropóloga, Esp. en Gestión de Proyectos
María Caterín Estrada C., Economista Empresarial
Mario López L.

Ingeniería agrícola

Carlos Eugenio Oliveros T., Ing. Agrícola Ph.D.
Juan Rodrigo Sanz U., Ing. Mecánico Ph.D.

César Augusto Ramírez G., Arquitecto M.Sc.
Aída Esther Peñuela M., Ing. Alimentos M.Sc.*
Paula Jimena Ramos G., Ing. Electrónico M.Sc.**
Mateo Castrillón C., Ing. Electrónico
Carlos Alfonso Tibaduiza V., Ing. Agrícola,**
Álvaro Guerrero A., Ing. Electrónico/Electricista,**
Ricardo José Grisales M., Tec. en Electrónica
Jorge Alexander Londoño C., Técnico en soldadura por arco y por soplete
Mario Espinosa G.
Javier Velásquez H.
Jhon Alejandro Ríos G., Pasante Universitario
Jairo Enrique Rubiano T., Pasante Maestría

EXPERIMENTACIÓN

Carlos Gonzalo Mejía M., Adm. de Empresas
Agropecuarias M.Sc.
Kelly Johana Correa A., Prof. en Adm. de Mercadeo
José Farid López D., Tec. en Administración Agropecuaria

Estación Central Naranja

Jhon Félix Trejos P., Ing. Agrónomo

Estación Experimental El Tambo

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

Estación Experimental El Rosario

Carlos Mario Ospina P., Ing. Forestal**

Estación Experimental La Catalina

Diego Fabián Montoya, Agrónomo
Francisco Javier Álzate O.
Vidal de Jesús Largo T.

Estación Experimental Libano

Jorge Camilo Torres N., Ing. Agrónomo

Estación Experimental Paraguaicito

Myriam Cañón H., Ing. Agrónomo **
Daniel Antonio Franco C., Tec. en Gestión Agropecuaria **

Estación Experimental Pueblo Bello

José Enrique Baute B., Ing. Agrónomo

Estación Experimental Santander

Pedro María Sánchez A., Ing. Agrónomo
Melsar Danilo Santamaría B., Ing. de Alimentos

APOYO A LA INVESTIGACIÓN

Biometría

Esther Cecilia Montoya R., Estadístico M.Sc.
Rubén Darío Medina R., Estadístico M.Sc.
Hernando García O., Tecnólogo Agroforestal**
Erika Milena Marín J., Aprendiz

Documentación

Alma Patricia Henao T., Lic. en Lenguas Modernas, Bibliotecóloga, Esp.
Nancy Elena Pérez M., Contador
Jorge Wilmar Valencia G. Tecnólogo en Análisis y Desarrollo de Sistemas de Información

Economía

César Alberto Serna G., Contador, M.Sc.
Juan Carlos Gómez S., Contador, Ing. Agrónomo **
Marisol González G., Economista **

Divulgación y Transferencia

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

UNIDAD ADMINISTRATIVA Y FINANCIERA

Luz Miryam Corredor R., Administradora de Empresas,
Contador Público, Esp.
Rufina Perdomo G.

Gestión Contable y Tributaria

Martha Elena Vélez H., Contadora Esp.
Jesús Danilo González O., Contador Esp.
Luis Alfredo Amaya F., Administrador Público
María Camila Ramírez J., Contadora **
María Consuelo González H.
Michael David Rivera L., Aprendiz

Gestión de Bienes y Servicios Mantenimiento

Óscar Fernando Ramírez C., Ing. Mecatrónica**
Paulo Alejandro Arias C., Ing. Electricista Esp.
Gabriel Hernando Ortiz C., Tec. en Gestión Bancaria y
Financiera
Javier Vanegas V. Técnico Electricista
Mauricio Alexander Erazo S., Técnico Electricista
Cristian Andrés Chica G., Ing. Mecatrónica
Uriel López P.
Rogelio Rodríguez G.
Eduardo Villegas A.
Fredy Hernán Osorio C.
Jhon Fredy Rojo G.
Jorge Eduardo Sepúlveda V.
Jorge Antonio Arias A.

Gestión de Tesorería

Luis Fernando Ospina A., Contador Público, Esp.

Gestión del Talento Humano

Érica Mayerly Galvis R., Trabajadora Social M.Sc.

Luz Yaneth Guarín C., Tecnóloga en Administración de
Negocios **
Germán Uriel G., Administrador de Empresas, Esp.
Elsa Natalia Quintero C., Profesional en Salud Ocupacional
Esp.**
Gina Alejandra Quiceno H., Aprendiz

Planeación Financiera y Presupuesto

Jesús Alberto Cardona L. Ing. Industrial M.Sc.
Valentina Sepúlveda C., Ingeniera Industrial, Esp
Damaris Márquez G., Administradora Financiera**
Federico Giraldo D., Administrador de Empresas**
Astrid Yuliana Ortiz R., Administradora de Empresas, Esp
Lina Marcela Patiño G., Tecnóloga en Gestión Administrativa

Gestión de Bienes y Servicios Contratación

Juan David Álzate O., Economista, M.Sc.
Ángela Jaramillo G., Prof. en Comercio Internacional **
Mauricio Loaiza M., Ing. Industrial
Leidy Tatiana Salas C., Profesional en Negocios
Internacionales
Luz Stella Duque C., Tecnóloga en Administración de
Negocios
Aura Janeth Sánchez P., Tecnóloga en análisis y desarrollo de
sistemas de información
Yolanda Castaño G.
Gabriel Antonio Melo P.
Juan Pablo Jaramillo B., Técnico en Fotografía
Lina María Giraldo, Técnico Asistente Administrativo**
Kevin Pérez C., Aprendiz
Walter Cuervo C., Aprendiz

Tecnología de la Información y Comunicaciones

Luis Ignacio Estrada H., Ing. Químico
Carlos Hernán Gallego Z., Ing. de Sistemas, Esp.**
Luz Ángela Fernández R., Licenciada en Psicopedagogía
Elkin Marcelo Valencia L., Ing. de Sistemas. Esp.
Daniel Orozco J., Ing. Sistemas y Telecom. Esp.
Leonardo Adolfo Velásquez N., Ing. de Sistemas y Telecom.
Esp.
Kevin Adolfo Hincapié V., Ing. de Sistemas y Telecom. Esp.
Andrés Felipe Ramírez M., Ing. Sistemas y Telecom.
Humberto Iván Ríos, Ing. Ambiental Esp.
José Rubiel Castrillón G., Ing. Sistemas y Telecom.
Yulieth Paola Giraldo E., Ing. de Sistemas y Telecom Esp
Audberto Quiroga M., Biólogo
Jonnier Alejandro Hoyos A., Tecnólogo en gestión
agropecuaria
Stephan Andrés Salazar A., Ing. Agrícola

*Comisión de Estudios

** Adelantando estudios en el país

Instructivo para la elaboración de los artículos de la Revista Cenicafé

TEXTOS

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

TABLAS Y FIGURAS

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

ECUACIONES

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

SISTEMA DE UNIDADES

- En los productos de investigación a divulgar se utiliza exclusivamente el Sistema Métrico Decimal (SI), además de las unidades específicas de mayor uso por parte de la comunidad científica.
- Los puntos de multiplicación y los números superíndice negativos pueden ser usados solamente con unidades del SI (por ejemplo, $m^3 \cdot s^{-1}$ 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 g.día⁻¹, y no 5 g de peso seco.día⁻¹
 - _ Se aplicaron 25 g.ha⁻¹ del ingrediente activo, y no 25 g i.a./ha
 - _ Cada planta recibió 20 g.ha⁻¹ de agua, y no 20 g H₂O/ha por planta
- Use la línea oblicua o *slash* (/) para conectar unidades del SI con unidades que no son del SI (por ejemplo: 10 °C/h ó 10 L/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 y 20°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 los siguientes modelos para citar las bibliografías, de acuerdo con los criterios determinados por el Comité Editorial de Cenicafé.

Libros, folletos y monografías

- Autor(es) . Título : Subtítulo. No. de edición. Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). No. total de págs.

Partes o capítulo de un libro

- Autor(es) del capítulo o parte. Título del capítulo o parte : Subtítulo. Paginación de la parte citada. En: Compilador(es) o editor(es) del trabajo general . Título del trabajo general: Subtítulo. No. de edición. Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). No. total de págs. del libro.

Ponencias

- Autor(es) ponencia, congreso, etc . Título de la ponencia, etc. : Subtítulo. Paginación de la parte citada. En: Título oficial del congreso, simposio, etc . (No. arábigo correspondiente al congreso : fecha y año de realización : ciudad donde se realizó). Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). No. total de págs.

Trabajos de grado

- Autor(es) del trabajo. Título : Subtítulo. Ciudad : Institución universitaria que otorga el título. Facultad o Escuela, Fecha. No. total de págs. Trabajo de grado: título recibido.

Congresos, Seminarios, Simposios

- Nombre del congreso en mayúscula sostenida la primera palabra : Memorias, Actas, Procedimientos, etc. (No. Arábigo correspondiente al congreso : fecha y año de realización : ciudad donde se realizó). Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). No. total de págs.

Artículos de revistas

- Autor(es) . Título del artículo : Subtítulo . Título de la revista. Volumen(número):Pág. inicial-pág.final del artículo. Año

Separatas y reimpresos

- Autor(es). Título de la separata : Subtítulo. En: Título de la publicación de la cual se extrae la separata Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha) si es un libro, o, Volumen y/o número si es una revista Año. (separata). No. Total de págs.

Boletines y Publicaciones en serie

- Autor(es) . Título : Subtítulo . Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). No. total de págs. (Avances Técnicos, Boletín Técnico, Circular, etc. No. 00).

Normas

- Autor(es). Título : Subtítulo. Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). (NTC 000). No. de págs.

Documentos electrónicos

- Autor(es). Título : Subtítulo. [En línea]. Lugar de publicación : Publicador, fecha. Disponible en internet: <http://www. ...> . Parte de un documento electrónico o registro de base de datos Consultado el ...Fecha de la consulta.

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 Cenicafe, se debe incluir la fecha de retiro (mes y año)
- Proeveer 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 y se debe enumerar siguiendo un orden ascendente Las referencias deben citarse en el texto utilizando el número correspondiente al orden alfabético

PRODUCCIÓN EDITORIAL

Revisión de textos y corrección de estilo: Sandra Milena Marín López Ing. Agr. MSc.

Diseño y diagramación: Óscar Jaime Loaiza E.

Fotografías: Archivo Cenicafé

Impresión:

1.200 ejemplares



Cenicafé

Al servicio de los caficultores colombianos, desde 1938

www.cenicafe.org