

# Cenicafé

Revista del  
Centro Nacional de Investigaciones de Café



---

Volumen 64 Número 1

Enero - Junio 2013





**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 1° enero/2015- diciembre 31/2018

Jose Fernando Montoya Ortega

Jose Alirio Barreto Buitrago

Eugenio Velez Uribe

Danilo Reinaldo Vivas Ramos

Crispín Maria Villazon De Armas

Javier Bohorquez Bohorquez

Octavio Oliveros Collazos

Edilberto Rafael Alvarez Pineda

Leonardo Javier Pabón Sanchez

Alfredo Yañez Carvajal

Carlos Alberto Cardona Cardona

Alejandro Corrales Escobar

Jorge Julian Santos Orduña

Luis Javier Trujillo Buitrago

Camilo Restrepo Osorio

**Gerente General**

LUIS GENARO MUÑOZ ORTEGA

**Gerente Administrativo**

LUIS FELIPE ACERO LÓPEZ

**Gerente Financiero**

JULIÁN MEDINA MORA

**Gerente Comercial**

CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ

**Gerente Comunicaciones y Mercadeo**

LUIS FERNANDO SAMPER GARTNER

**Gerente Técnico**

CARLOS ARMANDO URIBE FANDIÑO

**Director Investigación Científica y Tecnológica**

FERNANDO GAST HARDERS

**Uso del material de esta revista:**

---

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

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

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

---

Editada en Enero 2015  
Tel: 57(6)8506550 Fax: 57(6)8504723 A.A.: 2427 Manizales  
E-mail: [cenicafe@cafedecolombia.com](mailto:cenicafe@cafedecolombia.com)  
[www.cenicafe.org](http://www.cenicafe.org)

# Cenicafé

Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café

Manizales - Caldas - Colombia

---

VOL. 64

ENERO - JUNIO 2013

No. 1

---

## CONTENIDO

**ACUMULACIÓN DE CALCIO, MAGNESIO Y AZUFRE EN LOS FRUTOS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) VARIEDAD CASTILLO®.** Siavosh Sadeghian Khalajabadi; Beatriz Mejía Muñoz; Hernán González Osorio .....7

**CALCIUM, MAGNESIUM AND SULFUR ACCUMULATION IN COFFEE BERRIES (*Coffea arabica* L.) OF CASTILLO VARIETY®**

**ARQUITECTURA DEL DOSEL E INTERCEPTACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR POR TRES ESPECIES FORESTALES NATIVAS EN COLOMBIA.** Ángela María Castaño Marín; Héctor Alberto Chica Ramírez; Diego Obando Bonilla; Néstor Miguel Riaño Herrera .....19

**CANOPY ARCHITECTURE AND SOLAR RADIATION CAPTURING FOR THREE NATIVE TREE SPECIES IN COLOMBIA**

**ASPECTOS DEL CICLO DE VIDA DE *Puto barberi* Cockerell (HEMIPTERA: PUTOIDAE).** Clemencia Villegas García; Héctor Darío Peña M; Raúl Isaías Muñoz H; Harol Enrique Martínez C; Pablo Benavides Machado.....31

**SOME ASPECTS OF THE LIFE CYCLE OF *Puto barberi* Cockerell (HEMIPTERA: PUTOIDAE)**

**CINÉTICA QUÍMICA DE LA FERMENTACIÓN DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ A TEMPERATURA AMBIENTE.** Gloria Inés Puerta Quintero .....42

**CHEMICAL KINETICS DURING THE MUCILAGE COFFEE FERMENTATION AT AMBIENT TEMPERATURE**

**COEFICIENTES PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DEL BRILLO SOLAR EN LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA.** Orlando Guzmán Martínez; José Vicente Baldión Rincón; Ovidio Simbaqueva Fonseca; Henry Josué Zapata; César Chacón Cardona .....60

**GLOBAL SOLAR RADIATION COEFFICIENTS ESTIMATED FROM SOLAR SHINE IN THE COLOMBIAN COFFEE REGION**

## COMITÉ EDITORIAL

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

## EDITORES ESPECIALIZADOS DE LA REVISTA 64 (1)

Nelson Rodríguez V.	PhD. Cenicafé, FNC
Juan Carlos Herrera P.	PhD. Cenicafé, FNC
Marco A. Cristancho A.	PhD. Cenicafé, FNC
Luis Fernando Salazar G.	MSc. Cenicafé, FNC

# ACUMULACIÓN DE CALCIO, MAGNESIO Y AZUFRE EN LOS FRUTOS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) VARIEDAD CASTILLO®

Siavosh Sadeghian Khalajabadi\*; Beatriz Mejía Muñoz\*; Hernán González Osorio\*

---

SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; GONZÁLEZ O.; H. Acumulación de calcio, magnesio y azufre en los frutos de café (*Coffea arabica* L.) Variedad Castillo®, Revista Cenicafé 64 (1): 7-18. 2013

El conocimiento de la dinámica de los nutrientes minerales ayuda a identificar los períodos de mayor exigencia por las plantas, lo que resulta útil en la planificación de labores de fertilización. El objetivo de este trabajo fue determinar la acumulación de calcio–Ca, magnesio–Mg y azufre–S en los frutos de café (*Coffea arabica* L.) Variedad Castillo®, y las variaciones de sus concentraciones en las hojas. El estudio se desarrolló entre abril y noviembre de 2010, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé: Naranjal (Chinchiná, Caldas), El Rosario (Venecia, Antioquia), Líbano (Líbano, Tolima) y Pueblo Bello (Pueblo Bello, Cesar). A partir del día pico de la floración, mensualmente se tomaron muestras de frutos y hojas en las ramas productivas de 100 plantas y se analizó su composición. El crecimiento de los frutos presentó algunas variaciones entre las localidades, siendo un patrón común el modelo sigmoideal doble. Las concentraciones de los elementos disminuyeron considerablemente durante los primeros 120 días después del día pico de la floración–DDPF, para luego estabilizarse hasta el momento de la recolección. Se presentó la siguiente secuencia en el contenido de los nutrientes en el fruto: Ca>Mg>S. Durante los primeros 60 DDPF se acumuló, en promedio, el 14% de la cantidad total de Ca, Mg y K en el fruto, entre los 60 y 180 DDPF el 65% y entre los 180 y 240 DDPF el 21%. Las concentraciones foliares de estos elementos presentaron algunas variaciones a través del tiempo, sin que pudieran relacionarse con el crecimiento y desarrollo de los frutos.

**Palabras clave:** Materia fresca y seca, re–movilización de nutrientes, curva de crecimiento, análisis foliar.

---

## CALCIUM, MAGNESIUM AND SULFUR ACCUMULATION IN COFFEE BERRIES (*Coffea arabica* L.) OF CASTILLO VARIETY®

Nitrogen (N) is highly required by coffee (*Coffea arabica* L.) in the different crop stages, but in Colombia the response to this nutrient has been negative during the nursery stage likely as a result of high doses applied as urea. In order to provide more criteria for N management at this stage, the effect of four doses (0.25, 0.50, 0.75 and 1.00 g of N / plant) and eight N sources (urea, ammonium sulfate-AS, ammonium nitrate, potassium nitrate, Calcinit, Nitabor, Nitromag and Sulfammo) on growth and nutrient uptake was assessed in two soil mapping units of Antioquia (Salgar and Venecia). When the seedlings were two months old, N was applied along with 2 g of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / plant as triple superphosphate. Additionally, other treatments were evaluated: i) absolute control without N and P, ii) control without N, iii) 2 g of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / plant, as DAP, iv) mixture of soil: earthworm manure in a 3 to 1 ratio, and v) mixture of soil:earthworm manure + 2 g of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / plant, as DAP. The plant response to N in terms of dry weight depended on the soil unit; there was only effect of sources in Salgar, and effect of sources and doses in Venecia. In both soils the highest average was obtained for AS and the lowest for potassium nitrate. In Venecia, the biological optimum was obtained with 0.54 g of N / plant with a low increase of magnitude (16.5%). The plant growth was negatively affected by the manure in Salgar, but the opposite occurred in Venecia. By applying phosphorus as DAP the dry weight was increased. These differences were associated with soil salinity and acidity. The plant N concentration was not affected by the N application.

**Keywords:** Nutrients, earthworm manure, acidity, salinity.

---

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

Entre los elementos mayores que demandan las plantas para su crecimiento y desarrollo se encuentran el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y el azufre (S) (8). Estos también son llamados macronutrientes secundarios, clasificación que según algunos autores se relaciona con la menor frecuencia de observar deficiencias con respecto a los nutrientes primarios (nitrógeno, fósforo y potasio), antes que la cantidad requerida (17). La demanda de Ca, Mg y S depende de la especie o variedad, el nivel de producción, las propiedades de suelo, los componentes ambientales y el manejo del cultivo (3).

En el cultivo de café, los requerimientos de Ca, Mg y K varían según la etapa del desarrollo. Durante la fase de crecimiento vegetativo –aproximadamente 650 días después de la siembra– una planta extrae del suelo entre 3,9 y 10,5 g de Ca y de 1,2 a 2,1 g de Mg. Hasta los 2.000 días, es decir 5,5 años, estas cantidades alcanzan 60 g de Ca y entre 15 y 30 g de Mg, según las condiciones del sitio (11). Parte de lo anterior se remueve del lote a través de la cosecha, mientras que el resto retorna al suelo en forma de hojas, ramas, raíces y flores, entre otros. En promedio, por cada 1.000 kg de café almendra, equivalentes a 1.250 kg de café pergamino seco (100 arrobas), se extraen 4,3 kg de Ca, 2,3 kg de Mg y 1,2 kg de S (14).

En cuanto a la acumulación de los nutrientes en el fruto se refiere, su comportamiento está influenciada por el crecimiento del fruto mismo, el cual para la variedad Colombia se ajusta a un modelo sigmoidal, con tres etapas: una logarítmica que va desde la floración hasta los 60 días, otra exponencial hasta los 180 días y una de estabilización, hasta llegar a la madurez completa (16). Otros reportes hacen referencia a un modelo sigmoidal doble (6, 10) con cinco estadios:

“garrapata”, expansión rápida, crecimiento suspendido, llenado y maduración, de acuerdo con Cannel, 1971, y Rena *et al.*, 2001, citados por Laviola *et al.* (6).

De acuerdo con Matiello *et al.* (7), la cantidad de macro y micronutrientes requerida durante la primera fase es poca, pero ésta se incrementa de manera significativa cuando el fruto pasa de “verde acuoso” a “verde sólido”.

El conocimiento acerca de la dinámica de los nutrientes desde la flor hasta el fruto maduro permite identificar los períodos de mayor exigencia por las plantas, pudiéndose mejorar la eficiencia de las prácticas de fertilización. Así mismo, el conocer las variaciones de las concentraciones de los nutrientes en las hojas y su movilización hacia los frutos durante la fase reproductiva en los diferentes ambientes ayuda en el diagnóstico del estado nutricional de las plantas, permitiendo ajustar los planes de la fertilización de los cultivos (4, 5).

Uno de los primeros estudios en café fue desarrollado por Moraes y Catani (9), quienes indican que la acumulación de materia seca por el fruto se incrementa notablemente a partir del cuarto mes de la floración; así mismo, estos autores sugieren que en los dos últimos meses el fruto acumula cerca del 40% de su peso y de los nutrientes. En contraposición, Ramírez *et al.* (10) indican que el 50% de los requerimientos totales de todos los elementos, a excepción de K, son consumidos por el fruto durante los primeros 90 días.

En Colombia, raras veces se observan síntomas de deficiencia de Ca y S en café, en tanto que son muy frecuentes los síntomas de la falta de Mg, especialmente en las ramas productivas. En concordancia a lo expuesto,

se ha encontrado respuesta al suministro de Mg (13) y parcialmente al azufre (15).

Las aplicaciones de Ca normalmente se realizan a través del encalamiento, mientras que el suministro de Mg sucede tanto por la aplicación de la dolomita –en las prácticas para el control de la acidez– como mediante el uso de fertilizantes compuestos, en dosis que por lo general varían entre 40 y 60 kg.ha-año<sup>-1</sup> de MgO. Con respecto al azufre, su empleo se ha incrementado en los últimos 5 años, con cantidades comparables a las de Mg (12).

El objetivo de esta investigación consistió en determinar la acumulación de Ca, Mg y S durante el desarrollo de los frutos de café y las variaciones de sus concentraciones en las hojas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La fase de campo de la investigación se llevó a cabo entre los meses de abril y noviembre de 2010, en las siguientes Estaciones Experimentales del Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé: Naranjal (Chinchiná, Caldas), El Rosario (Venecia, Antioquia), Líbano (Líbano, Tolima) y Pueblo Bello (Pueblo Bello, Cesar). En cada sitio se seleccionó un lote de café Variedad Castillo®

en buen estado fitosanitario, sembrado o renovado por zoca entre los años 2006 y 2007 (segundo o tercer año de cosecha) con densidades entre 5.000 y 10.000 plantas por hectárea. En Pueblo Bello, la plantación se encontraba bajo sombrero regulado, en tanto que las demás se estaban establecidas a plena exposición solar. Se tomaron muestras de suelo en el mes de agosto (Tabla 1) y se registró la precipitación desde el inicio de floraciones hasta el final de la cosecha (Tabla 2). El suministro de nutrientes se realizó en dos ocasiones durante los meses de marzo-abril y septiembre-octubre (Tabla 3), basado en el análisis de suelos realizados previo a la iniciación del trabajo.

En cada localidad se identificó el día pico de la floración (el día en el que ocurrió la mayor floración del año) y, a partir de esta fecha, se tomaron mensualmente muestras de frutos y de hojas en las ramas productivas de 100 plantas, que se seleccionaron de manera aleatoria al iniciar la investigación. El número de frutos recolectados por planta varió en cada muestreo, así: 40 en el primero, 20 en el segundo, 10 en el tercero y 4 entre el cuarto y octavo muestreos. En cada oportunidad se determinó el peso individual de 50 frutos y el contenido de humedad a 105°C. Tanto los frutos como las hojas

**Tabla 1.** Propiedades de los suelos en los lotes experimentales.

	Estación Experimental			
	Naranjal	Líbano	El Rosario	Pueblo Bello
pH	4,9	5,0	4,4	4,4
Materia orgánica (%)	14,9	18,5	12,1	9,7
K (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,23	0,41	0,75	0,45
Ca (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )	2,62	1,30	0,40	2,21
Mg (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,66	0,39	0,44	0,59
Al (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )	1,0	1,8	6,6	2,5
P (mg.kg <sup>-1</sup> )	6	6	46	11
S (mg.kg <sup>-1</sup> )	18	4	8	44
Textura	Franco	Franco	Arcilloso	Arcilloso

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

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

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

Estación	N			
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO
		(kg.ha-año <sup>-1</sup> )		
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.

(tercero o cuarto par, contadas a partir del ápice) se secaron en estufa a 70°C, durante 48 y 120 horas, respectivamente, y se analizaron sus concentraciones de Ca, Mg y S, de acuerdo con la metodología descrita por Carrillo *et al.* (1).

Con base de la materia seca y la concentración de Ca, Mg y S en los frutos se calculó la extracción y la acumulación relativa de estos nutrientes en cada una de las épocas de muestreo.

Para explicar el crecimiento de los frutos en función del tiempo se utilizaron los siguientes modelos de regresión no-lineares sigmoidales, con tres y cuatro parámetros (Ecuación <<1>>), de acuerdo con lo sugerido por Laviola *et al.* (4, 5):

$$\hat{y} = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{x - x_0}{b}\right)}, \quad \hat{y} = y_0 + \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{x - x_0}{b}\right)} \quad \text{Ecuación <<1>>}$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Precipitación.** El año 2010 se caracterizó por altas precipitaciones (Tabla 2), especialmente durante el período del crecimiento y desarrollo de los frutos –marzo a noviembre de 2010– y, en razón de ello, la falta de humedad no fue un limitante. Para estos 8 meses se registraron las siguientes cantidades de lluvia: Líbano 2.308 mm, Pueblo Bello 2.705 mm, Naranjal 3.203 mm y El Rosario 3.356 mm.

**Crecimiento del fruto.** El crecimiento del fruto, expresado en términos de materia fresca, presentó algunas variaciones entre las localidades (Figura 1). En Naranjal y Pueblo Bello fue lento hasta los 60 días después del pico de floración (DDPF), entre esta fecha y los siguientes 30 días

tuvo un incremento considerable, de los 90 a los 210 días se mantuvo relativamente constante, para terminar en el último mes con un aumento leve.

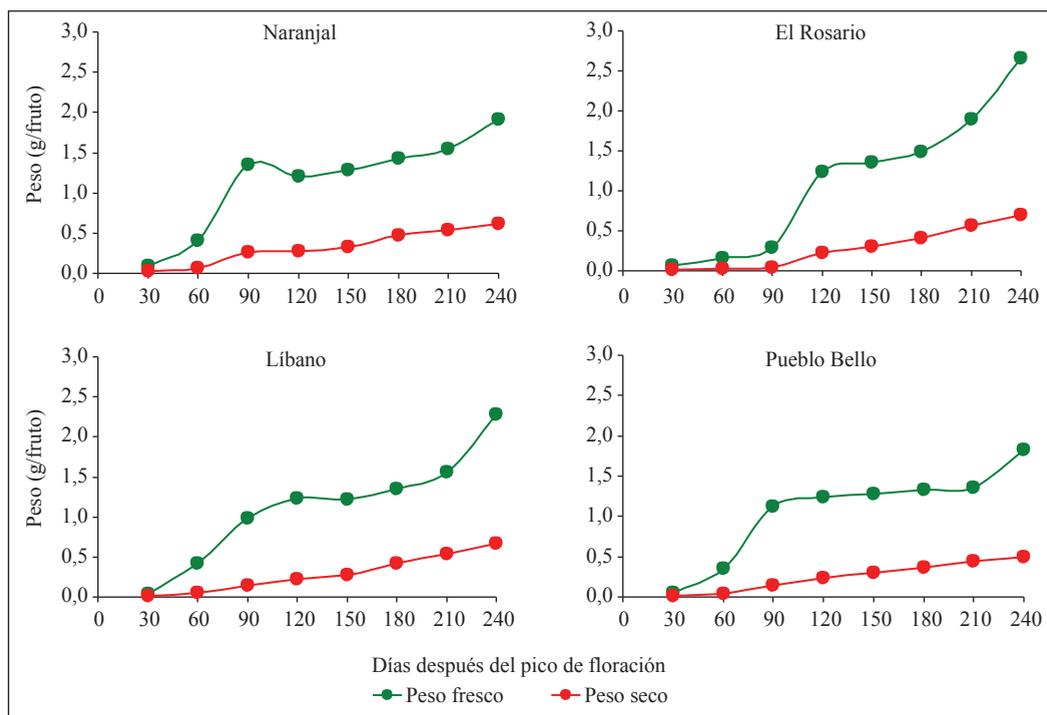
En El Rosario la fase de crecimiento lento se prolongó hasta los 90 días, en el siguiente mes se presentó un crecimiento más acelerado y, a partir de este momento y hasta el último día exhibió un aumento progresivo.

El comportamiento registrado en Líbano fue similar al de El Rosario, con la diferencia que en esta localidad el crecimiento inicial fue más sostenido hasta los 90 DDPF.

Los cambios en la biomasa de los frutos en función del tiempo se ajustaron al modelo

sigmoideal doble, como también lo evidencian Ramírez *et al.* (10) y Laviola *et al.* (6); en este sentido, la diferencia entre los parámetros de las ecuaciones obtenidas corroboran que el patrón de las curvas varió según la localidad (Tabla 4).

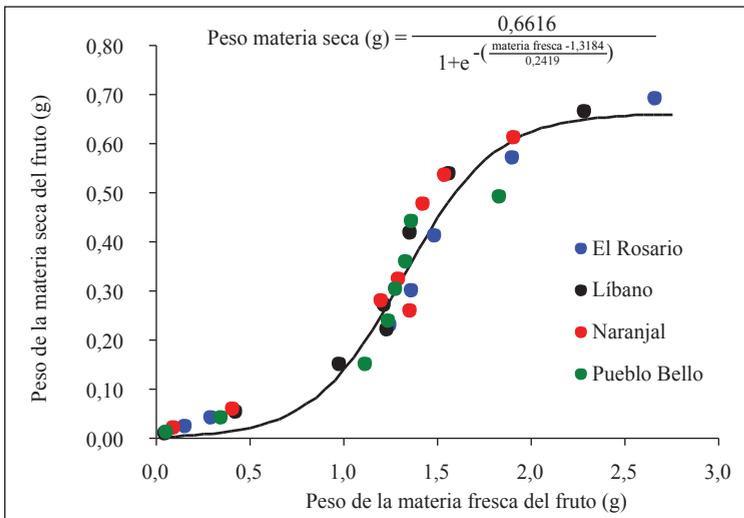
Las variaciones de la materia seca del fruto en función de la materia fresca fueron explicadas en el 95% mediante el modelo sigmoideal (Figura 2). Este comportamiento sugiere que en la fase inicial del crecimiento una mayor parte del fruto está constituida por el agua, pero a medida que avanza la maduración y ocurre el llenado, la proporción del agua disminuye. En la fase final el fruto gana de nuevo humedad, posiblemente en consecuencia de los cambios ocurridos a nivel de pulpa.



**Figura 1.** Peso de la materia fresca y seca de los frutos de café en función de tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

**Tabla 4.** Ecuaciones de regresión del peso de la materia fresca del fruto de café en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Estación	Período (DDPF)	Modelo	R <sup>2</sup> (%)
Naranjal	30 a 150	$y=1,280/(1+\exp(-(x-60,990)/1,310))$	98,4
	120 a 240	$y=1,129+269,900/(1+\exp(-(x-563,300)/55,230))$	99,3
Libano	30 a 150	$y=1,237/(1+\exp(-(x-70,126)/14,146))$	99,8
	120 a 240	$y=1,204+121,900/(1+\exp(-(x-370,100)/27,550))$	99,9
Pueblo Bello	30 a 150	$y=1,265/(1+\exp(-(x-60,990)/10,313))$	99,9
	120 a 240	$y=1,270+206,800/(1+\exp(-(x-345,90)/17,91))$	98,5
El Rosario	30 a 150	$y=1,379/(1+\exp(-(x-101,084)/9,068))$	98,4
	120 a 240	$y=1,209+5,573/(1+\exp(-(x-274,049)/32,596))$	99,9



**Figura 2.** Variaciones del peso de la materia de fruto en función del peso fresco, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

**Concentración de Ca, Mg y S en el fruto.** La concentración de Ca disminuyó considerablemente durante los primeros 120 DDPF, para luego estabilizarse hasta el momento de la recolección (Figura 3). En el caso de S, la fase de estabilización se logró a los 150 DDPF, en tanto que para el Mg la reducción fue rápida durante los 120 DDPF y lenta entre esta fecha y los 240 días. El comportamiento descrito, también reportado para café por Chaves y Sarruge (2) y Souza *et al.* (18), está asociado a las variaciones en el crecimiento del fruto a través del tiempo y se conoce como el efecto de la dilución.

El promedio de la concentración de Ca pasó de 1,07% (30 DDPF) a 0,27% (240 DDPF), la de Mg de 0,44% a 0,12% y de S de 0,24% a 0,07%, lo que representa reducciones cercanas al 70%. Los valores más bajos, correspondientes a los 240 DDPF, son similares a los reportados por Sadeghian *et al.* (14) para dos localidades de la zona cafetera del país (Ca 0,28% a 0,32%, Mg 0,10% a 0,12% y S 0,08%).

Sólo durante los primeros 90 DDPF se registraron diferencias relativamente grandes entre los sitios; al respecto se puede decir que El Rosario y Pueblo Bello presentaron

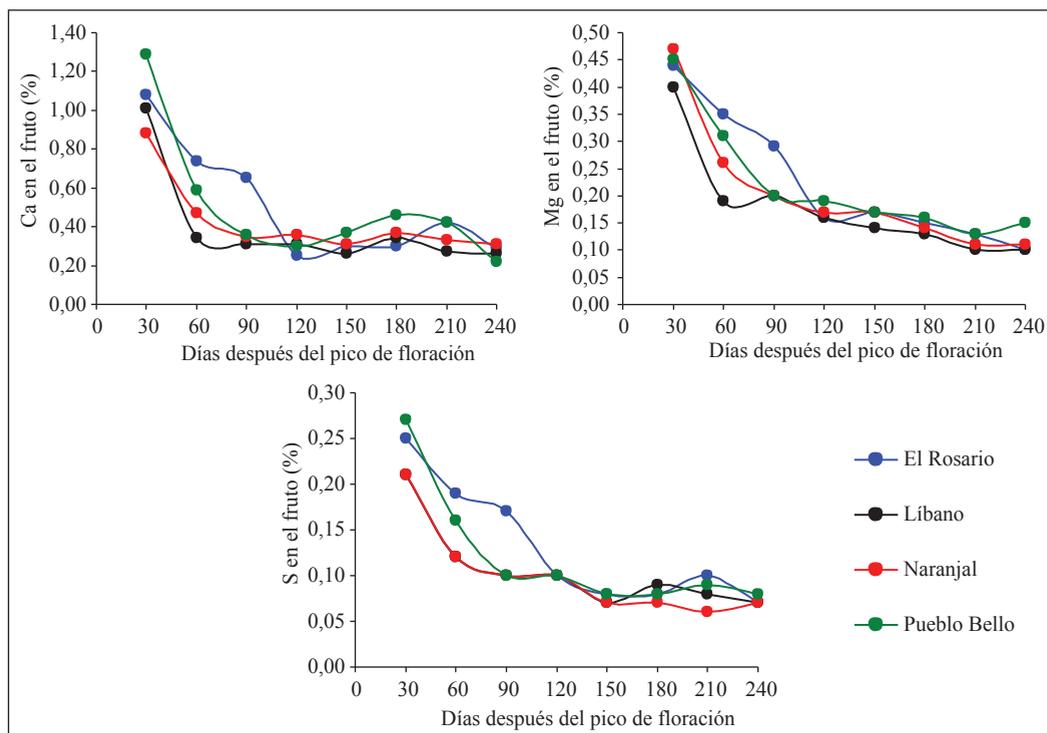
los valores más altos para los tres elementos objeto de estudio. También se debe aclarar que no se halló una relación clara entre la concentración de los nutrientes en el fruto y la fertilidad del suelo, o en su defecto el plan de fertilización; por lo tanto, se asoció parte de este comportamiento a las diferencias debido al peso de los frutos y el efecto de la dilución. Lo expuesto sugiere que la concentración de los nutrientes en el fruto puede no ser tan sensible a cambios de su disponibilidad en el suelo, como ocurre con la hoja.

### Acumulación de Ca, Mg y S en el fruto.

En la Figura 4 se presenta la acumulación de Ca, Mg y S en los frutos a través de tiempo. Dado que esta variable resulta de

multiplicar la concentración del elemento (en porcentaje) por el peso del fruto (en gramos), su comportamiento resulta similar a la observada para la biomasa fresca y seca, especialmente para el Mg y S (Figura 1).

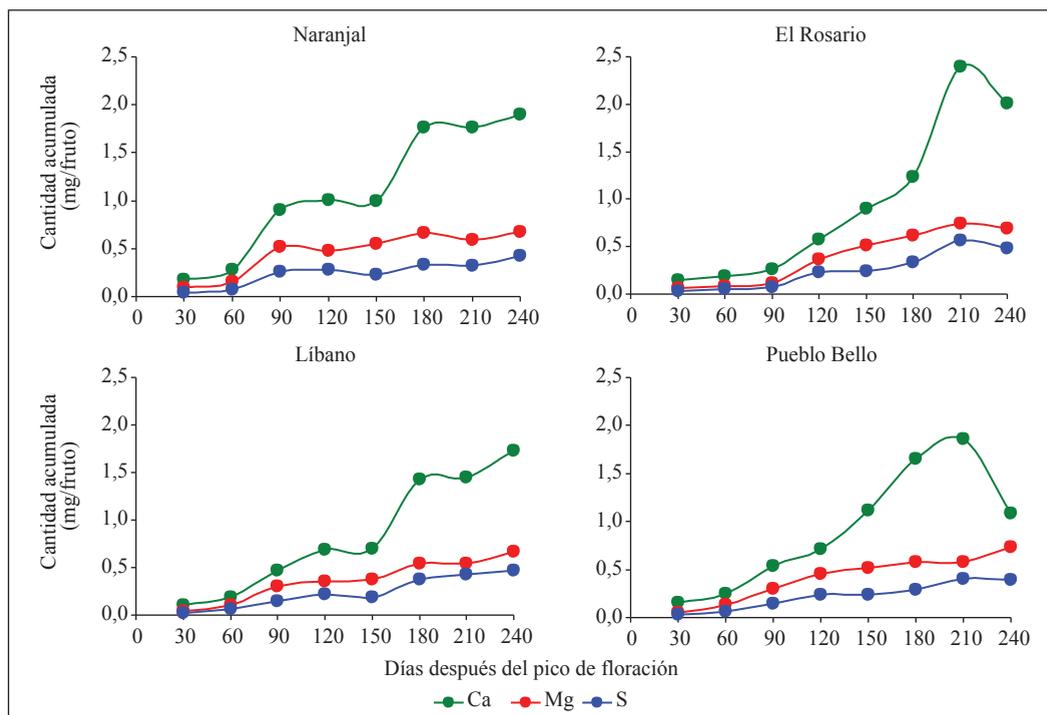
Durante todo el período del desarrollo de los frutos se presentó el siguiente orden en los contenidos de los elementos en las cuatro Estaciones Experimentales:  $S < Mg < Ca$ . Las relaciones halladas presentaron los siguientes rangos:  $Ca/S: 3,08-4,58$ ,  $Mg/S 1,42-2,18$  y  $Ca/Mg 1,76-3,06$ . Las diferencias en los contenidos de Ca con respecto a Mg y S se hicieron mayores a partir de 90 DDPF. Con el fin de establecer una comparación entre los nutrientes estudiados en este documento



**Figura 3.** Concentración de calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) en los frutos de café en función de tiempo transcurrido después del día pico de la floración en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

y los demás macronutrientes, en la Tabla 4 se consignan las cantidades acumuladas en los frutos de café 240 DDPF, es decir, al momento de la cosecha. Se presentó el siguiente orden en todas las localidades: K>N>Ca>P>Mg>S. Ramírez *et al.* (10) reportan un orden similar para la variedad Caturra (K>N>Ca>Mg>P>S).

**Acumulación relativa de Ca, Mg y S en el fruto.** En la Figura 5 se presenta la acumulación relativa de Ca, Mg y S en los frutos de café a través de tiempo, tomando como punto de referencia el 100% de lo asimilado. Se puede comentar que de un modo general la cantidad total de nutrientes acumuladas durante los primeros



**Figura 4.** Cantidad acumulada de calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) en los frutos de café, en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

**Tabla 5.** Cantidades acumuladas de macronutrientes en el fruto de café, 240 días después del día pico de la floración, para cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Estación	Cantidad acumulada de nutriente (mg/fruto)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
El Rosario	9,61	0,76	12,78	0,96	0,40	0,25
Líbano	7,78	0,87	12,71	0,84	0,37	0,24
Naranjal	8,63	0,67	11,14	1,10	0,46	0,25
Pueblo Bello	8,12	0,54	9,45	0,92	0,42	0,23

60 ó 90 DDPF fue baja (14%), así mismo en los últimos 2 meses antes de la cosecha (21%), mientras que el mayor porcentaje se almacenó entre estos dos períodos (65%). Ramírez *et al.* (10) hallaron que para la variedad Caturra el 50% de los requerimientos totales de Ca, Mg y S son consumidos por el fruto durante los primeros 90 días. Esta condición concuerda con lo hallado para Naranjal, no así para El Rosario, Pueblo Bello y Libano.

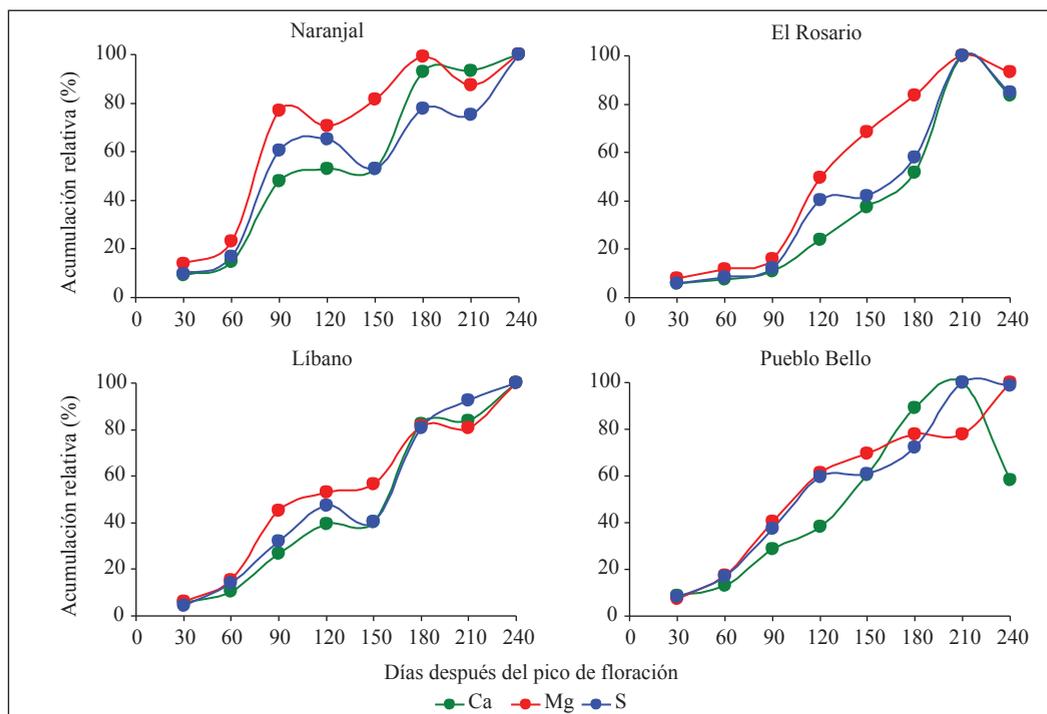
Los resultados expuestos revelan que pese a cierta similitud, la acumulación de los nutrientes puede variar entre sitios, dependiendo de las condiciones predominantes. Los estudios desarrollados por Laviola *et al.* (4, 6) confirman lo expuesto, al demostrar que la acumulación

de macronutrientes cambia de acuerdo a la temperatura, factor climático afectado por la altitud.

### Concentración foliar de Ca, Mg y S.

Las concentraciones de los tres nutrientes, contenidos en el tercero o cuarto par de hojas, presentaron algunas variaciones a través del tiempo, sin que pudieran relacionarse con el proceso del crecimiento y desarrollo de los frutos (Figura 6). Los cambios en referencia estarían más bien relacionados con la disponibilidad de estos elementos para la planta, asociada al aporte de los nutrientes vía fertilización y a las lluvias.

En una investigación realizada por Laviola *et al.* (5), tampoco se hallaron evidencias claras que indicaran una re-movilización de Ca, Mg



**Figura 5.** Acumulación relativa de calcio, magnesio y azufre en los frutos de café en función de tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

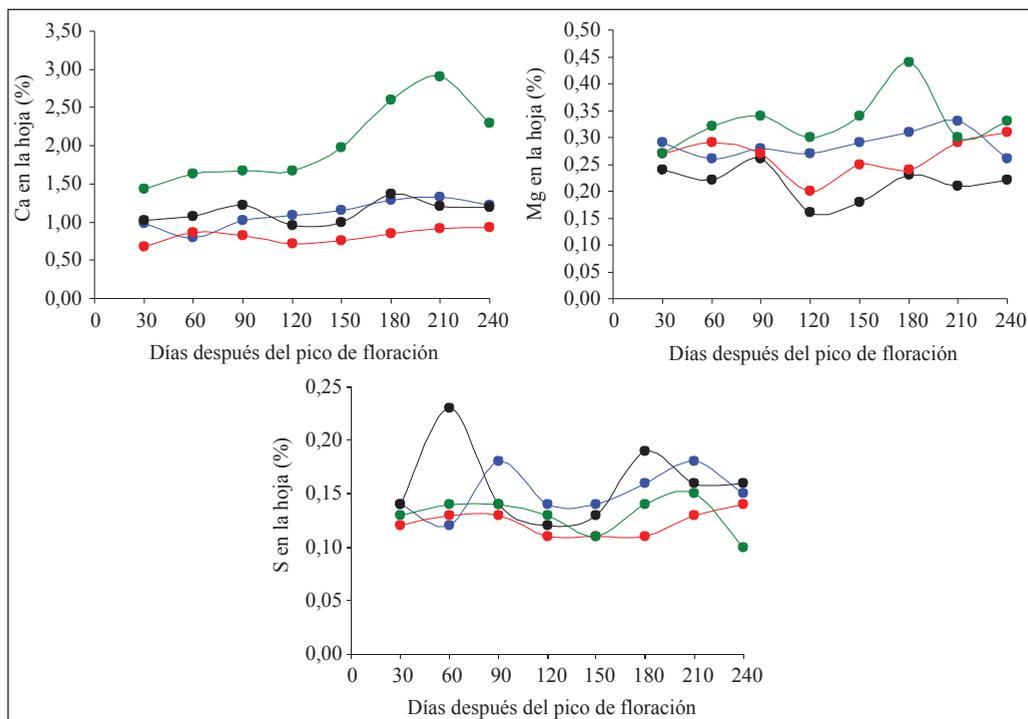
ni S desde las hojas. Un comportamiento semejante fue registrado por Chaves y Sarruge (2), quienes no encontraron relación entre estos nutrientes en la fuente (hoja) y en el vertedero (frutos). Según estos últimos, la respuesta de Ca y S puede relacionarse con su baja movilidad en la planta, no así la de Mg.

Durante los 8 meses de evaluación las concentraciones foliares más altas de Ca y Mg se observaron en Pueblo Bello (en promedio 2,02% y 0,33%, respectivamente) y las concentraciones más bajas de Ca y S en Naranjal (en promedio 0,81% y 0,12%, respectivamente). En el ámbito general, los valores detectados para Ca estarían en el rango catalogado como normal para

condiciones de Colombia y los de Mg medios (19), mientras que las concentraciones de S fueron bajas (15).

De acuerdo a los resultados obtenidos puede concluirse que:

- Las concentraciones de Ca, Mg y S en el fruto de café disminuyen durante los primeros 120 días después de la floración, para luego estabilizarse hasta el momento de la recolección, aproximadamente 240 días después.
- Durante todo el período de desarrollo del fruto de café Variedad Castillo® fueron mayores los contenidos de Ca con respecto al Mg, y los de Mg frente al S.



**Figura 6.** Concentración relativa de calcio, magnesio y azufre en las hojas de café en función de tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

- Los frutos de café acumulan, en promedio, el 14% de la cantidad total de Ca, Mg y S durante los primeros 60 días después de la floración, entre los 60 y 180 días el 65% y entre los 180 y 240 días el 21%.
- Las concentraciones foliares de Ca, Mg y S presentaron algunas variaciones a través del tiempo, en consecuencia de las lluvias y, en el caso de Mg, en respuesta a la fertilización, sin que pudieran relacionarse con el proceso del crecimiento y desarrollo de los frutos.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los ingenieros Juan Carlos García López, 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. CARRILLO P., I.F.; MEJÍA M., B.; FRANCO A., H.F. Manual de laboratorio para análisis foliares. Chinchiná : Cenicafé, 1994. 52 p.
2. 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.
3. HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 6a. ed. Nueva Jersey : Prentice Hall, 1999. 499 p.
4. LAVIOLAG.,B.; MARTÍNEZP.,H.E.; SALOMÃOC., L.C.; CRUZD.,C.; MENDONÇAM.,S. Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes de cultivo: Cálcio, magnésio e enxofre. Revista brasileira de ciência do solo 31:1451-1462. 2007.
5. LAVIOLA G., B.; MARTÍNEZ P., H.E.; SOUZA, R.B. DE; ÁLVAREZ V., V.H. Dinâmica de cálcio

e magnésio em folhas e frutos de *Coffea arabica*. Revista brasileira de ciencia de solo 31(2):319-329. 2007.

6. LAVIOLAG.,B.; MARTÍNEZP.,H.E.; SALOMÃOC., L.C.; CRUZD.,C.; MENDONÇAM.,S.; ROSADO, L. Acúmulo em frutos e variação na concentração foliar de NPK em cafeeiro cultivado em quatro altitudes. Bioscience 24(1):19-31. 2008.
7. MATIELLO, J.B.; SANTINATO, R.; GARCÍA, A.W.R.; ALMEIDA, S.R.; FERNANDES, D.R. Cultura de café no Brasil: Novo manual de recomendações. Rio de Janeiro : MAPA : PROCAFÉ, 2005. 438 p.
8. MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. Principios de nutrición vegetal. Basel : Internacional Potash institute, 2000. 692 p.
9. MORAES, F.R.P. DE; CATANI, R.A. Absorção de elementos minerais pelo fruto do cafeeiro durante sua formação. Bragantia 23(26):331-336. 1964.
10. RAMÍREZ, F.; BERTSCH, F.; MORA, L. Consumo de nutrientes 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.
11. RIAÑO H., N.M.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; CHAVES C., 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.
12. SADEGHIAN K., S. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. Chinchiná : Cenicafé, 2008. 43 p. (Boletín Técnico No. 32).
13. SADEGHIAN K., S.; HERNÁNDEZ G., E.; ROSS, M.; GUERRERO R., R. Fuentes solubles de magnesio y azufre en la producción y calidad del café. En: CONGRESO Colombiano de la ciencia del suelo. (13 : Octubre 4-6 2006 : Bogotá). Bogotá : SCCS, 2006. 7 p.
14. 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.
15. SADEGHIAN K., S.; GONZÁLEZ O., H. Respuesta del café a la fertilización con azufre y su relación con el azufre foliar. En: Congreso colombiano de la ciencia del suelo (15 : Octubre 27-29 2010 : Pereira). Pereira: SCCS, 2010. 5 p.

16. SALAZARG.,M.R.;CHAVESC.,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.
17. SOILIMPROVEMENTCOMMITTEECALIFORNIA PLANT HEALTH ASSOCIATION–SICCPHA. 2004. Manual de fertilizantes para cultivos de alto rendimiento. Noriega Editores. México. 366 p.
18. SOUZA, V.H. DA S.; 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.
19. VALENCIA A., G. Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto. Bogotá : Agroinsumos del café, 1999. 94 p.

# ARQUITECTURA DEL DOSEL E INTERCEPTACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR POR TRES ESPECIES FORESTALES NATIVAS EN COLOMBIA

Ángela María Castaño Marín\*; Héctor Alberto Chica Ramírez\*\*;  
Diego Obando Bonilla\*\*\*; Néstor Miguel Riaño Herrera\*\*\*\*

---

**CASTAÑO M., A. M.; CHICA R., H. A.; OBANDO B., D.; RIAÑO H., N. M. Arquitectura del dosel e interceptación de la radiación solar por tres especies forestales nativas en Colombia. Cenicafé 64 (1): 19-30. 2013**

Para *Cordia alliodora* (Ruiz. & Pav.), *Alnus acuminata* H.B.K y *Pachira quinata* (Jacq.), se determinó el coeficiente de extinción de la radiación a través del follaje ( $k$ ), utilizando el modelo de Beer y Lambert adaptado por Monsi y Saeki, el cual relaciona la cantidad de radiación solar interceptada con el índice de área foliar (*IAF*) acumulado a través del dosel. Las mediciones se realizaron desde el año 2003 hasta el 2010 en árboles de diferentes edades, en los estratos inferior, medio y superior de la copa. Los valores de  $k$  fueron 0,63, 0,60 y 0,84 para *C. alliodora*, *A. acuminata* y *P. quinata*, respectivamente. El *IAF* fue de 4,7, 1,9 y 4,6 para cada una de ellas. En las tres especies forestales se encontró que la relación entre la energía lumínica transmitida y la que está en la parte superior del dosel decrece exponencialmente a medida que se incrementa el valor de *IAF*. Además, todas tuvieron una arquitectura planófila. Se encontró que el ángulo de inserción foliar varía con la edad de la especie en tasas diferentes, según el estrato de la copa; sin embargo, los valores de incremento o decrecimiento del ángulo no alcanzan a producir cambios estructurales en el dosel a través del tiempo. La obtención de los parámetros  $k$  e *IAF* es fundamental para la estimación del valor de la asimilación de CO<sub>2</sub> en la planta completa, dentro del modelo de crecimiento para especies forestales en el trópico CREFT.

**Palabras clave:** Arquitectura foliar, coeficiente de extinción de radiación solar, índice de área foliar, *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata*, *Pachira quinata*.

---

## CANOPY ARCHITECTURE AND SOLAR RADIATION CAPTURING FOR THREE NATIVE TREE SPECIES IN COLOMBIA

The extinction coefficient of the radiation through the foliage ( $k$ ) was determined for *Cordia alliodora* (Ruiz. & Pav.), *Alnus acuminata* (HBK) and *Pachira quinata* (Jacq.) WS. Alverson, using the Beer and Lambert model adapted by Monteith, which relates the amount of sunlight intercepted and the leaf area index (LAI) accumulated through the canopy. Measurements were taken from 2003 to 2010 in trees of different ages and in lower, middle and top strata of the canopy. The  $k$  values were 0,63, 0,60 and 0,84 for *C. alliodora*, *A. acuminata* and *P. quinata* respectively. The LAI was 4,7, 1,9 and 4,6 for each. In the three forest species it was found that the ratio of transmitted light energy and the light energy at the top of the canopy decreases exponentially while increasing the LAI. Moreover, the three species had a planophyl architecture. It was also found that the insertion leaf angle varies with the age of the species at different rates depending on the canopy layer, however, the values of increase or decrease of the angle did not produce structural changes in the canopy over time. Obtaining the parameters  $k$  and LAI is essential for estimating the value of CO<sub>2</sub> assimilation in whole plants within the growth model for forest species in the tropics CREFT.

**Keywords:** Leaf architecture, light extinction coefficient, LAI, *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata*, *Pachira quinata*.

---

\*Ingeniera Agrónoma, estudiante de Doctorado en Ciencias Ambientales –Universidad del Cauca –Red Interinstitucional de Cambio Climático y Seguridad Alimentaria –RICCLISA

\*\*Ingeniero Agrónomo MSc., Biometrista del Servicio de Análisis Económico y Estadístico (SAEE) - Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicafé). Valle del Cauca, Colombia.

\*\*\*Ingeniero Forestal, Asociado de Investigación - Decision and Policy Analysis Program (DAPA) - Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Palmira, Colombia.

\*\*\*\*Investigador Científico III. Coordinador Programa de Investigación en Variabilidad Climática y Caficultura - Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

Los árboles funcionan como grandes sumideros de carbono en la Tierra; mediante el proceso fotosintético capturan y fijan  $\text{CO}_2$  del aire y lo utilizan para la producción de biomasa. La anterior es una de las razones por la cual los estudios acerca de la capacidad de asimilación de carbono por especies forestales cobran mayor importancia, más aún, cuando actualmente es imperante disminuir las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI) en el aire.

Por lo tanto, se necesita información básica sobre las características biofísicas de especies arbóreas y su interacción con el ambiente. El índice de área foliar (*IAF*) definido tradicionalmente como el área proyectada de la hoja por unidad área de suelo (2, 9), es un atributo estructural de los ecosistemas forestales que ha permitido realizar modelos e investigaciones en evapotranspiración, estimativos de producción forestal y capacidad de captura de carbono, entre otros (4).

La arquitectura del dosel es otro atributo biofísico de vital importancia en el intercambio gaseoso y proceso fotosintético de los árboles; la forma de la copa influye directamente en la interceptación de la radiación solar, en la temperatura de la planta, en la concentración de vapor de agua y  $\text{CO}_2$  en la cámara subestomática de las hojas, esto último es vital para la transpiración, el alargamiento celular, el crecimiento y la competencia entre especies (5, 21, 22).

La arquitectura del dosel está relacionada con la cantidad y distribución espacial de las ramas, hojas y frutos en la fronda. Dentro del dosel, la orientación del follaje depende de la distribución de los ángulos de inserción de las ramas y hojas, con respecto al eje horizontal del suelo

y con respecto a su posición azimutal (7, 19). De su distribución dependerá la transmisión, absorción y reflexión de la radiación solar, factor determinante del balance energético en la planta y, por lo tanto, de su actividad fotosintética y transpiratoria (11).

Las especies vegetales pueden clasificarse de acuerdo con los ángulos de inserción de sus hojas en (7):

- Planófilas: La mayor parte de los ángulos de inserción están entre  $0^\circ$  y  $30^\circ$  con respecto a la horizontal.
- Plagiófilas: La mayor parte de los ángulos de inserción están entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$  con respecto a la horizontal.
- Erectófilas: La mayor parte de los ángulos de inserción están entre  $60^\circ$  y  $90^\circ$  con respecto a la horizontal.

El instrumento más común para medir los ángulos de inserción en hojas es el compás prolongado, descrito por Norman y Campbell (19), el cual consta de una regla transportador, una brújula y una plomada.

Actualmente existen diferentes métodos para estimar el *IAF*, dentro de ellos la teledetección mediante sensores remotos ofrece la posibilidad de proporcionar estimaciones relativamente exactas de tales características estructurales (14). De igual manera, mediante el uso de equipos como el LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (LI-COR, Lincoln, NE), se estima el *IAF* a partir de mediciones de radiación solar interceptada, tomadas con el sensor óptico de  $148^\circ$  de campo de visión, por encima y por debajo del dosel, en cinco ángulos diferentes. Los datos son automáticamente guardados en la unidad de control, la que realiza todos los cálculos y

permite disponer de los resultados de *IAF in-situ* (1, 6, 18, 24).

En cuanto a la arquitectura del dosel, existen dos modelos que describen el comportamiento de la radiación solar a través del follaje en plantas individuales, en follajes densos (23) y en follajes discontinuos (12). Estos modelos se basan en la ley de Beer, modificada por Monsi y Saeki (16, 17), para su aplicación a nivel de planta la cual establece que la radiación solar que penetra en la parte aérea de la planta disminuye exponencialmente con el índice de área foliar acumulado. Esta ley se basa en que la transmisión de la radiación solar a través de un sistema, está en función de la absorción y reflexión de fotones con frecuencia y longitud de onda determinadas, y de la concentración de moléculas que interfieren el paso de la misma como se muestra en la Ecuación <1>.

$$I = I_0 e^{-k[\text{moléculas}]} \quad \text{Ecuación <1>}$$

Donde:

**I:** Energía luminosa transmitida a través de un espacio determinado.

**$I_0$ :** Energía luminosa que entra al sistema.

**k:** Tasa de absorción de la energía en un volumen determinado.

**[moléculas]:** Concentración de moléculas en el sistema.

Al hacer uso de esta ley en la transmisión de la energía a través del dosel de las especies vegetales, Monsi y Saeki (17) determinaron que la energía a través de la fronda, desde el tope hasta la base, se extingue exponencialmente en la medida que las capas de hojas se van acumulando, de esta forma se adaptó el modelo general a la Ecuación <2>:

$$I = I_0 e^{-kIAF} \quad \text{Ecuación <2>}$$

Donde:

**I:** Energía luminosa transmitida hasta una profundidad del dosel determinada.

**$I_0$ :** Energía luminosa en el tope del dosel.

**k:** Coeficiente de extinción de la radiación a través de la capa de hojas y hasta la profundidad del dosel determinada.

**IAF:** Índice de Área Foliar acumulado hasta la profundidad del dosel determinada.

El valor del coeficiente de extinción de la radiación solar (*k*) a través del dosel para una especie vegetal, depende directamente de su arquitectura y particularmente del área foliar. Lo anterior permite asociar el coeficiente de extinción con la arquitectura y el *IAF* de la especie, en un momento determinado, al realizar mediciones de la energía luminosa en el tope del dosel y en una profundidad determinada del mismo.

En el presente estudio, para las especies forestales *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata* y *Pachira quinata* se determinó la arquitectura del dosel y el valor del coeficiente de extinción de la radiación (*k*) a través del follaje.

Los valores hallados alimentaron y actualizaron la base de datos del modelo de crecimiento y captura de carbono para especies en el trópico CREFT V. 2.0. Este modelo mecanístico es una herramienta que permite simular el crecimiento y la captura de carbono de algunas especies forestales, en condiciones del Trópico, a partir de información climática (20) Este modelo incluye relaciones empíricas basadas en mediciones en el campo, de características como el *IAF*, *k*, distribución de biomasa e intercambio gaseoso, entre otros.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones para cada una de las especies estudiadas se realizaron en los sitios descritos en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Sitios de estudio.

Especie	Localidad	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (m)
<i>Cordia alliodora</i>	La Chinita	Manizales	05°03'N	75°35'W	2.150
<i>Alnus acuminata</i>	Sabinas	Manizales	05°02'N	75°25'W	2.485
<i>Pachira quinata</i>	Monterrey	Zambrano	09°43'N	74°51'W	20

Los rodales clasificados para el estudio tenían entre 2 y 4 años de edad, los árboles objeto de muestreo se seleccionaron de la siguiente manera:

Dentro del área de la plantación aleatoriamente se ubicó una estaca como centro de la parcela, a partir de ésta se midió un radio de 8,93 m para marcar los árboles incluidos en el área de 250 m<sup>2</sup>, se numeraron y luego se midió el diámetro normal a 1,3 m de altura ( $d_n$ ) equivalente al Diámetro a la Altura del Pecho (DAP).

Con el  $d_n$  se calculó el área basal por árbol ( $G_{xi}$ ) de acuerdo con la Ecuación <3>:

$$G_{xi} = \frac{\Pi d_n^2}{4} \quad \text{Ecuación <3>}$$

Luego, se determinó el área basal de la parcela ( $G$ ), mediante la sumatoria de las áreas basales individuales. (Ecuación <4>).

$$G = \sum_{i=1}^n G_{xi} \quad \text{Ecuación <4>}$$

El área basal de la parcela ( $G$ ) se dividió por el número de árboles dentro de la parcela, obteniendo el área basal promedio ( $G_x$ ) =  $G/n$ , donde  $n$  es el número de árboles por parcela.

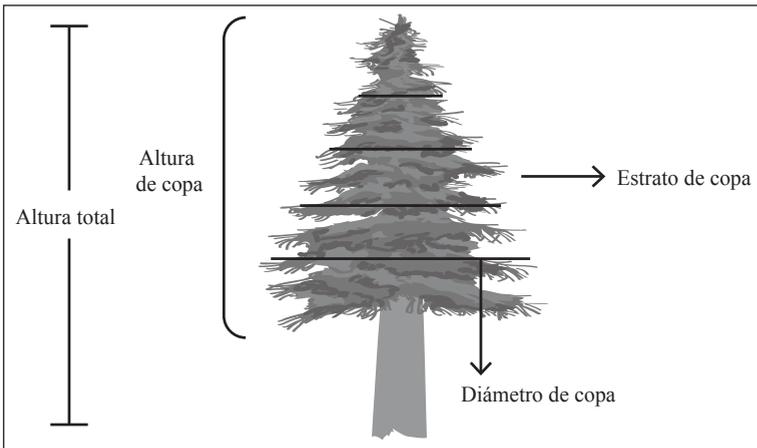
Se despejó  $d_n$ , obteniendo el diámetro normal promedio ( $d_{nx}$ ), también denominado diámetro cuadrático ( $d_{qx}$ ), y se seleccionaron tres árboles con los valores de  $d_n$  más

cercanos al  $d_{nx}$ , los cuales se utilizaron para la medición de las diferentes variables.

En cada árbol se determinó la altura total y la altura de copa. Posteriormente, la copa se dividió en cinco estratos iguales y en cada uno se midió el diámetro de copa en su base, como lo indica la Figura 1.

Por medio de una barra con un sistema integrado de 100 sensores cuánticos, Line Quantum sensor –LICOR, se midió la radiación fotosintéticamente activa (RFA) en el tope del dosel o radiación incidente (medición A), e inmediatamente se midió la radiación adentro del dosel bajando por cada uno de los estratos de la copa (medición B), la cual determina la radiación transmitida a través del dosel. Por cada medición B se realizó una medición A, con el fin de minimizar el error atribuido a las condiciones cambiantes de radiación.

Se determinaron los ángulos de inserción de las ramas y las hojas en cada una de las especies, para ello se seleccionaron 32 árboles de *C. alliodora*, 42 de *A. acuminata* y 64 de *P. quinata*, con edades de 2 a 14 años, 1 a 22 años y 6 a 24 años, respectivamente. En cada árbol se dividió la copa en tres estratos: superior, medio e inferior, y en cada uno se seleccionaron tres ramas aleatoriamente, en las cuales se midió el ángulo de inclinación, siguiendo la metodología de Campbell (19). De la misma manera, se seleccionaron 20 hojas por rama, a las cuales se les determinó el ángulo de inclinación. Las mediciones para esta variable se realizaron entre el año 2003 y el 2010.



**Figura 1.** Modelo de mediciones iniciales de la arquitectura del árbol representativo de la parcela.

Después de realizadas las mediciones de *RFA* se retiraron todas las hojas del árbol y se determinó el peso fresco por estrato, se tomó una muestra de 250 g, la cual se prensó para posteriormente transportar al laboratorio de Fisiología Vegetal de Cenicafé (Manizales, Caldas) y determinar el área foliar con el equipo Leaf Area Meter (*Delta T – Device, Inc.*). Esta muestra se secó en horno a 105°C, durante 24 hs o hasta obtener peso constante.

**Análisis de datos.** Se determinó el área foliar en cada estrato de la copa mediante la extrapolación del valor de área foliar obtenido de la muestra de 250 g de hojas y el peso total de las hojas del estrato.

El *IAF* se calculó como el cociente entre el área foliar obtenida por estrato y el diámetro basal de cada estrato de copa.

Para la determinación de *k*, se utilizó el modelo de Beer y Lambert adaptado por Monsi y Saeki (17). Con la aplicación Sigma Plot 10 se ajustó un modelo exponencial de un parámetro mediante una regresión no lineal, entre el cociente entre *I* e *I<sub>0</sub>* y el índice de área foliar acumulada para cada profundidad del dosel como lo muestra la Ecuación <5>.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-kIAF} \quad \text{Ecuación <5>}$$

Donde:

- I/I<sub>0</sub>***: Cociente entre la energía luminosa transmitida hasta una profundidad del dosel y la energía luminosa en el tope del dosel
- k***: Coeficiente de extinción de la radiación a través de la capa de hojas y hasta la profundidad del dosel determinada.
- IAF***: Índice de Área Foliar acumulado para cada estrato del dosel.

Para el análisis de la arquitectura, inicialmente se hizo un análisis de varianza para determinar el efecto de la edad y el estrato del árbol sobre el ángulo foliar (Proc glm, SAS 9.2). La edad se incluyó en el modelo como variable continua, mientras que el estrato se incluyó como variable de clasificación. También se analizó la interacción entre la edad y el estrato. Posteriormente se cualificaron los ángulos foliares en los tres intervalos usuales (0-30, 30-60 y 60-90) para determinar el porcentaje de hojas con ángulos en cada categoría y se procedió a la comparación de proporciones entre estratos y dentro de los estratos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

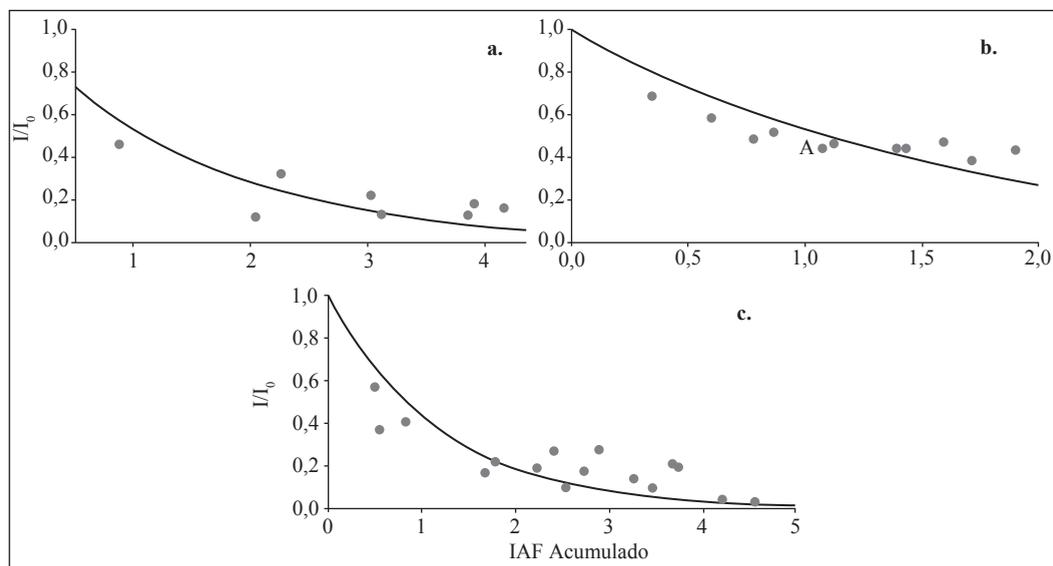
### Coefficiente de extinción de la radiación fotosintéticamente activa e IAF acumulado.

En la Tabla 2 se presentan los valores del coeficiente de extinción de la radiación solar para cada una de las especies evaluadas. En los tres casos, los resultados para esta variable indicaron un porcentaje de interceptación de la radiación mayor del 60%. Con respecto al área foliar, *A. acuminata* tiene un IAF cercano a dos, mientras que para las demás especies este valor es cercano a cinco (Figura 2). Así

mismo, en las tres especies se observó que la relación exponencial entre el cociente de la energía luminosa transmitida hasta una profundidad del dosel y la energía luminosa en el tope del dosel ( $I/I_0$ ), presentó coeficientes de determinación superiores al 80%.

**Tabla 2.** Valores del coeficiente de extinción de la radiación solar ( $k$ ).

Especie	$k$	$R^2$	p-valor
<i>C. alliodora</i>	0,6362	0,85	<0,001
<i>A. acuminata</i>	0,6031	0,97	<0,001
<i>P. quinata</i>	0,8413	0,80	<0,001



**Figura 2.** Modelo exponencial ajustado a la proporción de radiación solar interceptada por el dosel contra el IAF acumulado. a. *Cordia alliodora*; b. *Alnus acuminata*; c. *Pachira quinata*.

### Efecto de la edad sobre el ángulo de inserción foliar

***Cordia alliodora.*** El análisis de varianza mostró un efecto significativo al 1% de significancia de la edad ( $F=186,87$ ; p-valor < 0,0001) y del estrato de copa ( $F=6,42$ ; p-valor = 0,0017) sobre el ángulo de inserción foliar. La interacción edad, estrato y ángulo

fue significativa al 1% de error I ( $F=12,91$ ; p-valor < 0,0001). Esto significa que el ángulo foliar cambia a medida que se incrementa la edad del árbol y este cambio se da a diferentes tasas para cada estrato.

La significancia estadística de la interacción edad por estrato implica que la tasa de cambio del ángulo foliar

en el tiempo varía entre por lo menos dos estratos, lo que obliga a comparar estadísticamente las pendientes de las tres líneas de regresión resultantes.

Con ayuda de tres variables indicadoras (una por estrato) y el procedimiento nlin de SAS 9.2 se ajustó el siguiente modelo (Ecuación <6>):

$$anf = (A_1 + B_1 edad)I_1 + (A_2 + B_2 edad)I_2 + (A_3 + B_3 edad)I_3 \quad \text{Ecuación <5>}$$

Donde  $A$  y  $B$  son respectivamente el intercepto al origen y la pendiente de la línea recta que asocia el ángulo foliar ( $anf$ ) con la edad. El subíndice hace referencia al estrato de la copa (1-Inferior, 2-Medio, 3-Superior). La variable  $I_k$  ( $k=1,2,3$ ) es una variable indicadora que toma el valor 1 cuando el estrato corresponde al subíndice y toma el valor cero en los demás casos. La ventaja de este análisis está en el hecho de poder comparar las tasas de cambio ( $B_k$ ) entre los diferentes estratos con un mismo término de error.

En la Tabla 3 y la Figura 3 se observan los resultados de la Ecuación <6>. En los estratos inferior y medio el ángulo foliar se incrementó en promedio en 1,25 grados por año, mientras que en el estrato superior el incremento anual fue de apenas 0,5 grados, aproximadamente.

Estadísticamente, mediante la prueba de Duncan al 99% de confiabilidad, se encontró que el ángulo foliar promedio en el estrato inferior es 4 grados mayor que el del estrato medio y 6 grados mayor que el estrato superior (Tabla 4).

***Alnus acuminata.*** El análisis de varianza mostró un efecto significativo al 1% de significancia de la edad ( $F= 13,91$  p-valor = 0,0002) sobre el ángulo de inserción foliar, sin tener en cuenta el estrato de la copa ( $F=0,41$  p-valor = 0,6630). La interacción edad, estrato y ángulo foliar fue significativa al 1% de error I ( $F=3,86$  p-valor = 0,0212), lo cual significa que a medida que se incrementa la edad del árbol el ángulo foliar varía en cada estrato, en tasas diferentes.

La significancia estadística de la interacción edad por estrato implica que la tasa de cambio del ángulo foliar a través del tiempo varía entre por lo menos dos estratos, lo que obliga a comparar estadísticamente las pendientes de las tres líneas de regresión resultantes del modelo de la Ecuación <6>.

En la Tabla 5 se observan los resultados de las comparaciones para cada estrato de copa, de las regresiones lineales entre el ángulo foliar y la edad. En los estratos inferior, medio y superior, el ángulo foliar decrece respectivamente 0,1, 0,2 y 0,1 grados anualmente.

**Tabla 3.** Estimaciones del modelo  $anf=A+B*edad$  para cada uno de los estratos de la copa en árboles de *Cordia alliodora*.

Parámetro	Estimado	ES	LI 99%	LS 99%	Grupos
A1	34,4028	0,8653	32,1727	36,6328	
A2	30,1359	0,8697	27,8944	32,3774	
A3	33,1967	0,8721	30,9491	35,4443	
B1	1,1965	0,1269	0,8696	1,5234	a
B2	1,3276	0,1269	1,0005	1,6546	a
B3	0,4804	0,1269	0,1532	0,8075	b

Letra diferente significa que existe diferencia estadística al 99% entre las pendientes de los estratos.

**Tabla 4.** Separación de Duncan al 99% entre estratos del ángulo foliar medio.

Especie	Estrato	Promedio	Grupos
<i>C. alliodora</i>	Inferior	41,8667	a
	Medio	38,4364	b
	Superior	36,2037	c
<i>A. acuminata</i>	Inferior	39,6084	a
	Medio	37,7910	a
	Superior	38,4822	a
<i>P. quinata</i>	Inferior	38,3591	a
	Medio	39,8009	a
	Superior	39,5206	a

Letras diferentes indican diferencias entre los estratos.

Esta disminución en el ángulo foliar no alcanza a generar cambios estructurales en la copa del árbol a medida que se incrementa su edad y aunque tiene una tendencia a volverse planófilo, ésta no alcanza a realizar modificaciones importantes. Por ejemplo, un árbol cuya edad es 10 años, su ángulo foliar promedio es 38,0° y su turno de aprovechamiento son 40 años, al final de este tiempo el ángulo foliar promedio habrá disminuido tan solo 4,5°; es decir, habrá pasado de 38,0° a 33,5° estando igualmente dentro de una arquitectura plagiófila.

Estadísticamente, mediante la prueba de Duncan al 99% de confiabilidad, se encontró que para *A. acuminata* no existen diferencias entre los ángulos foliares promedio de los tres estratos de copa (Tabla 4).

***Pachira quinata.*** El análisis de varianza mostró un efecto significativo al 1% de significancia de la edad ( $F=108,94$  p-valor  $< 0,0001$ ) y del estrato de copa ( $F=7,88$  p-valor  $= 0,0004$ ) sobre el ángulo de inserción foliar. La interacción edad, estrato y ángulo fue significativa al 1% de error I ( $F=5,7$  p-valor  $= 0,0034$ ), lo que significa que el ángulo foliar cambia con el tiempo a diferentes tasas dependiendo del estrato.

En la Tabla 5 se muestran las estimaciones del modelo de la Ecuación <6>. En los estratos inferior, medio y superior el ángulo foliar decrece anualmente 0,2, 0,5 y 0,6 grados, respectivamente. De la misma manera que en la especie anterior, el cambio en la arquitectura para *P. quinata* no es importante el promedio por árbol de la tasa de disminución anual, la cual no alcanza a llegar a 0,5.

Estadísticamente, mediante la prueba de Duncan al 99% de confiabilidad, se encontró que para *P. quinata* no existen diferencias entre los ángulos foliares promedio de los tres estratos (Tabla 4).

**Arquitectura del dosel.** La Figura 4 muestra para cada una de las especies forestales, el resultado del análisis de frecuencia con el cual se distribuyeron los tres tipos de ángulos foliares en cada estrato de la copa.

**Tabla 5.** Estimaciones del modelo  $anf=A+B*edad$  para cada uno de los estratos de la copa en árboles de *Alnus acuminata*.

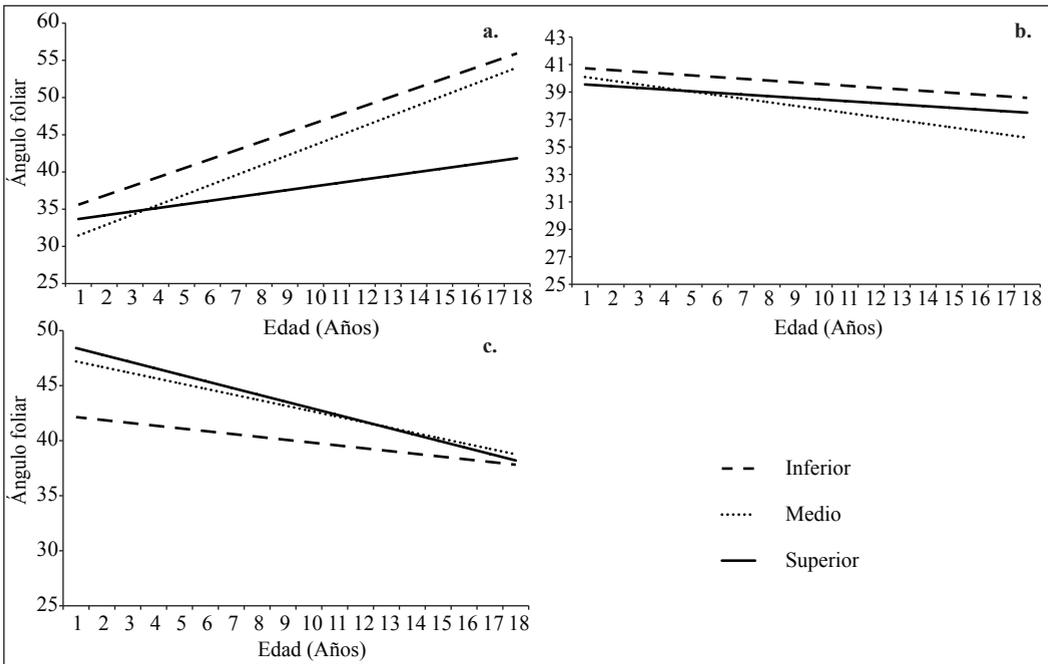
Parámetro	Estimado	ES	LI 99%	LS 99%	Grupos
A1	40,8560	0,9287	38,4630	43,2490	
A2	40,3529	0,9278	37,9624	42,7435	
A3	39,6702	0,9280	37,2790	42,0614	
B1	-0,1266	0,0785	-0,3289	0,0758	a
B2	-0,2599	0,0784	-0,4620	-0,0577	a
B3	-0,1206	0,0785	-0,3229	0,0817	a

Letras diferentes significan diferencia estadística al 99% entre las pendientes de los estratos.

**Tabla 6.** Estimaciones del modelo  $anf=A+B*edad$  para cada uno de los estratos de la copa en árboles de *Pachira quinata*.

Parámetro	Estimado	ES	LI 99%	LS 99%	Grupos
A1	42,3962	1,2479	39,181	45,6114	
A2	47,6958	1,272	44,4187	50,9729	
A3	49,0161	1,2437	45,8119	52,2203	
B1	-0,2545	0,0744	-0,4463	-0,0627	a
B2	-0,4963	0,0756	-0,6911	-0,3015	a
B3	-0,6009	0,0743	-0,7923	-0,4096	a

Letras diferentes significan diferencia estadística al 99% entre las pendientes de los estratos.



**Figura 3.** Estimaciones del modelo  $af=A+B*edad$  para cada uno de los estratos de la copa en **a.** *Cordia alliodora*; **b.** *Alnus acuminata*; **c.** *Pachira quinata*.

Las tres especies mostraron la misma tendencia de la copa, con un mayor porcentaje en todos los estratos el tipo planófilo, seguido por el plagiófilo y en menor proporción el erectófilo.

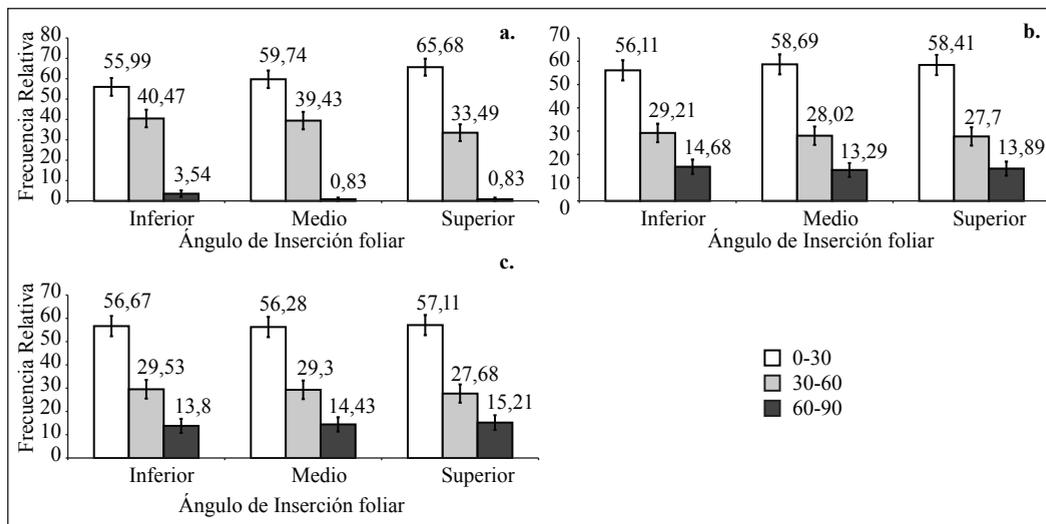
*C. alliodora* presentó una arquitectura planófila en el estrato superior, medio e inferior, seguida por la arquitectura plagiófila en estos mismos estratos. En esta especie

casi no se encontraron hojas con ángulos de inserción a la rama mayores a 60° (en promedio, para todo el árbol 1,73 de frecuencia relativa para el erectófilo). *A. acuminata* y *P. quinata* mostraron una arquitectura muy similar entre ellas, además hubo similitud entre estratos intra-especie, cada estrato se caracterizó por tener una arquitectura predominantemente planófila seguida por plagiófila y erectófila.

En general, las tres especies descritas en este estudio mostraron arquitectura planófila, predominando en toda la planta ángulos de inserción de la hoja en la rama menores que 30°. Este tipo de arquitectura permite que más área foliar esté expuesta a la radiación solar, principalmente las hojas de los estratos superiores. Otros trabajos mencionan que en un dosel planófilo las hojas superiores están saturadas y las inferiores tienen reducida su fotosíntesis debido al autosombreamiento (10). Por otra parte, Falster y Westoby (8) en Australia, al analizar 38 árboles de diferentes especies forestales, determinaron la influencia del tipo de ángulo foliar en la interceptación de la radiación solar y en la fotosíntesis, ellos concluyeron que especies con arquitectura planófila tenían una mayor interceptación de radiación solar y potencialmente una mayor ganancia de carbono, también observaron que hojas con ángulo de inserción erectófilo incrementan la captura de radiación solar cuando el sol está en ángulos bajos en el cielo (amanecer y atardecer), mientras que

la reducen a partir de ángulos solares altos (medio día) (8). En las tres especies de este estudio, las hojas con ángulos mayores a 60° son determinantes en la regulación de la temperatura dentro del mismo, se ha demostrado que las hojas erectófilas reducen las cargas de calor, incrementando la eficiencia en el uso de agua y reduciendo el riesgo de sobrecalentamiento, por lo tanto disminuyen la fotosensibilidad (15).

Jones (13) argumenta que la distribución de las hojas en la copa ha evolucionado para maximizar la ganancia de carbono diario a niveles de radiación solar saturante, ya que en una curva estándar de respuesta fotosintética a la radiación solar se demostró que este tipo de hojas se saturan en ciertas intensidades lumínicas en las cuales las erectófilas no se alcanzan a saturar. En consecuencia, las especies con hojas erectófilas puede ser capaces de mantener altos niveles de fotosíntesis durante los períodos de alta radiación, a pesar de interceptar mucho menos radiación solar que las planófilas.



**Figura 4.** Distribución relativa de las frecuencias de ángulos de inclinación de hojas en cada uno de los estratos de copa (inferior, medio y superior) de a. *Cordia alliodora*; b. *Alnus acuminata*; c. *Pachira quinata*.

Un dosel planófilo sería más eficiente si la radiación estuviera distribuida uniformemente sobre la superficie foliar. Una distribución equitativa podría lograrse si sólo las hojas superiores tuvieran una inclinación vertical y se hicieran más planófilas en los estratos inferiores, de tal manera que la radiación solar alcance las hojas bajas.

Puede concluirse que:

- Los valores del coeficiente de extinción de la radiación a través del dosel para las especies *C. alliodora*, *A. acuminata* y *P. quinata* fueron de 0,63; 0,6 y 0,84, respectivamente, lo cual indica que no hay limitaciones importantes por efecto de la arquitectura propia de la copa de los árboles para la absorción de la radiación solar.
- En las tres especies estudiadas los ángulos de inserción de las hojas tuvieron una distribución similar en cada estrato: planófilos seguidos por plagiófilos, a pesar de esto más del 60% y hasta un 84% de la radiación fotosintéticamente activa disponible es interceptada por el estrato inferior del dosel.
- El análisis de varianza indicó que para las especies del estudio hay efecto de la edad y del estrato de la copa sobre el ángulo foliar; a medida que se incrementa la edad de los árboles las tasas de cambio de inclinación foliar varían por estrato.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, la cofinanciación del proyecto Ajuste, validación y ampliación del modelo de crecimiento y captura de carbono para especies en el trópico – CREFT, contrato 028-2007K5702-359-07.

Al Centro Nacional de Investigaciones del Café, Cenicafé, a Smurfit Kappa-Cartón de Colombia, Pizano S.A y su reforestadora Monterrey Forestal, reforestadora el Guásimo, Reforestadora del Caribe, Reforestadora de la Costa, Fundación Ecológica Cafetera y Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por toda la colaboración, apoyo y en la toma de la información.

### LITERATURA CITADA

1. ARIAS, D.; CALVO, J.; DOHRENBUSCH, A. Calibration for LAI-2000 to estimate leaf index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. *Forest ecology and management* 247:185-193. 2007.
2. ASNER, G.P.; SCURLOCK, J.M.O.; HICKE, J.A. Global synthesis of leaf area index observations: Implications for ecological and remote sensing studies. *Global ecology and biogeography* 12(3):191-205. 2003.
3. BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; BAUERLE, W.L.; RYAN, M.G. Explaining growth of individual trees: Light interception and efficiency of light use by Eucalyptus at four sites in Brazil. *Forest ecology and management* 259(9):1704-1713. 2010.
4. BOLSTAD, P.V.; GOWER, S.T. Estimation of leaf area index in fourteen southern Wisconsin forest stands using a portable radiometer. *Tree physiology* 7:115-124. 1990.
5. BREUER, L.; ECKHARDT, K.; FREDE, H.G. Plant parameter values for models in temperate climates. Giessen : Institute for landscape ecology and resources management : Justus Liebig university Giessen, 2003.
6. DEBLONDE, G.; PENNER, M.; ROYE, A. Measuring leaf area index with the Li-Cor LAI-2000 in Pine stands: *Ecology* 75(5):1507-1511. 1994.
7. WIT, C.T. DE. Photosynthesis of leaf canopies. Wageningen: PUDOC, 1965. 57 p.
8. FALTERS, D.S.; WESTOBY, M. Leaf size and angle vary widely across species: What consequences for light interception? *New phytologist* 158:509-525. 2003.

9. FOURNIER, R.A.; MAILLY, D.; WALTER, J.M.; SOUDANI, K. Indirect measurement of forest canopy structure from in situ optical sensor. p. 77-114. En: WULDER, M.; FRANKLIN, S. *Methods for remote sensing of forests: Concepts and case studies*. Dordrecht : Kluwer academic press, 2003.
10. GARDNER, F.P.; PEARCE, R.; MITCHEL, R.L. Carbon fixation by crop canopies. p. 31-57. En: *Physiology of crop plants*. Iowa : Iowa state university, 1985.
11. GIRARDIN, P.; TOLLENAAR, M. Effects of interference on maize leaf azimuth. *Crop science society of America* 34(1):151-155. 1994.
12. JACKSON, J.E.; PALMER, J.W. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. *Annals of botany*. 44:381-388. 1979.
13. JONES, H.G. *Plants and microclimate*. Cambridge : Cambridge university press, 1992. 428 p.
14. KALÁCSKA, M.; SÁNCHEZ A., G.A.; RIVARD, B.; CALVO A., J.C.; JOURNET, A.R.P.; ARROYO M., J.P.; ORTIZ O., D. Leaf area index measurements in a tropical moist forest: A case study from Costa Rica. *Remote sensing of environment* 91: 134-152. 2004.
15. KING, D.A. The functional significance of leaf angle in *Eucalyptus*. *Australian journal of botany* 45(4):619-639. 1997.
16. LAMBERS, H.; CHAPIN, F.S.; PONS, T.L. *Plant physiological ecology*. New York : Springer, 1998. 540 p.
17. MONSI, M.; SAEKI, T. *Über der lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion*. *Japanese botany* 14:22-52. 1953.
18. NACKAERTS, K.; COPPIN, P.; MUYS, B.; HERMY, M. Sampling methodology for LAI measurements with LAI-2000 in small forest stands. *Agricultural and forest meteorology* 101(4):247-250. 2000.
19. NORMAN, J.M.; CAMPBELL, G.S. Canopy structure. p. 301-325. En: PEARCY, R.W. *Plant physiological ecology: Field methods and instrumentation*. London : Chapman and Hall, 1989. 457 p.
20. RIAÑO, N.; TANGARIFE, G.; OSORIO, O.; GIRALDO, J.; OSPINA, C.; OBANDO, D.; GÓMEZ, L.; JARAMILLO, L. Modelo de crecimiento y captura de carbono para especies forestales en el trópico: CREFT V1.0. Chinchiná : MADR : FNC : Cenicafé : CONIF, 2005. 37 p.
21. ROSS, J. *The radiation regime and architecture of plant stands*. The Hague : Junk publishers, 1981. 391 p.
22. RUSSELL, G.; JARVIS, P.G.; MONTEITH, J.L. Absorption of radiation by canopies and stand growth. En: RUSSELL, G.; MARSHAL, B.; JARVIS, P.G. *Plant canopies: Their growth, form and function*. Cambridge : Cambridge university press, 1989.
23. SAEKI, T. Light relation in plant communities. p. 79-94. En: EVANS, L. *Environmental control of plant growth*. New York : Academy press, 1993. 449 p.
24. WELLES, J.M. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote sensing reviews* 5:31-43. 1990.

# ASPECTOS DEL CICLO DE VIDA DE *Puto barberi* Cockerell (HEMIPTERA: PUTOIDAE)

Clemencia Villegas García\*; Héctor Darío Peña M\*\*; Raúl Isaías Muñoz H\*\*\*;  
Harol Enrique Martínez C\*\*\*\*; Pablo Benavides Machado\*\*\*\*\*

---

VILLEGAS G., C.; PEÑA M., H. D.; MUÑOZ H., R. I.; MARTÍNEZ C., H. E.; BENAVIDES M., P. Aspectos del ciclo de vida de *Puto barberi* Cockerell (Hemiptera: Putoidae). *Revista Cenicafé* 64(1): 31-41. 2013

La cochinilla *Puto barberi* (Cockerell, 1895) es la principal plaga de las raíces del café en Colombia. Con el fin de conocer los aspectos básicos de la biología de este insecto se determinó su ciclo de vida en el laboratorio en Cenicafé (Manizales, Colombia), a una temperatura promedio de 25°C y 70% de humedad relativa. Se conformaron 100 unidades de seguimiento en cajas Petri, cada una con cuatro ninfas de *P. barberi* y trozos de raíz de la planta arvense *Talinum paniculatum* (Jacquin) Gaertner (Magnoliopsida: Talinaceae). Diariamente se realizaron observaciones hasta la obtención de al menos un adulto por unidad, de los cuales se describieron y midieron los estados de vida. *Puto barberi* es una especie ovovivípara y partenogenética del tipo telitokia; el promedio de la longevidad de las hembras, después de iniciar posturas, fue de  $29,96 \pm 2,64$  días. El período de predeposición fue de  $42,2 \pm 2,74$  días, se presentaron dos estados ninfales de  $17,8 \pm 0,17$  y  $24,4 \pm 0,77$  días. La duración desde ninfa I hasta adultos iniciando posturas fue de  $141 \pm 0,99$  días. El número de ninfas por hembra estuvo entre 16 y 86, con procesos de muda de hasta 100 minutos. Estos son los primeros aspectos de la biología, ciclo de vida, morfología y etología de *P. barberi*, para lo cual se presentan las medidas y descripción de la morfología externa de cada estado de vida.

**Palabras clave:** Cochinilla gigante, plagas de las raíces del café, Neotrópico, *Coffea*.

---

## SOME ASPECTS OF THE LIFE CYCLE OF *Puto barberi* Cockerell (HEMIPTERA: PUTOIDAE)

The mealybug *Puto barberi*, is the main insect pest of coffee roots in Colombia. With the objective of understanding the basic aspects of the biology of this insect, the life cycle in lab conditions at Cenicafe, Colombia, was determined under an average temperature of 25 °C and a relative humidity of 70 %. One hundred experimental units were set in Petri dishes containing each four nymphs of *P. barberi* plus root pieces of the weed *Talinum paniculatum* (Jacquin) Gaertner (Magnoliopsida: Talinaceae). Daily observations were performed until the appearance of at least one adult per experimental unit and then the life stages were measured and described. *Puto barberi* is an ovoviviparous species revealing thelytoky type parthenogenesis; female average longevity, after egg laying, last  $29,96 \pm 2,64$  days. Pre-deposition period last  $42,2 \pm 2,74$  days, exposing two nymph stages of  $17,8 \pm 0,17$  and  $24,4 \pm 0,77$  days. The duration from nymph I to adult initiating egg laying last  $141 \pm 0,99$  days. The number of nymphs per female was set between 16 and 86, with ecdysis lasting up to 100 minutes. These are the first aspects of the biology, life cycle, morphology and ethology of *P. barberi*, so on we present measurements and external morphological descriptions of each life stages.

**Keywords:** Mealybugs, coffee root pests, Neotropical, *Coffea*.

---

\* Investigador Científico II. Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia

\*\* Estudiante de Pregrado Universidad Nacional de Agricultura, Catacamas, Olancho, Honduras.

\*\*\* I.A. M.Sc. Decano Universidad Nacional de Agricultura, Catacamas, Olancho- Honduras

\*\*\*\* I.A. M.Sc. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

\*\*\*\*\* Investigador Científico III. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia

En Colombia las principales cochinillas que se encuentran asociadas a las raíces del café son: *Puto barberi* (Cockerell), *Dysmicoccus brevipes* (Cockerell), *D. neobrevipes* Beardsley, *D. texensis* (Tinsley), *Neochavesia caldasiae* (Balachowsky) y *Pseudococcus jackbeardsleyi* Gimpel & Miller (12, 13). Diagnósticos posteriores realizados en siete departamentos cafeteros en Colombia mostraron que *P. barberi* es la especie que predomina en Colombia, la cual se encontró en el 86% de plantas muestreadas en más de 200 fincas (14).

El ciclo biológico de *P. barberi* no se conoce. La literatura reporta investigaciones con otros insectos de la familia Pseudococcidae. Chávez (4) determinó el ciclo de vida de *Dysmicoccus brevipes* en 78,2 y 54,3 días en dos condiciones: temperaturas de 21,8 y 28,9°C con humedades relativas de 80% y 75%, respectivamente. Estos promedios coincidieron con los obtenidos en Hawaii por Mau y Martin (7), quienes registraron de 31 a 80 días, con un promedio de 56 días. Asplanato y García (1) estudiaron el ciclo biológico de la cochinilla *Aonidiella aurantii* Maskell (Hemiptera: Diaspididae) en diferentes parcelas en el campo, donde determinaron que la duración del desarrollo del macho es aproximadamente del 60% de la duración del ciclo de la hembra, hasta el comienzo de la reproducción. Kondo (6) estudió el ciclo biológico de la cochinilla rosada *Maconellicoccus hirsutus* Green (Hemiptera: Pseudococcidae) determinando que este insecto en condiciones adecuadas de clima puede presentar hasta 15 generaciones por año; sin embargo, en circunstancias de clima adverso puede haber incidencia estacional de la plaga.

*Puto barberi* tiene la siguiente clasificación taxonómica y sinonimia (5):

Phylum: Arthropoda  
Subphylum: Mandibulata

Clase: Insecta  
Subclase: Pterigota  
Orden: Hemiptera  
Sub Orden: Sternorrhyncha  
Superfamilia: Coccoidea  
Familia: Putoidae  
Género: *Puto*  
Especie *P. barberi*

### Nomenclatura

*Phenacoccus yuccae barberi* Cockerell, 1895  
*Ceroputo barberi* Cockerell, 1901  
*Phenacoccus trinidadensis* Laing, 1925  
*Puto barberi* Ferris, 1950

*Puto barberi* (Cockerell, 1895) es una especie polífaga, común en el neotrópico (2). En Colombia se encuentra tanto en raíces y hojas de *Coffea arabica* y en frutos de *Citrus sinensis* (L.) Osbeck (10). La hembra adulta puede medir hasta 10 mm de largo y 3 mm de amplitud. Las especies de este género se caracterizan por tener un cuerpo ovalado y recubierto por una capa cerosa y gruesa, la cual se encuentra constituida por ácidos grasos; tiene antenas usualmente con nueve segmentos; 18 pares de cerarios con 6 a 20 setas grandes sobre una placa esclerotizada; uña tarsal con denticulo; setas dorsales lanceoladas, usualmente con los collares esclerotizados, en ocasiones en grupos; trocánteres con tres a cuatro poros sensoriales por cada superficie; con frecuencia presenta un círculo situado en el segmento abdominal III; poros triloculares en espiral más grandes que los que presentan las especies de los géneros de la familia Pseudococcidae (15).

Actualmente se registran más de 50 especies pertenecientes al género *Puto*. Las siguientes especies están representadas en el neotrópico: *Puto antioquensis* (Murillo), especie descrita en *Coffea arabica* (Rubiacea)

en Antioquia, Colombia (11), con distribución restringida al país de su descripción. *Puto barberi* (Cockerell) fue descrita en Antigua, Guatemala, sobre *Allamanda* sp., *Thunbergia grandiflora* Roxb., *Coleus* sp. y *Croton* sp., posee una extensa lista de especies botánicas hospedantes pertenecientes a las familias Apocynaceae, Araliaceae, Asteraceae, Bromeliaceae, Berberidaceae, Caprifoliaceae, Caryophyllaceae, Euphorbiaceae, Fabaceae, Geraniaceae, Labiatae, Lauraceae, Lomariopsidaceae, Lythraceae, Malvaceae, Nyctaginaceae, Oleaceae, Polygonaceae, Rosaceae, Rubiaceae, Rutaceae, Solanaceae, Sterculiaceae, Tamaricaceae, Thunbergiaceae, Umbelliferae y Verbenaceae, con distribución neotropical, incluyendo varios países como Antigua y Barbados, Bahamas, Colombia y República Dominicana, entre otros (8). *Puto lamottei* Matile-Ferrero, proviene de Mérida y está registrada exclusivamente para Venezuela, se alimenta en *Espeletia timotensis* Cuatrec (Asteraceae) como único hospedante (Gallego y Vélez 1992, citado por Ramos y Serna (9)). *Puto mexicanus* (Cockerell) registrado de la ciudad de México en un hospedante sin identificar, infesta especies de más de diez familias botánicas incluidas el *Agave* sp., café y cítricos; tiene una distribución neártica (México) y neotropical (El Salvador y Guatemala) (11). *Puto paramoensis* Matile-Ferrero, descrita de Mérida, Venezuela, en *Espeletia timotensis* (Asteraceae), como único hospedante, su distribución es neotropical, reportándose únicamente en Costa Rica y Venezuela. *Puto usingeri* McKenzie, descrito en Cuzco, Perú, encontrado sobre una roca; solamente se ha registrado en ese país. Esta especie ha sido recolectada en pocas ocasiones sobre piedras, pero nunca ha sido encontrada en plantas hospedantes (11). *Puto yuccae* (Coquillett) tiene diez sinónimos y es conocida como la cochinilla grande de la yuca; se encuentra

principalmente en los tallos y el follaje de las plantas hospedantes, aunque se asocian en ocasiones a las raíces (Gallego y Vélez 1992, citados por Ramos y Serna (9)).

El género *Puto* está representado en Colombia por las especies *P. antioquensis* (Murillo) y *P. barberi* (Cockerell) en *Coffea* sp., *Cuphea racemosa* (L.f.) Spreng, *Daucus carota* L., *Dianthus* sp., *Fragaria* sp., *Geranium* sp., *Manihot* sp., *Mikania micrantha* Kunth, *Physalis nicandroides* Schldtl y un hospedante desconocido y *P. yuccae* (Coquillett) con hábitos polípagos (Gallego y Vélez 1992, citados por Ramos y Serna (9) (6, 15).

*Puto barberi* ha sido registrado en las Bahamas y en Colombia sobre *Coffea arabica*, *Cuphea racemosa*, *Daucus carota*, *Dianthus* sp., *Fragaria* sp., *Geranium* sp., *Manihot* sp., *Mikania micrantha* y *Physalis nicondroi*; en República Dominicana se registró sobre diferentes hospedantes, en Granada sobre *Acalypha* sp., *Cajanus* sp., *Citrus nobilis* var. Major Ker Gawler, en Jamaica sobre *Elaphoglossum latifolium* (Sw.) J. Sm, en Montserrat sobre *Acalypha* sp., *Citrus* sp., *C. aurantifolia* (Christm), *Geranium* sp., en Puerto Rico sobre *Geranium* sp., Oleaceae, en Saint Kitts sobre *Acalypha* sp., *Bougainvillea* sp., en Santa Lucía sobre diferentes hospedantes, en Trinidad y Tobago en *Acalypha* sp., *Bougainvillea glabra* Choisy, Bromeliaceae, *Citrus* sp., *Coccoloba uvifera* (L.), *Gliricidia* sp., *Hibiscus* sp., *Lantana camara* L., *Lonicera japonica* Thunb, *Persea americana* Mill, *Theobroma cacao* L., en Venezuela sobre *Acalypha wilkesiana* Müll. Arg., *Citrus maxima* (Burm. f.) Merr, *Coffea* sp., *Croton* sp. y en las Islas Vírgenes sobre diferentes hospedantes. También se ha reportado en los puertos de Estados Unidos y México en embarcaciones provenientes de Islas Vírgenes, Bahamas, Colombia, Costa Rica, Guatemala, Honduras, República Dominicana, Puerto Rico, Trinidad y Tobago y Venezuela (15).

En Colombia *P. barberi* se ha registrado en el cultivo del café, en los departamentos de Caldas, Cauca, Quindío, Risaralda, Antioquia, Santander, Norte de Santander y Tolima (14).

El objetivo de esta investigación fue describir algunos aspectos de la biología de *P. barberi* tales como los estados de vida, su duración y descripción de la morfología externa, así como su capacidad reproductiva, en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de cría de insectos de la disciplina de Entomología, del Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé, ubicado en el municipio de Manizales (Caldas, Colombia), a una temperatura de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  y  $70 \pm 10\%$  de humedad relativa.

Con la finalidad de asegurar la identidad de la especie *P. barberi*, se prepararon, montaron e identificaron seis hembras adultas obtenidas en el sector de La Granja de Cenicafé. Éstas fueron conservadas en alcohol al 75% durante 24 h, se les realizó una perforación dorsal y se dispusieron en un frasco de vidrio, el cual se calentó posteriormente en un baño maría, por un tiempo de 10 a 15 min. Para eliminar los ácidos grasos del contenido corporal se les agregó agua con detergente. Para darle coloración e identificar las estructuras del insecto, las muestras se sumergieron por 40 a 60 min en colorante fucsina ácida, y luego, se pasaron por alcohol durante 10 min, con el fin de bajar la densidad de la coloración. Los especímenes fueron colocados en porta objetos con una gota de bálsamo de Canadá y se depositaron en el Museo Entomológico Marcial Benavides de Cenicafé, con su respectiva codificación. La especie

fue determinada mediante observación al estereoscopio utilizando como referencia las claves del manual de Williams y Granara de Willink (15).

Para proveer los individuos necesarios para adelantar esta investigación, se instaló un pie de cría de *P. barberi* cuya población inicial provino de un vivero de café ubicado en La Granja de Cenicafé, del cual se recolectaron hembras adultas ovíplenas, próximas a depositar ninfas, las cuales presentaban cuerpo globoso y abultado. Éstas se dispusieron en recipientes plásticos de 5 cm de diámetro y 7 cm de altura con tapa perforada, de los cuales se seleccionaron 120 individuos (Figura 1a) que no habían iniciado reproducción. Cada insecto se depositó individualmente en cajas Petri de 5,5 cm de diámetro, con círculos de cartulina negra en su base, con el fin de semejar condiciones de oscuridad y mejorar las observaciones, y con un trozo de raíz de la arvense *Talinum paniculatum*, de 2 x 1 cm. Estas cajas se taparon y ubicaron en bandejas plásticas en un estante, en un cuarto climatizado a  $25^\circ\text{C}$  y 70% de humedad, con 12 h luz y 12 h de oscuridad. Se realizaron observaciones cada 2 h durante el día, para determinar el momento del inicio de la deposición de las ninfas. La alimentación de los insectos con *T. paniculatum* (Jacquin) Gaertner, se evaluó preliminarmente en ensayos de laboratorio (datos no mostrados).

**Duración de los estados del ciclo de vida de *Puto barberi*.** Una vez las hembras ovíplenas comenzaron a depositar ninfas de *P. barberi*, se conformaron 100 unidades de observación, cada de una de las cuales estuvo constituida por una caja Petri con cartulina negra pegada con cera de abejas en la base, un trozo de *T. paniculatum* de 2 x 1 cm, y cuatro ninfas recién emergidas



**Figura 1.** a. Hembra adulta ovíplena de *P. barberi*; b. Hembra liberando sus ninfas del aparato genital; c. Ninfa I de *P. barberi*.

(Figuras 1b y 1c). Finalmente, las cajas se ubicaron bajo oscuridad, en un estante metálico tapado con plástico negro. Se realizaron observaciones al estereoscopio cada 4 h, para registrar cambios en el comportamiento, hábitos y morfología.

Se evaluó el tiempo transcurrido entre las ninfas I y II, y luego se seleccionó la primera ninfa que mudó en cada caja Petri, eliminando las restantes. Aquella seleccionada se dispuso en un nuevo sustrato, para lo cual se perturbó el insecto suavemente con un pincel, hasta que retirara el estilete voluntariamente. El tiempo de duración del estado ninfal se determinó a partir del momento en el cual se observaba la exuvia que dejaba cada ninfa una vez se transformaba. Además, se realizaron observaciones sobre la duración de la muda, el tiempo de inicio y de culminación de la misma.

**Descripción de los estados de vida de *Puto barberi*.** Para la caracterización morfológica externa de *P. barberi* se realizó una descripción en vivo para cada uno de los estados de vida. Se consideraron el color, la forma y el tamaño del insecto. De manera complementaria, se registró cualquier comportamiento de cada estado de vida que ayudase a entender los hábitos del insecto. La medición de la longitud y amplitud de las cochinillas se realizó

sobre un número variable de especímenes por estado, utilizando un estereoscopio con ocular micrométrico. Las medidas se tomaron 3 días después de la muda, sin considerar los filamentos de cera laterales provenientes de los cerarios, es decir, sólo se midió el cuerpo del insecto. Las imágenes fotográficas se tomaron mediante un estereoscopio Nikon SMZ 1500, con un aumento de 6X, y las mediciones de los diferentes estados de desarrollo se realizaron mediante el software NIS Elements.

**Capacidad reproductiva de *Puto barberi*.** Con el fin de conocer la capacidad reproductiva de *P. barberi*, paralelo al estudio del ciclo biológico, se recolectó un grupo de 30 hembras adultas ovíplenas, las cuales se colocaron individualmente en cajas Petri con trozos de 2 x 1 cm de *T. paniculatum*. Las cajas se revisaron cada 4 h, durante todo el día, para determinar el tiempo de inicio de deposición de ninfas y el número de individuos depositados diariamente hasta su muerte. Adicionalmente, se aislaron ninfas recién emergidas y se dejaron sin alimentación, con el fin de determinar la supervivencia en ausencia de alimento.

**Análisis estadístico.** Se realizó el análisis en estadística descriptiva, tomando medidas de tendencia central como promedios, rangos, máximos y mínimos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Duración de los estados del ciclo de vida de *Puto barberi*

Inicialmente se confirmó la identificación de la especie *Puto barberi* y se depositaron seis individuos en la colección del Museo Entomológico Marcial Benavides, bajo los códigos MEMB 19757 al 19762.

En este estudio se determinó que *Puto barberi* es una especie ovovivípara, por lo tanto, no se estableció la duración del estado de huevo en el ciclo de vida. El ciclo total tuvo una duración de  $141 \pm 0,99$  días (Tabla 1). Se observaron dos estados ninfales que duraron  $42,2 \pm 0,46$  días. La etapa adulta ocurrió en  $98,9 \pm 1,61$  días.

La duración del ciclo de vida de *P. barberi* fue de 5 meses aproximadamente; tres veces mayor que el tiempo registrado para *Dysmicoccus brevipes* (4, 7). Esto significa que cada generación de *P. barberi* estaría en capacidad de causar daño a las plantas por tiempos prolongados, extrayendo savia y facilitando la entrada de otros problemas fitopatológicos. A pesar de que las condiciones de temperatura y humedad durante el estudio pudieron influir en la duración de este ciclo de vida por tratarse de organismos

poiquiloterms (3), debe considerarse que la temperatura en el campo de la zona cafetera en Colombia es menor, entre 18 y 22°C, es decir, el ciclo de vida en el campo puede tener una duración mayor al registrado en esta investigación.

No se observaron individuos machos durante este estudio; sin embargo, las hembras siguieron produciendo hembras. Es posible considerar a *P. barberi* como una especie ovovivípara de reproducción partenogenética del tipo telitoquia (13). Sin embargo, debe considerarse que la temperatura podría influir en este tipo de reproducción (15).

### Descripción de los estados de vida de *Puto barberi*

La especie *P. barberi* mudó dos veces durante el desarrollo ninfal antes de convertirse en adulto, de esta manera se describen dos estados ninfales. La caracterización morfológica de todos los estados de vida de *P. barberi* permite realizar la descripción de los estados de vida, así:

**Huevo.** A pesar de ser una especie ovovivípara, en algunos casos se observaron huevos anaranjados depositados por algunas hembras en edad avanzada (próximas a morir) o cuando éstas tuvieron una deposición rápida

**Tabla 1.** Ciclo biológico de *Puto barberi*, en el laboratorio ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$  y  $70 \pm 10\%$  de H.R) Cenicafé, Colombia, 2011.

Estado de desarrollo		Número de individuos (N)	Promedio de desarrollo (días)
Ninfa	Ninfa I	99	$17,8 \pm 0,17$
	Ninfa II	97	$24,4 \pm 0,77$
Duración etapa ninfal			$42,2 \pm 0,46$
Adulta	Pre-deposición	40	$42,2 \pm 2,74$
	Deposición de ninfas	30	$51,4 \pm 6,80$
	Post-deposición	30	$5,30 \pm 0,82$
Duración etapa adulta			$98,9 \pm 1,61$
Ciclo biológico			$141,0 \pm 0,99$

de ninfas. Sin embargo, para observar los huevos que se encontraban dentro del insecto, se extrajeron algunos mediante disección de hembras oviplenas, observando que son redondos, de color verde claro y textura lisa. Algunos huevos contenían dos puntos negros (Figura 2a). El tamaño promedio fue de 0,53 mm de largo x 0,34 mm de amplitud (Tabla 2).

**Ninfa I.** Una vez las hembras de *P. barberi* depositaron las Ninfas I, secretaron hilos finos de seda blanca donde las ninfas quedaron confinadas por un tiempo aproximado de 24 horas (Figura 3). El primer estado ninfal presenta una coloración inicial entre amarillo y anaranjado claro, color que minutos después desaparece al iniciar la segregación de la cera que cubre todo su cuerpo en 2 a 3 días. En algunos casos se observó la segmentación del cuerpo y las patas. Las antenas fueron difícilmente visibles. Los ojos están ubicados lateral y ventralmente en la cabeza. Los filamentos cerosos laterales fueron visibles, los que fueron aumentando de tamaño a medida que los individuos crecían (Figura 2b). La ninfa I de *P. barberi* mide entre 0,7 – 1,04 mm de longitud y 0,44 – 0,65 mm de amplitud (Tabla 2).

**Ninfa II.** En este estado el insecto presentó una coloración amarillenta opaca, e inmediatamente iniciaron una segregación pulverulenta, que rápidamente fue cubriendo todo su cuerpo.

Las antenas y las patas sólo fueron visibles al momento de caminar (Figura 2c). La ninfa II se diferencia del estado anterior por su tamaño y por la abundancia en la segregación pulverulenta de ácidos grasos. Las medidas de la ninfa II fueron de 1,07 a 1,84 mm de longitud por 0,75 a 1,11 mm de amplitud (Tabla 2).

**Adultos.** Las características diferenciales con respecto a la ninfa II se registraron básicamente en el tamaño y la presencia de filamentos laterales; luego de la muda, el insecto se cubrió con una cerosidad pulverulenta blanca (Figura 2d). La hembra adulta en su etapa inicial midió 1,58 mm de largo por 1,02 mm de ancho y la hembra oviplena 3,28 mm de largo por 2,30 mm de ancho, ésta tuvo un aumento de tamaño significativo posiblemente para albergar las gónadas, de tal manera que los ovarios se desarrollan y se llenan de huevos durante la etapa reproductiva.

**Muda.** De un total de ocho individuos observados, el proceso de muda duró aproximadamente entre 47 y 140 min. Este proceso inició cuando la cutícula se abrió por la parte anterior dorsal del cuerpo a nivel de la cabeza, momento en el cual el insecto se impulsó lentamente hacia adelante dejando la exuvia lentamente como un saco arrugado y blanco, mientras la nueva cutícula del nuevo estado se observó de

**Tabla 2.** Dimensiones de los estados biológicos de *P. barberi*.

Estado	No. de especímenes	Longitud		Amplitud	
		Prom. (mm)	E.E.	Prom. (mm)	E.E.
Huevo	10	0,53	0,015	0,34	0,015
Ninfa I	20	0,91	0,024	0,53	0,012
Ninfa II	20	1,47	0,054	0,92	0,025
Adulto (hembra) joven	20	1,58	0,060	1,02	0,035
Adulto (hembra) oviplena	25	3,28	0,096	2,30	0,060

Prom.: Promedio; E.E.: Error Estándar.

color amarillento claro (Figura 2e). Una vez expulsada la exuvia el insecto quedó totalmente desnudo, pero en pocos minutos se formó una capa cerosa y blanca, que le cubrió todo el cuerpo (Figura 2b). Generalmente, luego de la muda la hembra permaneció en el mismo lugar, pudiendo emigrar. En algunas ocasiones se observó que la exuvia quedó adherida del cuerpo de la cochinilla por varios días (Figura 2f).

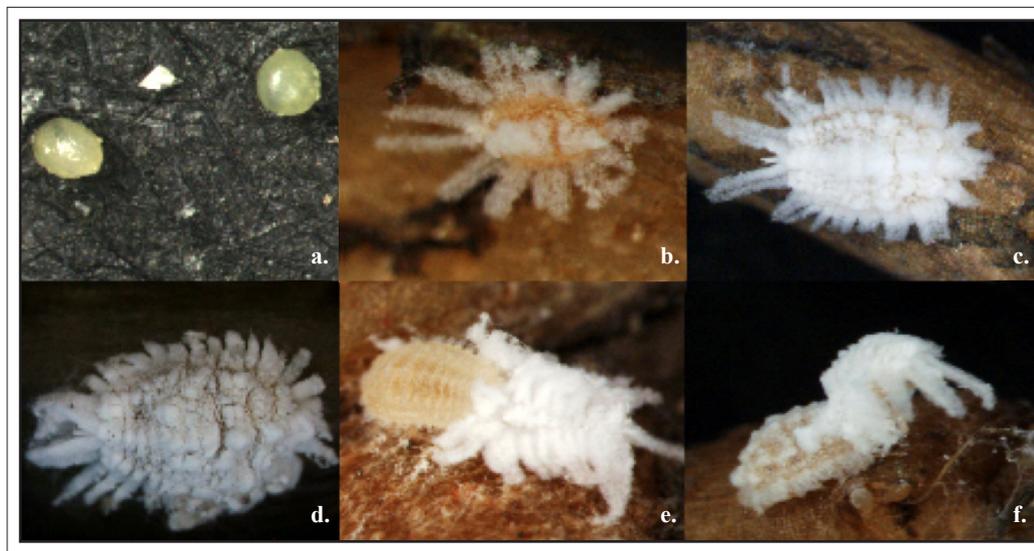
### Capacidad reproductiva de *Puto barberi*

*Puto barberi* es una especie ovovivípara, cuyas hembras retienen los huevos en su interior, donde eclosionan para ser inmediatamente expulsadas las ninfas I. Los huevos puestos por algunas hembras generalmente no fueron viables o las ninfas emergidas fueron muy débiles. De las 30 hembras a las que se les realizó el seguimiento, 26 de ellas colocaron ninfas. El número de ninfas por hembra estuvo en un rango entre 16 y 182, con un promedio de 83,6 y un error estándar de 8,42.

No existen estudios sobre esta especie, sin embargo, estos valores son similares a los encontrados por Chávez (4) con la especie *Dysmicoccus brevipes*, quien encontró de 18 a 206 ninfas, con un promedio de 61 ninfas, e inferiores a los citados por Mau y Martin (7), quienes encontraron de 234 a 1.000 huevos por hembra para *D. brevipes*.

Es probable que la cantidad de ninfas producidas por hembra en este estudio sea inferior a la que se presenta en el campo, considerando que las hembras se disturbaban para trasladarlas de sustrato alimenticio, de tal manera que pudieron inhibirse en producir más descendencia. También, pudo haber una consecuencia por una menor alimentación de las hembras al tener que reinsertar su estilete, y otros factores que pudieron haber influido como el cambio de temperatura y la humedad en el ambiente controlado (3).

Un análisis descriptivo de la cantidad de ninfas puestas por hembra a través del



**Figura 2.** Estados de desarrollo de *P. barberi*. a. Huevo; b. Ninfa I; c. Ninfa II; d. Hembra adulta ovíplena; e. y f. Muda.

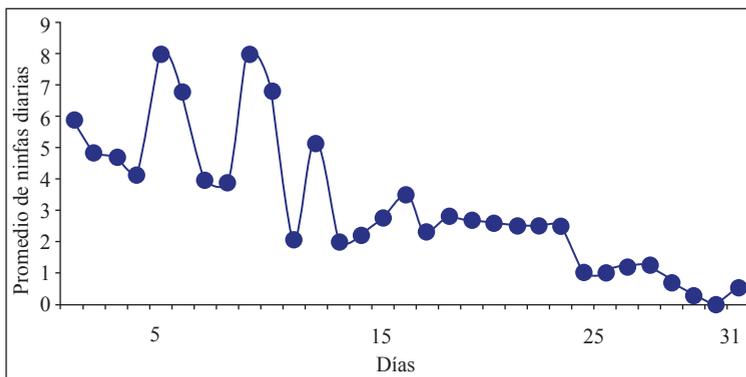


**Figura 3.** Hembra con ninfas recién depositadas. Nótese la formación de hilos finos.

tiempo, indican valores mayores durante los primeros 15 días (Figura 4). Se calculó que el 70% de las ninfas fueron puestas durante los primeros 13 días, y el 84% al día 18. Es decir, se debe esperar la mayor proporción de ninfas puestas por hembra durante los primeros 20 días, posterior a la llegada de una hembra ovíplena a una planta sana. Este tiempo es inferior a lo encontrado por Mau y Martín (7) y Chávez (4), quienes registraron 23 y 25 días para la especie *D. brevipennis*, respectivamente. El período post-reproductivo

de *P. barberi* fue de 6,4 días, similar a lo reportado por Mau y Martín (7): 5 días, y Chávez (4): 4 días. La longevidad de los adultos hembra de *P. barberi* fue estimada en 27 días, en promedio.

Así mismo, se evaluó la supervivencia de *Puto barberi* sin alimento, dado que una forma de dispersión de la plaga es mediante las herramientas de trabajo donde se adhiere o en suelo usado en los semilleros y almacigos de café. Se observó que entre



**Figura 4.** Promedio de ninfas producidas diariamente por hembras de *P. barberi*, bajo condiciones de laboratorio a  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  y H.R. de  $70 \pm 10\%$ .

más avanzado fue el estado biológico mayor fue la supervivencia. La ninfa I sin alimento sobrevivió de 8 a 15 días, la ninfa II sobrevivió de 14 a 33 días y el adulto de 17 a 35 (Tabla 3).

**Tabla 3.** Supervivencia de *Puto barberi* sin alimento, bajo condiciones de laboratorio ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$  y  $70 \pm 10\%$  H.R.).

Estados	Promedio de supervivencia (días)	Rango (días)	E.E.
Ninfa I	11,7	8-15	0,81
Ninfa II	25,0	14-33	2,62
Adulto	26,3	17-35	1,72

E.E.: Error estándar

Este tiempo debe ser considerado si se decide realizar solarización de suelo utilizado en la elaboración de sustratos en almácigos de café, si se desea esperar entre la eliminación de un cultivo y la siembra de nuevas plantas sanas, o si se considera un período de descanso del suelo durante el establecimiento de una nueva plantación en lotes infestados por esta especie.

Se puede concluir que:

- La cochinilla de la raíz del café, *Puto barberi*, es una especie ovovivípara, de reproducción partenogenética de tipo telitoquia. Pasa por los estados de desarrollo, huevo, ninfa y adulto, presentando dos estados ninfales.
- El ciclo biológico tuvo una duración de  $141 \pm 0,99$  días a  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  y  $70 \pm 10\%$  de H.R.
- La hembra de *P. barberi* produjo entre 16 a 182 ninfas en un período de deposición de 20,6 días.
- Los diferentes estados de *P. barberi* lograron sobrevivir sin alimento entre 8 y 35 días.

## LITERATURA CITADA

1. ASPLANATO, G.; GARCÍA, F. Ciclo estacional de la cochinilla roja californiana, *Aonidiella aurantii* (Homoptera: Diaspididae). *Agrociencia* 5(1):54-67. 2001.
2. BEN D., Y. Systematic catalogue of the Mealybugs of the world (Insecta: Homoptera: Coccoidea: Pseudococcidae and Putoidae): With data on geographical distribution, host plants, biology and economic importance. New Castle upon Tyne : Athenaeum press, 1994. 686 p.
3. BURSELL, E. Introducción a la fisiología de los insectos. Madrid : Alhambra, 1974. 350 p.
4. CHÁVEZ, A.J. Biología y morfología de *Dysmicoccus brevipes* (Hemiptera: Pseudococcidae). Lima : Universidad Nacional Agraria. Escuela de post grado, 2010. 112 p. Tesis M. Sc.
5. ITIS. Catalogue of Life 2009: *Puto barberi*. [En línea]. Reading : University of Reading : ITIS, 2000. Disponible en internet: [http://www.catalogueoflife.org/annual-checklist/show\\_species\\_details.php?id\\_record\\_=321952](http://www.catalogueoflife.org/annual-checklist/show_species_details.php?id_record_=321952). 47. Consultado en junio de 2011.
6. KONDO, T. Las cochinillas de Colombia (Hemiptera: Coccoidea). *Biota colombiana* 2(1):31-48. 2001
7. MAU, F.L.; MARTIN, J. *Dysmicoccus brevipes*. [En línea]. Honolu : Universidad de Hawaii, {s.f.}. Disponible en internet: [http://www.extento.hawaii.edu/kbase/crop/d\\_brevip.htm](http://www.extento.hawaii.edu/kbase/crop/d_brevip.htm). Consultado el 5 de mayo 2011.
8. OIRSA. Identificación de insectos de la súper familia Coccoidea con énfasis en Cochinilla rosada *Maconellicoccus hirsutus*: Manual técnico. Guatemala : {s.n.}, 2000. 64 p.
9. RAMOS, A.; SERNA, F. Coccoidea de Colombia, con énfasis en las cochinillas harinosas. *Revista facultad de agronomía. Universidad Nacional de Colombia* 57(2):2383-2412. 2004.
10. RAMOS, A. Chinchas harinosas (Hemiptera: Pseudococcidae y Putoidae) en cinco cultivos de la región Andina colombiana. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. Escuela de post- grados, 2006. 105 p. M. Sc. En ciencias agrarias con énfasis en entomología.
11. SEL. Scale insects: General information. [En línea]. Disponible en internet: <http://www.Set.Barc.usda.gov/scalenet/htm>. Consultado en junio de 2014.

12. VILLEGAS G., C.; BUSTILLO P., A.E.; ZABALA E., G.; BENAVIDES M., P.; RAMOS P., A.A. Cochinillas harinosas en cafetales colombianos. p. 342-354. En: BUSTILLO P., A.E. Los insectos y su manejo en la caficultura colombiana. Chinchiná : FNC : Cenicafé, 2008. 466 p.
13. VILLEGAS G., C.; ZABALA, G.; RAMOS, A.A.; BENAVIDES, P. Identificación y hábitos de cochinillas harinosas asociadas a raíces del café en Quindío. Cenicafé 60(4):354-365. 2009.
14. VILLEGAS G., C.; BENAVIDES M., P. Identificación de cochinillas harinosas en las raíces del café en departamentos cafeteros de Colombia. Cenicafé 62(1):48-55. 2011
15. WILLIAMS, D.J.; GRANARADEW, M.C. Mealybugs of Central and South America. London : CAB International, 1992. 635 p.

# CINÉTICA QUÍMICA DE LA FERMENTACIÓN DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ A TEMPERATURA AMBIENTE

Gloria Inés Puerta Quintero\*

---

**PUERTA Q., G. I. Cinética química de la fermentación del mucílago de café a temperatura ambiente. Revista Cenicafé 64(1): 42-59 2013**

En esta investigación se cuantificaron concentraciones de azúcares totales, azúcares reductores, acidez y etanol del mucílago de café durante 74 h de fermentación a temperatura ambiente. Se hallaron ecuaciones, coeficientes cinéticos y las tasas de degradación y de producción en la fermentación del mucílago del café. Los cambios en las concentraciones de azúcares, ácidos y etanol en la fermentación del mucílago variaron con el tiempo; inicialmente la velocidad fue lenta, luego más rápida hasta que alcanzó un valor máximo, después la tasa disminuyó hasta que las concentraciones del sustrato y de los productos permanecieron casi constantes. Los siguientes coeficientes cinéticos fueron:  $0,055 \text{ h}^{-1}$  para azúcares reductores,  $0,048 \text{ h}^{-1}$  para azúcares totales,  $0,076 \text{ h}^{-1}$  para acidificación y  $0,064 \text{ h}^{-1}$  para producción de etanol. Después de 20 h, 15,9% de los azúcares reductores iniciales se fermentaron y 20% de los totales se degradaron; entre 45 y 47 h se alcanzó la máxima velocidad de fermentación y la concentración de los azúcares en el sustrato disminuyó casi a la mitad del valor inicial. Las velocidades máximas de acidificación y de producción de alcohol se alcanzaron a las 22 h de fermentación. Con estos datos cinéticos puede controlarse el proceso de fermentación del café para evitar la formación de defectos como el vinagre y mejorar la calidad del café. También pueden optimizarse los tiempos de proceso y el diseño del fermentador en la industrialización de mucílago. Se recomienda la titulación química de la acidez del mucílago de café como una medida de control en la fermentación.

**Palabras clave:** Azúcares totales, azúcares reductores, etanol, acidez, ácido acético, coeficiente cinético, modelación matemática.

---

## CHEMICAL KINETICS DURING THE MUCILAGE COFFEE FERMENTATION AT AMBIENT TEMPERATURE

In this research concentrations of total sugars, reducing sugars, acidity and alcohol of coffee mucilage during 74 hours fermentation at ambient temperature were quantified. With these experimental data, equations, kinetic coefficients and the rates of degradation and production in fermentation of coffee mucilage were found. The changes in the concentrations of sugars, acids and ethanol in the fermentation of coffee mucilage varied through time, thus, initially the speed was slow, then faster until it reached a maximum value, then this rate decreased until the concentrations of substrate and products remained almost constant. The following kinetic coefficients were found,  $0,055 \text{ h}^{-1}$  for reducing sugars,  $0,048 \text{ h}^{-1}$  for total sugars,  $0,076 \text{ h}^{-1}$  for acidification and  $0,064 \text{ h}^{-1}$  for the production of ethanol. After 20 hours, 15.9% of initial reducing sugars were fermented and 20% of total sugars were degraded; between 45 and 47 h the maximum speed of fermentation was reached and the concentration of sugars in the substrate decreased nearly to half its initial value. After 22 h of fermentation, the maximum speeds of acidification and of the alcohol production were reached. With the knowledge of these kinetic data the process of coffee fermentation could be controlled to avoid the formation of defects like the vinegar and thus to improve coffee quality. Also the times of process and the design of the fermenter in the industrialization of coffee mucilage could be optimized. It is recommended, the chemical titration of acidity of the coffee mucilage as a control measure in the fermentation of coffee

**Keywords:** Total sugars, reducing sugars, ethanol, acidity, acetic acid, kinetic coefficient, mathematical modelling.

---

\* Investigador Científico III. Disciplina Calidad, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

En el beneficio del café por la vía húmeda se generan varios residuos: la pulpa en el despulpado, el mucílago fresco cuando se utilizan desmucilagadores mecánicos, las mieles fermentadas cuando el grano se procesa por la fermentación natural, y las aguas residuales en el lavado.

El mucílago de café es un sustrato que se fermenta en forma natural a temperatura ambiente, debido a su composición química y microbiológica, esencialmente conformada por agua, azúcares, levaduras y bacterias lácticas. En la fermentación del mucílago de café se degradan los azúcares y se forman diversos productos como etanol, ácido láctico, ácido acético, pero también otros alcoholes y ácidos, CO<sub>2</sub>, agua, aldehídos, cetonas y energía (ATP). Además, en este proceso ocurren cambios del pH, grados Brix, demanda química de oxígeno (DQO), color y olor del mucílago, también se degradan casi por completo los lípidos y parcialmente las sustancias pécticas (27, 31).

La cinética es el estudio de las velocidades y mecanismos de una reacción. Las velocidades de las fermentaciones se definen como los cambios a través del tiempo, de las concentraciones de la biomasa de microorganismos, del sustrato y de los productos formados. Las velocidades de las fermentaciones dependen de la temperatura externa, ya que ésta influye en el desarrollo y metabolismo de los microorganismos.

En los estudios cinéticos, mediante modelación matemática se determinan ecuaciones que relacionan las concentraciones con el tiempo o con otros factores o variables. En la literatura se reportan curvas y datos cinéticos de algunos productos, microorganismos y sustratos fermentados en diferentes sistemas como mezcal (14), yogurt (24), ácido láctico a

partir de suero de leche (17, 21, 23), lactosa (7) y hongos (36), entre otros.

Así mismo, algunos autores han cuantificado las concentraciones de los azúcares, etanol y ácidos del mucílago de café en determinados tiempos de fermentación (5, 16, 20, 22, 35). Sin embargo, en la actualidad no se han encontrado referencias en la literatura sobre los parámetros cinéticos o las ecuaciones matemáticas, que describan los procesos que ocurren en la fermentación del mucílago de café.

Usualmente, en los estudios sobre procesos de fermentación se determinan solamente los rendimientos, productividades o conversiones del sustrato (13). En el caso del mucílago de café, Calle (11) reportó un rendimiento de 1,2 L de alcohol de 85° por 100 kg de café cereza maduro; Arias y Ruiz (2) presentaron gráficas de las concentraciones del sustrato, etanol y biomasa vs el tiempo de fermentación de mucílago de café con *Saccharomyces cerevisiae* e hidrólisis enzimática en sistemas agitados y pH controlado, a temperaturas entre 32 y 38°C.

Henao *et al.* (15) presentaron rendimientos y productividades de ácido láctico obtenido del mucílago de café en procesos de hidrólisis enzimática y fermentaciones discontinuas con *Lactobacillus bulgaricus*, a temperaturas entre 40 y 50°C. Por su parte, Rodríguez y Zambrano (33) reportaron un rendimiento de 58,4 mL de etanol por cada kilogramo de mucílago fresco.

El conocimiento sobre la cinética de la fermentación del mucílago de café, las ecuaciones de ajuste de los datos experimentales, las velocidades de degradación, los tiempos de formación de los productos y las producciones máximas son datos necesarios para optimizar el diseño de los fermentadores del café en

los beneficiaderos, así como en las plantas industriales de fermentación y aprovechamiento del mucílago de café. Además, esta información contribuiría a la selección de los controles, mediciones, límites críticos, mejoras en el proceso del beneficio del café y al aseguramiento de la calidad de la bebida (28, 29, 30).

En esta investigación se cuantificaron las concentraciones de los azúcares totales, azúcares reductores, acidez y etanol del mucílago de café durante la fermentación hasta por 74 h, a temperatura ambiente. Con estos datos experimentales se analizaron modelos matemáticos mediante regresiones y se hallaron ecuaciones, coeficientes cinéticos y valores de las velocidades máximas de degradación de los azúcares y de la producción de etanol y de acidificación del mucílago de café, con el tiempo de fermentación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización.** El experimento se realizó en los laboratorios de Cenicafé (Manizales, Caldas), localizados a 05° 00' latitud Norte, 75° 36' longitud Oeste y 1.310 m de altitud, con temperatura media de 21,0°C, temperatura máxima de 27,6°C, temperatura mínima de 16,8°C y humedad relativa del 77%, según datos climáticos de la estación meteorológica de Cenicafé.

**Origen del café.** Se procesaron muestras de *Coffea arabica* L. de la variedad Colombia fruto rojo. El café fue cultivado en fincas ubicadas en Chinchiná y en lotes experimentales de la Estación Central Naranjal en Chinchiná, localizada a 04° 58' latitud Norte, 75° 39' longitud Oeste, 1.381 m de altitud, con temperatura media de 20,9°C, humedad relativa del 78%, precipitación total anual de 2.782 mm, con 229 días de lluvia y 1.763 horas de brillo solar.

**Beneficio del café.** Para obtener la mayor cantidad de frutos de café maduros, las cerezas se recolectaron de forma selectiva y en fechas óptimas, de acuerdo a las épocas de las floraciones de los cafetales. Luego, en el beneficiadero cada lote de café recibido, se pasó por una zaranda de motor y por selección manual para retirar frutos verdes, secos y pintones, después el café seleccionado se despulpó sin agua y se pasó por una zaranda para descartar pulpas y granos no despulados, posteriormente se desmucilagino mecánicamente en un equipo 600 kg cereza por hora, con un flujo de agua de 1,6 L.min<sup>-1</sup>.

El mucílago obtenido se fermentó en canecas plásticas de 80 L, en sistemas discontinuos (*batch*), estáticos y abiertos. Durante los días de ejecución de la investigación, la temperatura del aire varió entre el día y la noche de 15,4 a 30,5°C (promedio 20,5°C), humedad relativa de 81,7% (37,0% a 98,0%), según datos climáticos de la estación meteorológica de Cenicafé.

**Diseño experimental.** Se evaluaron por duplicado, diez tratamientos de procesos de fermentación, correspondientes a diez tiempos sucesivos de fermentación 0, 4, 8, 20, 26, 31, 44, 52, 68 y 74 h. La unidad de trabajo fue de 50 kg de mucílago de café obtenido de café maduro y seleccionado, de cada unidad de trabajo se determinaron por duplicado las concentraciones de azúcares, acidez y etanol del sustrato. Los tiempos de los tratamientos se fijaron con base en la disponibilidad del mucílago, de acuerdo a los horarios de recolección y de beneficio, en una finca cafetera de Colombia. Además, se consideraron las prácticas generales de fermentación del café en las fincas, donde usualmente este proceso se desarrolla dejando el grano por diferentes tiempos, una, dos o tres noches.

**VARIABLES MEDIDAS.** Se cuantificaron las siguientes variables: Porcentaje de azúcares totales, porcentaje de azúcares reductores, porcentaje de alcohol y porcentaje de acidez total expresada como ácido acético, en el mucílago de café fresco y fermentado.

**Análisis químicos de mucílago.** De cada fermentador y hora de tratamiento, sin perturbar el sistema, se sacaron en frascos, en forma compuesta 2 kg de mucílago, en diferentes puntos. Las muestras se mantuvieron congeladas, luego se batieron por porciones en una licuadora doméstica durante 2 min, la mezcla se pasó por un cedazo para retirar las impurezas gruesas y luego se tomaron muestras en las cantidades requeridas para cada análisis.

Se siguieron los métodos de análisis de la AOAC (3), así: Lane Eynon para los azúcares reductores, Lane Eynon con hidrólisis ácida para los azúcares totales, oxidación con dicromato de potasio y titulación con sulfato ferroso de amonio para el alcohol, valoración con NaOH 0,1N hasta pH 8,3 para la acidez total. Los resultados para cada variable se expresaron en porcentaje, en base húmeda. La acidez total se expresó como porcentaje de ácido acético.

**Análisis de resultados.** Se plantearon ecuaciones para la degradación del sustrato y la producción de alcohol y acidez en el tiempo, teniendo en cuenta los procesos bioquímicos que ocurren en la fermentación. Con los datos experimentales se realizaron regresiones y se estimaron los parámetros, con el fin de ajustar curvas que relacionaran las concentraciones de los azúcares totales, azúcares reductores, alcohol y acidez con el tiempo de fermentación del café, a temperatura ambiente.

Se utilizó el programa Matlab para la obtención de las derivadas parciales con

respecto a cada parámetro de las ecuaciones y al tiempo, el programa XLSTAT para las regresiones y el Excel para graficar. Los parámetros de las ecuaciones se determinaron mediante el método iterativo con las siguientes condiciones: iteraciones 200 y convergencia 0,00001, para lo cual se partió de valores iniciales que se establecieron con base en los datos medidos de las concentraciones en el tiempo cero y las concentraciones mínimas o máximas, según la tendencia de los datos de los azúcares y de los productos con el tiempo de fermentación.

Así mismo, para estimar los valores de los coeficientes cinéticos de degradación y de producción, se efectuaron previamente regresiones exponenciales de base  $e = 2,71828$ , entre la concentración de los azúcares y productos y el tiempo, con el fin de tener una idea de la magnitud de estos coeficientes. Igualmente, los valores de los parámetros de las funciones del sustrato y del producto se estimaron mediante el método de la linealización de las funciones y los gráficos para encontrar las pendientes e interceptos.

De los resultados de las regresiones de ajustes de las ecuaciones a los datos se obtuvieron el coeficiente de determinación  $R^2$ , la suma de los cuadrados de los errores (residuales), la media de los cuadrados de los errores y la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los errores del modelo y también el número de iteraciones efectuadas. Así mismo, se determinaron los valores de cada parámetro después del ajuste al modelo y su desviación típica, además, las predicciones y residuales para cada dato observado y para los promedios en cada tiempo.

**Datos cinéticos estimados.** Con base en los parámetros hallados y en la expresión diferencial, se estimaron las velocidades

de degradación y formación en función del tiempo y de la concentración del sustrato o producto. También se calcularon las velocidades máximas de producción y de degradación (%/h), los tiempos y las concentraciones en que se alcanzaron las máximas velocidades de degradación y de producción. Además, se estimó el tiempo en que se consumió la mitad de la concentración del sustrato en la fermentación del mucílago de café.

A continuación se presenta el planteamiento de los balances y ecuaciones de degradación de sustrato y formación de productos en el sistema de fermentación del mucílago de café usado en este estudio, donde se utilizó el mucílago natural obtenido del desmucilaginado, sin adiciones al sustrato,



Dependiendo del sistema y de las condiciones de fermentación pueden presentarse otras fermentaciones como la propiónica y la butírica, a partir del ácido láctico producido en las fermentaciones lácticas.

Debido a que en un sistema discontinuo de fermentación del mucílago de café los productos se forman a partir de los sustratos presentes y se acumulan a través del tiempo, la velocidad de degradación del sustrato ( $-dS/dt$ ) y la velocidad de formación de los productos ( $dP/dt$ ), pueden expresarse con las derivadas, según Baeza (6) y Levenspiel (19), como se muestra en las Ecuaciones <4> y <5>.

$$\frac{-ds}{dt} = ks*(funciónS(t)) \quad \text{Ecuación <4>}$$

$$\frac{dP}{dt} = kp*(funciónP(t)) \quad \text{Ecuación <5>}$$

ni alimentación posterior al sistema, tampoco se retiraron los productos, a excepción del  $CO_2$  que salió naturalmente del sistema, pero que no se midió en este experimento.

Las principales fermentaciones del mucílago de café son: la alcohólica que se representa en la Ecuación estequiométrica teórica (Ecuación <1>) donde el sustrato conformado por los azúcares reductores y totales es transformado en etanol,  $CO_2$  y energía por las levaduras. Así mismo, las fermentaciones lácticas homofermentativas y heterofermentativas, ecuaciones estequiométricas teóricas Ecuaciones <2> y <3>, en las cuales diferentes bacterias lácticas transforman los azúcares en ácido láctico,  $CO_2$ , etanol o ácido acético y energía.

Donde:

Función  $S(t)$ : Función que relaciona la concentración del sustrato

$S$ : Azúcares totales o azúcares reductores con el tiempo de fermentación

$ks$ : Coeficiente de velocidad de degradación del sustrato,  $h^{-1}$

Función  $P(t)$ : función que relaciona la concentración del producto

$P$ : Alcohol o acidez con el tiempo de fermentación

$kp$ : Constante de velocidad de formación de producto,  $h^{-1}$

$t$ : Tiempo de fermentación, h

Con el fin de comprobar que las curvas de las ecuaciones propuestas concordaban con el comportamiento de los datos experimentales se elaboraron gráficas de los datos; así, se observó un decrecimiento en el caso de los azúcares y un crecimiento en el caso

de los productos con tendencia asintótica. Igualmente, se revisó la distribución de los puntos experimentales respecto a las curvas ajustadas, como lo recomienda Burguillo (9).

Cabe destacar que se obtuvieron coeficientes de determinación de 0,91 y de 0,95 cuando las concentraciones de los azúcares reductores y totales del sustrato se relacionaron con los tiempos de fermentación mediante ajustes con ecuaciones de líneas rectas. Sin embargo, este ajuste lineal se descartó debido a que no tiene significado en sistemas de fermentación, donde suceden procesos bioquímicos, en los cuales los microorganismos consumen el sustrato a través del tiempo, a unas tasas que no son constantes y que dependen de diferentes factores.

A su vez, una Ecuación con función exponencial de base  $e = 2,71828$ , resultó en un mejor ajuste para la degradación en la variable azúcares totales que para los reductores, y además, expresó la degradación a velocidades no constantes; sin embargo, también se descartó porque presentó mayores desviaciones que el modelo ajustado en esta investigación.

Igualmente, en el caso de los productos, con una ecuación cuadrática se ajustaron muy bien los datos de las concentraciones de acidez con el tiempo, incluso hasta las 74 h de fermentación, pero este tipo de ecuación (parábola) también se descartó para la cinética de la fermentación del mucílago de café, dado que las concentraciones de los productos no decrecieron después de alcanzarse la concentración máxima, sino que se mantuvieron en un valor que no varió significativamente después de un tiempo. Peñuela (26) propuso un modelo cuadrático para relacionar el porcentaje de mucílago removido en el tiempo de fermentación que

presentó coeficientes de determinación  $R^2$  de 86,18% y 86,35% para café clasificado y sin clasificar, respectivamente.

Por consiguiente, teniendo en cuenta que las degradaciones y las formaciones de productos en la fermentación están asociadas al crecimiento y metabolismo de las levaduras y bacterias del mucílago (8, 37), se planteó una función de decrecimiento (Ecuación <6>), para la degradación de los azúcares totales y reductores en función del tiempo, tomando como referencia la función de crecimiento logístico simétrica descrita por Landsberg (18).

$$S(t) = \frac{S_{max}}{1 + b * e^{k_s * t}} \quad \text{Ecuación <6>}$$

Así mismo, la producción de etanol y la acidificación del mucílago de café con el tiempo de fermentación se expresaron con la Ecuación <7> de crecimiento poblacional de Verhulst (39), citada por Ulloa (38). De esta forma, se consideró que la formación de productos se asimila al crecimiento de los microorganismos, que es exponencial en las primeras horas, pero que no continúa así indefinidamente, sino que alcanza un valor máximo o punto de saturación, en el cual la concentración se mantiene más o menos constante.

$$P(t) = \frac{P_{max} * P_0 * e^{k_s * t}}{P_0 * (e^{k_s * t} - 1) + P_{max}} \quad \text{Ecuación <7>}$$

De las derivadas respecto al tiempo de las Ecuaciones <6> y <7> se obtuvieron las expresiones para la cinética de fermentación del mucílago del café, velocidades de consumo del sustrato y de formación de los productos, que se muestran en las Ecuaciones <8> y <9>.

$$-\frac{ds}{dt} = \frac{ks * Smax * b * exp^{ks*t}}{1 + (b * exp^{ks*t})^2} \quad \text{Ecuación <8>}$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{kp * exp^{kp*t} * Pmax * (Pmax - Po) * Po}{(exp^{kp*t} * Po + Pmax - Po)^2} \quad \text{Ecuación <9>}$$

Donde el significado y unidades de los parámetros son los siguientes:

*S(t)*: Concentración del sustrato, azúcares totales o azúcares reductores, en un tiempo determinado, %

*Smax*: Concentración máxima de sustrato, %

*b*: Coeficiente adimensional, representa la relación entre la diferencia de la concentración *Smax* estimada y la concentración real disponible en el tiempo cero, dividido entre la concentración real disponible en el tiempo cero

*ks*: Coeficiente o constante de velocidad de degradación del sustrato, h<sup>-1</sup>

*P(t)*: Concentración del producto, alcohol o acidez, en un tiempo determinado, %

*Po*: Concentración inicial del producto, %

*Pmax*: Concentración máxima de producto, %

*kp*: Constante de velocidad de formación de producto, h<sup>-1</sup>

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Cinética de los azúcares totales y reductores.

En las Tablas 1 y 2 se presentan los valores de los parámetros y coeficientes de ajuste de la Ecuación <6> para las variables porcentaje de azúcares totales y porcentaje de azúcares reductores del mucílago de café con el tiempo de fermentación, a temperatura ambiente.

El mucílago presentó una concentración de azúcares totales iniciales entre 6,15% y 7,40% en base húmeda, que concuerdan con los datos reportados por Menchú y Rolz (22) y Rodríguez y Ríos (32), pero superiores a los valores reportados por Aguirre (1), Pee y Castelein (25), Elías (12) y Cabrera *et al.* (10). Por otra parte, los azúcares reductores

**Tabla 1.** Parámetros de la Función de decrecimiento de la degradación de los azúcares totales y reductores del mucílago de café durante la fermentación, a temperatura ambiente.

Parámetro	Azúcares totales		Azúcares reductores	
	Valor	Desviación típica	Valor	Desviación típica
<i>b</i>	0,129	0,036	0,086	0,031
<i>ks</i>	0,048	0,003	0,055	0,005
<i>Smax</i>	7,260	0,304	4,411	0,189

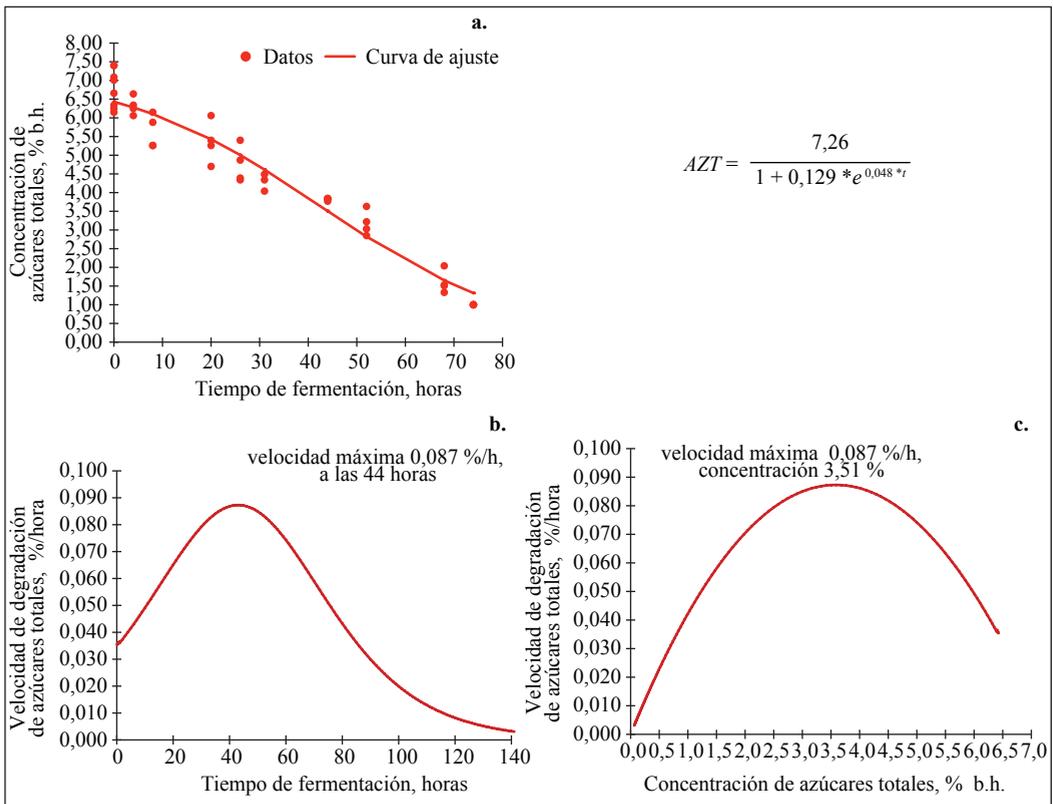
conformaron del 4,00% a 4,61% del peso del mucílago fresco, valores similares a los reportados por Elías (12), Cabrera *et al.* (10) y Rodríguez y Ríos (32).

Las curvas que representan la degradación de los azúcares totales y reductores durante la fermentación del mucílago de café se observan en las Figuras 1a y 2a, las velocidades a través del tiempo en las Figuras 1b y 2b y las tasas de degradación correspondientes a cada concentración se presentan en las Figuras 1c y 2c.

En la fermentación del mucílago de café la concentración de los azúcares totales disminuyó a velocidades variables (Figura 1b). Esta degradación inició a una velocidad de 0,0353%/h y alcanzó la máxima velocidad de 0,0871%/h a las 44 h; luego, hubo una desaceleración de la fermentación debido al consumo del sustrato y al metabolismo de los microorganismos. A las 74 h de fermentación, la velocidad de degradación de los azúcares totales se estimó en 0,0534%/h y la concentración en 1,312%. La mitad de los azúcares totales del sustrato se degradó entre las 45 y 46 h.

**Tabla 2.** Coeficientes de ajuste de los parámetros de la Función de decrecimiento de la degradación de los azúcares totales y reductores del mucílago de café durante la fermentación, a temperatura ambiente.

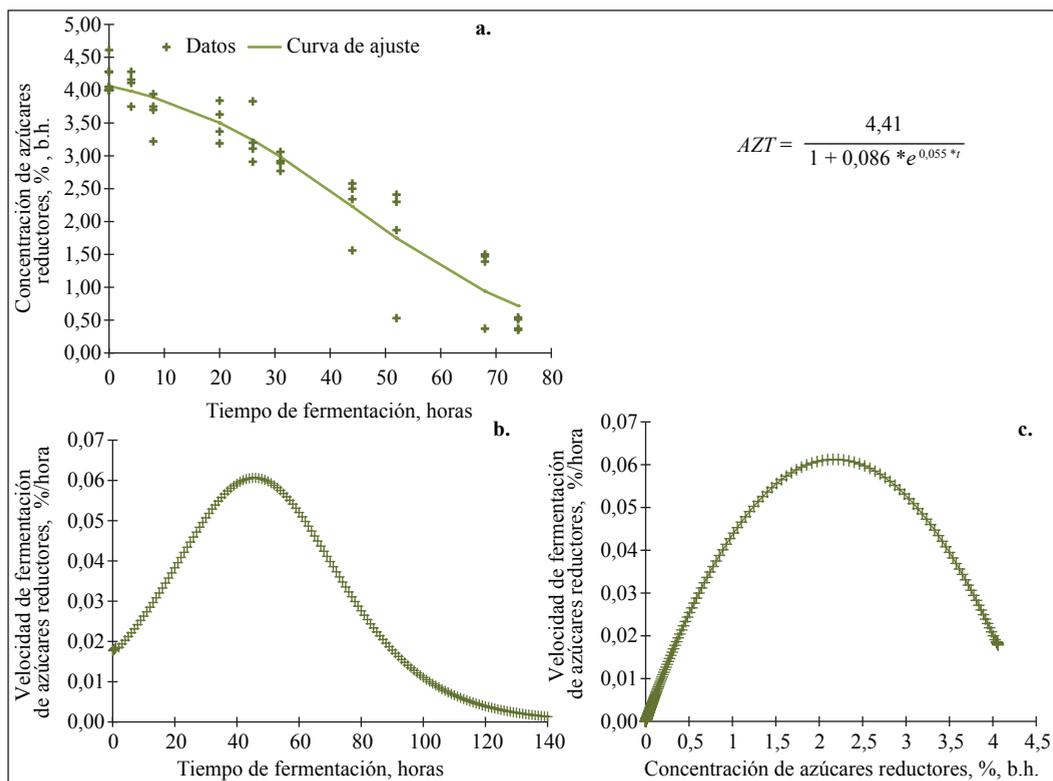
Coeficiente	Azúcares totales	Azúcares reductores
Observaciones	43	44
Grados de libertad	40	41
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,945	0,911
Suma de los cuadrados de los errores (residuales)	8,796	6,242
Media de los cuadrados de los errores	0,220	0,152
Raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los errores	0,469	0,390
Iteraciones efectuadas	18	15



**Figura 1.** Cinética de la degradación de azúcares totales (AZT) del mucílago de café en la fermentación a temperatura ambiente promedio 20,5°C. **a.** Concentración vs tiempo; **b.** Velocidad vs tiempo; **c.** Velocidad vs concentración.

Así mismo, la concentración de los azúcares reductores del mucílago de café disminuyó a diferentes velocidades, según el tiempo Figura 2b. Así, de una velocidad inicial de 0,0177%/h aumentó hasta la máxima velocidad de 0,0606%/h

a las 46 h, posteriormente la velocidad de la fermentación disminuyó; a las 74 h, la velocidad se estimó en 0,0348%/h y la concentración en 0,709%. La mitad de los azúcares reductores del sustrato se fermentaron entre las 46 y 47 h.



**Figura 2.** Cinética de la fermentación de azúcares reductores (AZR) del mucílago de café a temperatura ambiente promedio 20,5° C. **a.** Concentración vs tiempo; **b.** Velocidad vs tiempo; **c.** Velocidad vs concentración.

De la cinética de degradación del mucílago de café en la fermentación, se observó que los cambios en las concentraciones de los azúcares del mucílago aumentan con el tiempo de proceso hasta alcanzar un valor máximo de velocidad y a medida que el sustrato se va agotando la velocidad disminuye.

El valor del coeficiente cinético  $ks$  resultó mayor para los azúcares reductores 0,055 h<sup>-1</sup> que para los totales, 0,048 h<sup>-1</sup>. En cambio, se encontró un mayor porcentaje de degradación de los azúcares totales que de fermentación de los reductores respecto a cada contenido inicial, durante las primeras 53 h de proceso; sin embargo, después de este tiempo el porcentaje de

azúcares fermentados fue mayor a través del tiempo.

Así, a las 20 h se fermentó el 15,9% de los azúcares reductores iniciales y se degradó el 20% de los totales. Estos valores difieren del 60% de reducción de azúcares totales reportados por Avallone *et al.* (5), después de 20 h de fermentación del mucílago de café.

A las 74 h el mucílago presentó un 17,1% de los azúcares reductores y un 19,3% de los azúcares totales iniciales en el mucílago fresco. Por consiguiente, durante la fermentación incluso después de 74 h no se degrada toda la cantidad de azúcares

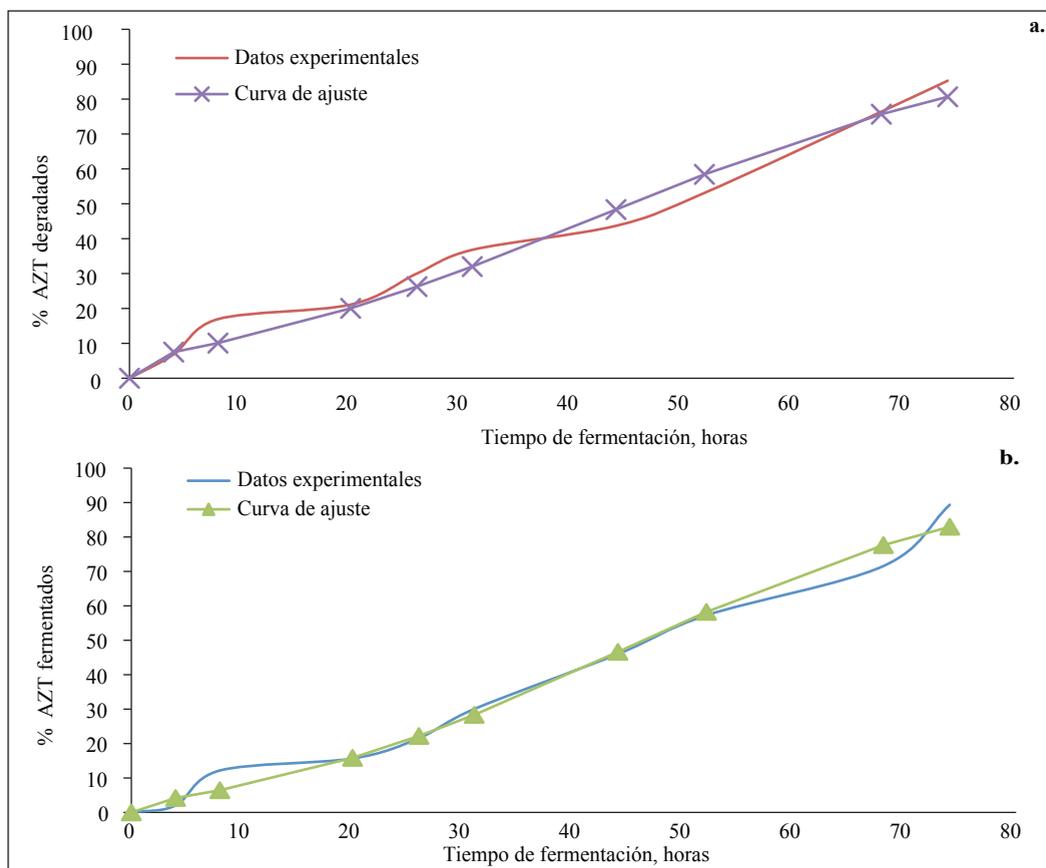
presentes en el mucílago de café. Jackels y Jackels (16) también concluyeron que después de 20 h de fermentación no se agotaba toda la glucosa del mucílago.

Por otro lado, en las Figuras 3a y 3b se compararon los porcentajes de degradación de los azúcares totales y reductores estimados con los datos experimentales, según las curvas de ajuste. Entre las 0 y 74 h de fermentación se registró un porcentaje de error medio entre el ajuste y los datos experimentales de +5,3% para los azúcares totales y de -7,1% para los azúcares reductores.

De igual manera, en las Tablas 3 y 4 se comparan los promedios de la concentración de los azúcares totales y reductores de los datos experimentales, con los valores obtenidos de la curva de ajuste en cada tiempo de fermentación. Con los contenidos promedios, los valores medios del cuadrado de los errores fueron de 0,085 para los azúcares totales y de 0,022 para los azúcares reductores.

### Cinética de la formación de etanol.

El mucílago de café fresco presentó un contenido de 0,080% a 0,146% de etanol con un promedio de 0,12%. La variación



**Figura 3.** Porcentaje de degradación de **a.** azúcares totales y **b.** azúcares reductores, en la fermentación del mucílago de café.

**Tabla 3.** Contenido promedio de azúcares totales en el mucílago de café durante la fermentación, a temperatura ambiente.

Tiempo de fermentación (h)	Azúcares totales (%)	Azúcares totales-Ajuste (%)	Error	Cuadrado del error
0	6,788 a	6,431	0,357	0,127
4	6,323 a	6,278	0,044	0,002
8	5,638 b	6,103	-0,466	0,217
20	5,355 b	5,428	-0,073	0,005
26	4,750 c	5,005	-0,255	0,065
31	4,290 cd	4,616	-0,326	0,106
44	3,823 d	3,506	0,316	0,100
52	3,183 e	2,821	0,361	0,130
68	1,603 f	1,652	-0,049	0,002
74	1,000 g	1,312	-0,312	0,098
68	1,603 f	1,652	-0,049	0,002
74	1,000 g	1,312	-0,312	0,098

Valores con letras distintas para la variable medida indican diferencias estadísticas según la prueba Duncan al 5%.

**Tabla 4.** Contenido promedio de azúcares reductores en el mucílago de café durante la fermentación, a temperatura ambiente.

Tiempo de fermentación (h)	Azúcares reductores (%)	Azúcares reductores-Ajuste (%)	Error	Cuadrado del error
0	4,159 a	4,063	0,096	0,009
4	4,075 ab	3,985	0,090	0,008
8	3,653abc	3,892	-0,239	0,057
20	3,508 bcd	3,503	0,005	0,000
26	3,263 cd	3,240	0,023	0,001
31	2,910 d	2,987	-0,077	0,006
44	2,245 e	2,229	0,016	0,000
52	1,778 e	1,747	0,030	0,001
68	1,183 f	0,939	0,243	0,059
74	0,443 g	0,717	-0,275	0,075
68	1,603 f	1,652	-0,049	0,002
74	1,000 g	1,312	-0,312	0,098

Valores con letras distintas para la variable medida indican diferencias estadísticas según la prueba Duncan al 5%.

de la concentración de etanol del mucílago de café con el tiempo fermentación a temperatura de 20,5°C se ajustó a la Ecuación <7>. Los valores de los parámetros y los coeficientes de ajuste de esta ecuación para el porcentaje de etanol se presentan en las Tablas 5 y 6.

Las curvas que representan la formación de etanol durante la fermentación del mucílago de café se observan en la Figura 4a y tienen una forma sigmoidea que muestra un aumento de la concentración en forma exponencial en las primeras etapas, luego alcanza un valor máximo y después de este tiempo

**Tabla 5.** Parámetros de la ecuación de crecimiento de la producción de etanol durante la fermentación del mucílago de café, a temperatura ambiente.

Parámetro	Etanol	
	Valor	Desviación típica
$P_0$	0,093	0,011
$P_{max}$	0,497	0,023
$k_p$	0,064	0,008

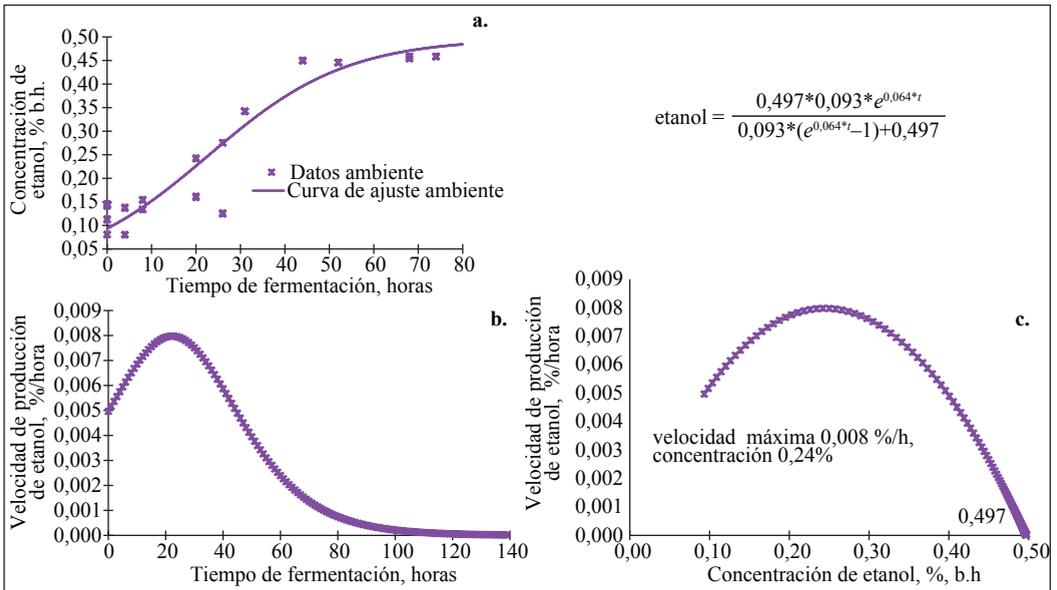
**Tabla 6.** Coeficientes de ajuste de los parámetros de la ecuación de crecimiento de la producción de etanol en la fermentación del mucílago de café, a temperatura ambiente.

Coefficiente	Etanol
Observaciones	44
Grados de libertad	41
Coefficiente de determinación $R^2$	0,911
Suma de los cuadrados de los errores (residuales)	0,087
Media de los cuadrados de los errores	0,002
Raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los errores	0,046
Iteraciones efectuadas	4

la concentración del producto se mantiene prácticamente constante.

Jackels y Jackels (16) y Avallone *et al.* (5) reportaron incrementos de etanol con el tiempo de fermentación del café, pero no mostraron relaciones entre las concentraciones y el tiempo de proceso.

Así, al igual que para el sustrato, en la cinética de producción de etanol durante la fermentación del mucílago de café se observó aumento de la velocidad de formación del producto con el tiempo hasta alcanzar un valor máximo de 0,008%/h a las 22 h, y luego esta velocidad disminuyó (Figura 4b). Se encontró un valor de 0,064 h<sup>-1</sup> para el coeficiente de velocidad de producción de etanol, así mismo, de la ecuación de producción del etanol se deduce que la máxima concentración se alcanzaría a las 120 h con un valor de 0,497%.



**Figura 4.** Cinética de la formación de etanol en la fermentación del mucílago de café a temperatura ambiente promedio 20,5°C. **a.** Concentración vs tiempo; **b.** Velocidad vs tiempo; **c.** Velocidad vs concentración.

La variación en las velocidades de producción de etanol se atribuye al consumo del sustrato y a la reducción de las levaduras debido a las condiciones ácidas y a la misma presencia del etanol en el medio. Después de 44 h de fermentación, los contenidos de etanol fueron significativamente mayores con respecto al contenido en el mucílago fresco y en los tiempos previos, además, no variaron significativamente hasta las 74 h. En este tiempo la velocidad de producción de alcohol se estimó en 0,0011%/h y la concentración en 0,479%.

En la Tabla 7 se comparan los valores promedio de la concentración del etanol de los datos experimentales con los valores obtenidos de la curva de ajuste en cada tiempo de fermentación. Con los contenidos promedios, el valor medio del cuadrado de los errores para la variable etanol fue de 0,001.

**Cinética de la acidificación del mucílago de café.** La acidez del mucílago de café es aportada por diversos ácidos como el acético, málico, láctico, cítrico, succínico y otros compuestos. El mucílago de café fresco presentó una acidez como ácido acético de 0,096% a 0,135%, con un promedio de 0,109%.

Estos contenidos aumentaron con el tiempo de fermentación. Rolz *et al.* (34), Menchú y Rolz (22) y Tchana y Jacquet (35) también reportaron valores mayores de la acidez volátil y total del mucílago fermentado con respecto al mucílago fresco. Igualmente, Avallone *et al.* (4) encontraron aumento de ácidos láctico y acético con el tiempo de fermentación del café.

La variación de la concentración de la acidez del mucílago de café con el tiempo de fermentación, a temperatura de 20,5°C se ajustó igualmente a una curva de forma sigmoidea (Figura 5a). Los valores de los parámetros y los coeficientes de ajuste de la Ecuación <7> para la variable porcentaje de acidez del mucílago de café con el tiempo de fermentación, a temperatura ambiente, se presentan en las Tablas 8 y 9.

La velocidad de producción de acidez durante la fermentación del mucílago de café aumentó rápidamente de 0,009%/h hasta un valor máximo de 0,015%/h, que se alcanzó entre las 21 y 22 h, y luego hubo una desaceleración de la fermentación láctica (Figura 5b).

**Tabla 7.** Contenido promedio de etanol en el mucílago de café durante la fermentación, a temperatura ambiente.

Tiempo de fermentación (h)	Etanol (%)	Etanol – Ajuste (%)	Error	Cuadrado del error
0	0,120 d	0,093	0,027	0,001
4	0,109 d	0,114	-0,005	0,000
8	0,144 cd	0,139	0,005	0,000
20	0,201 c	0,226	-0,025	0,001
26	0,200 c	0,274	-0,074	0,005
31	0,342 b	0,312	0,030	0,001
44	0,450 a	0,395	0,054	0,003
52	0,446 a	0,431	0,015	0,000
68	0,456 a	0,471	-0,015	0,000
74	0,458 a	0,479	-0,020	0,000

Valores con letras distintas para la variable medida indican diferencias estadísticas según la prueba Duncan al 5%.

**Tabla 8.** Parámetros de la ecuación de crecimiento de la acidificación del mucílago de café durante la fermentación, a temperatura ambiente.

Parámetro	Etanol	
	Valor	Desviación típica
$P_0$	0,132	0,012
$P_{max}$	0,789	0,020
$kp$	0,076	0,006

**Tabla 9.** Coeficientes de ajuste de los parámetros de la ecuación de crecimiento de la acidificación del mucílago de café durante la fermentación, a temperatura ambiente.

Coefficiente	Acidez
Observaciones	44
Grados de libertad	41
Coefficiente de determinación $R^2$	0,963
Suma de los cuadrados de los errores (residuales)	0,106
Media de los cuadrados de los errores	0,003
Raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los errores	0,051
Iteraciones efectuadas	3

La constante de velocidad de producción de acidez resultó en promedio de  $0,076 \text{ h}^{-1}$ . A las 74 h de fermentación la velocidad de producción de acidez se estimó en  $0,0011\%/h$  y la concentración en  $0,775\%$ . Así mismo, de la ecuación de producción de acidez se estimó que una concentración de  $0,788\%$  se alcanzaría desde las 108 h y una máxima de  $0,789\%$  a las 145 h.

La variación en las velocidades de producción de acidez se atribuye al consumo del sustrato y a la reducción de las bacterias debido a las condiciones ácidas. La concentración de acidez cambió significativamente desde las primeras horas y a través del tiempo de fermentación (Tabla 10).

Así, a las 20 h la acidez se triplicó con respecto a la del mucílago fresco. En la

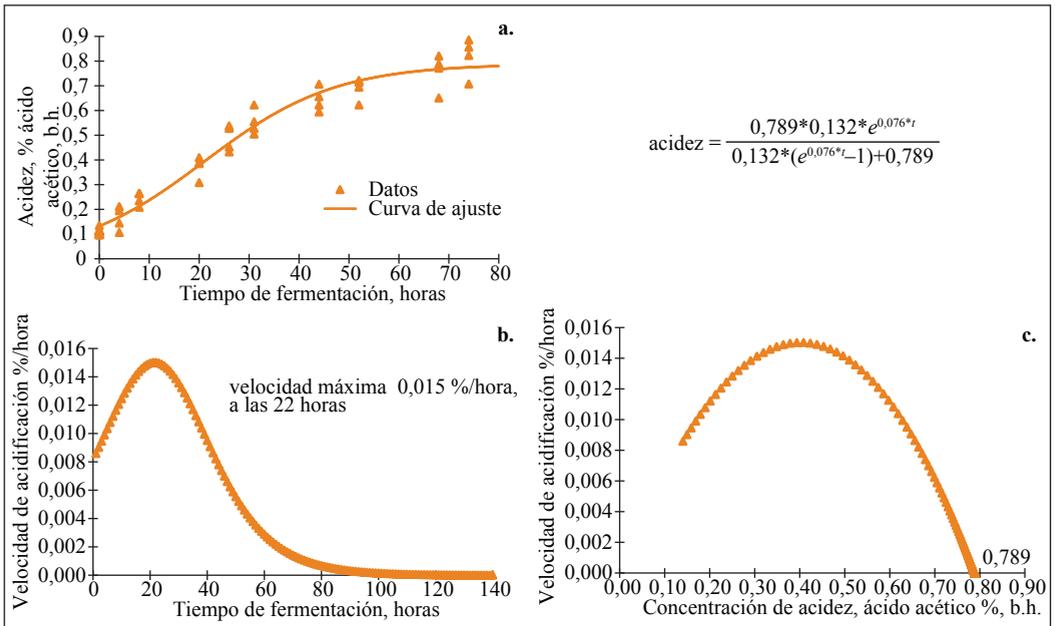
Tabla 10 se comparan los valores promedio de la concentración de la acidez de los datos experimentales con los valores obtenidos de la curva de ajuste en cada tiempo de fermentación. De esta forma, el valor medio del cuadrado de los errores para los promedios de la variable acidez fue de  $0,001$ .

En resumen, mientras que la mayoría de los autores proponen la ecuación de Luedeking y Piret para describir la cinética de fermentación del producto y las ecuaciones de Hanson y Tsao y Monod para el consumo de sustrato (7, 17, 21, 23, 24), en las cuales se requieren datos de las concentraciones de la biomasa, las curvas con modelo logístico aplicadas en esta investigación, además de considerar implícitamente la bioquímica de crecimiento y fermentación de los microorganismos, presentan la ventaja que no requieren datos de las concentraciones de la biomasa.

La buena precisión de los modelos que se encontraron en esta investigación permite predecir en sistemas de fermentación *batch* del mucílago de café, las degradaciones y producciones en el tiempo, a temperatura ambiente. De esta forma, la velocidad de la fermentación del mucílago de café puede medirse en función de las degradaciones químicas, como el cambio en el tiempo de la concentración de los azúcares totales o reductores, y también en términos de la producción de acidez, ácidos y etanol.

A temperatura ambiente, la velocidad de degradación de los azúcares totales es mayor que la fermentación de los reductores. Igualmente, la velocidad de acidificación del mucílago es mayor que la velocidad de producción de etanol durante todo el tiempo de fermentación.

Se concluye que la cinética de degradación del sustrato y de formación de los ácidos y



**Figura 5.** Cinética de la acidificación del mucílago de café durante la fermentación a temperatura ambiente promedio de 20,5°C. **a.** Concentración vs tiempo; **b.** Velocidad vs tiempo; **c.** Velocidad vs concentración. (Concentración expresada como % de ácido acético, b.h.)

**Tabla 10.** Contenido promedio de acidez como ácido acético en el mucílago de café durante la fermentación, a temperatura ambiente.

Tiempo de Fermentación (h)	Acidez (%)	Acidez –Ajuste (%)	Error	Cuadrado del error
4	0,164 g	0,169	-0,005	0,000
8	0,243 f	0,213	0,030	0,001
20	0,373 e	0,378	-0,006	0,000
26	0,488 d	0,468	0,020	0,000
31	0,552 d	0,537	0,015	0,000
44	0,645 c	0,672	-0,027	0,001
52	0,688 abc	0,720	-0,032	0,001
68	0,758 ab	0,767	-0,009	0,000
74	0,818 a	0,775	0,043	0,002

Valores con letras distintas para la variable medida indican diferencias estadísticas según la prueba Duncan al 5%.

de alcohol en la fermentación del mucílago de café presenta, al igual que el crecimiento exponencial de microorganismos, una primera fase en la que la velocidad es relativamente lenta, seguida de una fase muy rápida hasta alcanzar un valor máximo, posteriormente la tasa disminuye hasta que se estabiliza

y en este punto las concentraciones del sustrato y de los productos prácticamente no varían.

Las ecuaciones obtenidas para expresar la degradación de los azúcares y la producción de etanol y acidez durante la fermentación

del mucílago de café sirven para estimar el contenido de azúcares totales y reductores, alcohol y acidez del mucílago, según el tiempo de fermentación, así como el porcentaje de degradación en un tiempo determinado y las velocidades de degradación y formación a temperatura ambiente.

Con estos datos cinéticos pueden establecerse controles para detener el proceso de fermentación, de tal forma que se evite la formación de defectos como el vinagre y se asegure la obtención de café de buena calidad. Al mismo tiempo, a los industriales les permite mejorar el diseño del fermentador, y así optimizar técnica y económicamente los tiempos de fermentación, según las condiciones del proceso.

La acidificación en la fermentación se desarrolla por las bacterias fermentadoras, principalmente las lácticas que producen ácido láctico y por el ácido acético, producido por bacterias y de la acetificación del alcohol.

Se recomienda establecer la medida de la acidez química como control en la fermentación del café, debido a que mientras más tiempo permanezcan los granos de café inmersos en los ácidos formados en la fermentación, mayores riesgos de producción de defecto vinagre y sabores agrios en la bebida de café.

### AGRADECIMIENTOS

A Sara Ríos A., Diana M. Muñoz N. y Kevin Hincapié V. Esta investigación fue financiada con recursos de la Federación Nacional de Cafeteros y hace parte de las actividades que se desarrollaron en el proyecto QIN0800, Caracterización y utilización del mucílago de café.

### LITERATURA CITADA

1. AGUIRRE B., F. La utilización industrial del grano de café y de sus subproductos. Guatemala : ICAITI, 1966. 33 p.
2. ARIAS, M.; RUIZ C., A.A. Fermentación alcohólica de mucílago de café con levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Ciencia y tecnología de alimentos 11(1):66-74. 2001.
3. AOAC. Official methods of analysis of AOAC international. 18a. ed. Gaithersburg : AOAC, 2006.
4. AVALLONE, S.; BRILLOUET, J.M.; GUYOT, B.; OLGUIN, E.; GUIRAUD, J.P. Involvement of pectolytic microorganisms in coffee fermentation. International journal of food science and technology 37:191-198. 2002.
5. AVALLONE, S.; BRILLOUET, J.M.; GUYOT, B.; BRILLOUET, J.M.; OLGUIN P., E.; GUIRAUD, J.P. Microbiological and biochemical study of coffee fermentation. Current microbiology 42:252-256. 2001.
6. BAEZA, J.J. Conceptos básicos de cinética química. [En línea]. Valencia : Universidad de Valencia, 1997. Disponible en internet: <http://www.uv.es/baeza/cqtema3.html>. Consultado en febrero de 2012.
7. BOONMEE, M.; LEKSAWASDI, N.; BRIDGE, W.; ROGERS, P.L. Batch and continuous culture of *Lactococcus lactis* NZ133: Experimental data and model development. [En línea]. Massachusetts : Lycos, 2002. Disponible en internet: <http://www.angelfire.com/falcon/fe604/Paper4.pdf>. Consultado en enero de 2012.
8. BROCK, T.D.; MADIGAN, M.T. Biology of microorganisms. 6a. ed. New Jersey : Prentice-Hall, 1991. 874 p.
9. BURGUILLO, F.J. Ajuste de ecuaciones a curvas: Introducción a la regresión lineal y no lineal. [En línea]. Salamanca : Universidad de Salamanca, 2003. Disponible en internet: <http://web.usal.es/~burgui/simfit/ajustecurvas.pdf>. Consultado en febrero de 2012.
10. CABRERA, S. DE; CALZADA, J.F.; GIL, L.A.; ARRIOLA, M.C. DE. Etanol de cerezas y mucílago de café. p. 129-137. En: SIMPOSIO Internacional sobre la utilización integral de los subproductos del café. (3 : Febrero 16-18 1987 : Guatemala). Guatemala : ICAITI : ANACAFE : PNUMA, 1987. 162 p.

11. CALLE V., H. Subproductos del café. Chinchiná : Cenicafé, 1977. 84 p. (Boletín Técnico No. 6). pH. [En línea]. Temuco : Universidad de La Frontera, 2000. Disponible en internet: <http://dungun.ufro.cl/~CyT/Reactores/descargables/Luedeking.pdf>. Consultado en enero de 2012.
12. ELIAS, L.G. Composición química de la pulpa de café y otros subproductos. p. 19-29. En: PULPA de café : Composición tecnología y utilización. Bogotá : CIID, 1978. 152 p.
13. GADEN, E.L. Fermentation process kinetics. [En línea]. Journal of biochemical and microbiological technology and engineering 1:413-429. 1959. Disponible en internet: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jbmt.390010407/abstract>. Consultado en enero de 2012.
14. GONZALES, L.; SAAVEDRA, Z.; BARBA, A.P.; LEÓN, A. DE. Cinética de la fermentación para la producción de mezcál. [En línea]. México : SMBB, {s.f.}. Disponible en Internet: [http://www.smbb.com.mx/congresos%20smbb/puertovallarta03/TRABAJOS/AREA\\_II/CARTEL/CII-48.pdf](http://www.smbb.com.mx/congresos%20smbb/puertovallarta03/TRABAJOS/AREA_II/CARTEL/CII-48.pdf). Consultado en enero de 2012.
15. HENAO, L.M.; CASTRILLON, J.; ARIAS, M. Fermentación láctica del mucílago de café. Ciencia y tecnología de alimentos 11(1):58-65. 2001.
16. JACKELS, S.C.; JACKELS, C.F. Characterization of the coffee mucilage fermentation process using chemical indicators: A field study in Nicaragua. Journal of food science 70(5):C321-C325. 2005.
17. JAKYMEC, M.; MORÁN, H.; PÁEZ, G.; FERRER, J.R.; MÁRMOL, Z.; RAMONES, E. Cinética de la producción de ácido láctico por fermentación sumergida con lactosuero como sustrato. [En línea]. Mérida : Universidad de Los Andes, {s.f.}. Disponible en internet: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/27444/2/articulo8.pdf>. Consultado en enero de 2012.
18. LANDSBERG, J.J. Some useful equations for biological studies. Experimental agriculture 13:273-286. 1977.
19. LEVENSPIEL, O. Ingeniería de las reacciones químicas. 3a. ed. México : Wiley, 2004. 638 p.
20. LÓPEZ G., C.I.; BAUTISTA R., E.; MORENO G., E.; DENTAN, E. Factors related to the formation of "overfermented coffee beans" during the wet processing method and storage of coffee. p. 373-384. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. (13 : Aout 21-25 1989 : Paipa). Paris : ASIC, 1989. 783 p.
21. LUEDEKING, R.; PIRET, E.L. A kinetic study of the lactic acid fermentation: Batch process at controlled pH. [En línea]. Temuco : Universidad de La Frontera, 2000. Disponible en internet: <http://dungun.ufro.cl/~CyT/Reactores/descargables/Luedeking.pdf>. Consultado en enero de 2012.
22. MENCHU E., J.F.; ROLZ, C. Coffee fermentation technology. Café cacao The 17(1):53-61. 1973.
23. PASSOS, F.V.; FLEMING, H.P.; OLLIS, D.F. Kinetics and modeling of lactic acid production by Lactobacillus plantarum. Maryland : NCBI, 1994. [En línea]. Disponible en internet: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC201694/pdf/aem00024-0431.pdf>. Consultado en marzo de 2012.
24. PAULETTI, M.S.; SANTA C., L.; MAZZA, G.; ROZYCKI, S.; SABBAG, N.; COSTA, S. Fabricación de yogur con bacterias inmovilizadas. [En línea]. México : REDALYC, 2004. Disponible en internet: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/724/72440307.pdf>. Consultado en enero de 2012.
25. PEE, W. VAN; CASTELEIN, J.M. Study of the pectinolytic microflora, particularly the enterobacteriaceae from fermenting coffee in the Congo. Journal of food science 37(1):171-174. 1972.
26. PEÑUELAM., A.E. Estudio de la remoción del mucílago de café a través de fermentación natural. Manizales : Universidad de Manizales, 2010. 82 p. Tesis: Magister en desarrollo sostenible y medio ambiente.
27. PUERTA Q., G.I. Fundamentos del proceso de fermentación en el beneficio del café. Chinchiná : Cenicafé, 2010. 12 p. (Avances Técnicos No. 402).
28. PUERTA Q., G.I. La humedad controlada del grano preserva la calidad del café. Chinchiná : Cenicafé, 2006. 8 p. (Avances Técnicos No. 352).
29. PUERTA Q., G.I. Riesgos para la calidad por la comercialización de café pergamino húmedo. Chinchiná : Cenicafé, 2008. 4 p. (Avances Técnicos No. 373).
30. PUERTA Q., G.I. Riesgos para la calidad y la inocuidad del café en el secado. Chinchiná : Cenicafé, 2008. 8 p. (Avances Técnicos No. 371).
31. PUERTA Q., G.I.; RIOSA, S. Composición química del mucílago de café, según el tiempo de fermentación y refrigeración. Cenicafé 62(2):23-40. 2011.
32. RODRÍGUEZ V., N.; RÍOS A., S. Caracterización del mucílago de café utilizado como materia prima para la producción de pectinas. En: INFORME anual de

actividades de investigación: Disciplina química industrial. Chinchiná : Cenicafé, 1999.

33. RODRÍGUEZ V., N.; ZAMBRANO F., D.A. Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. Chinchiná : Cenicafé, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 393).
34. ROLZ, C.; MENCHUE., J.F.; ESPINOSA, R.; GARCÍA P., A. Coffee fermentation studies. p. 259-269. En: COLLOQUE International sur la chimie des cafés. (5 : Junio 14-19 1971 : Lisboa). París : ASIC : 1971. 434 p.
35. TCHANA, E.; JACQUET, M.; GUYOT, B.; VINCENT, J.C. Etude de l'influence des conditions de fermentation sur les caractéristiques d'un café Arabica. p. 309-318. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. (11 : Fevrier 11-15 1985 : Lome). París : ASIC, 1985. 696 p.
36. SÁEZ V., A.A.; SOLARTE V., J.F.; SOLARTE M., A.M., HABEYCHN., D. Evaluación de un medio de cultivo a partir del fruto de prosopis juliflora. [En línea]. México : REDALYC, 2004. Disponible en internet: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/215/21513503.pdf>. Consultado en marzo de 2012.
37. SCHLEGEL, H.G. Microbiología general. Barcelona : Omega, 1979. 448 p.
38. ULLOA I., J.T.; RODRÍGUEZ C., J.A. El modelo logístico: Una alternativa para el estudio del crecimiento poblacional de organismos. [En línea]. Málaga : veterinaria.org, {s.f.}. Disponible en internet: <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n030310/031004.pdf>. Consultado en enero de 2012.
39. VERHULST, P.F. Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement. Correspondance mathématique et physique 10:113-121. 1838.

# COEFICIENTES PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DEL BRILLO SOLAR EN LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA

Orlando Guzmán Martínez\*, José Vicente Baldión Rincón\*, Ovidio Simbaqueva Fonseca\*\*,  
Henry Josué Zapata\*\*\*, César Chacón Cardona\*\*\*\*

---

**GUZMÁN M., O.; BALDIÓN R., J. V.; SIMBAQUEVA F., O.; ZAPATA, H. J.; CHACÓN C., C. Coeficientes para estimar la radiación solar global a partir del brillo solar en la zona cafetera colombiana. Revista Cenicafé 64(1): 60-76. 2013**

Se estudió una nueva relación entre la radiación solar global medida en una superficie horizontal y el número de horas de sol en 17 estaciones meteorológicas localizadas a lo largo y ancho de la zona cafetera colombiana, para el período 1988- 2002. La información a nivel diario se registró en un actinógrafo marca Belfort y en un heliógrafo ecuatorial tipo Campbell-Stokes, instalados según las normas de la Organización Meteorológica Mundial. Se realizaron correlaciones lineales entre el índice de claridad promedio mensual diario ( $RG/RA$ ) y el brillo solar relativo ( $n/N$ ) con la ecuación obtenida por Angström-Prescott aplicada a cada una de las estaciones, a los grupos geográficos conformados y a un solo grupo compuesto por todas las estaciones. El desempeño de los modelos obtenidos se evaluó a través de las pruebas estadísticas denominadas el error de sesgo medio, la raíz cuadrada del error cuadrático medio, el porcentaje medio del error, la diferencia porcentual y el estadístico  $t$ . En general, los modelos mostraron resultados satisfactorios y se pueden utilizar para la estimación de la radiación solar global en sitios donde solo se cuenta con datos de horas de brillo solar.

**Palabras clave:** Colombia, horas de brillo solar, análisis de regresión.

---

## GLOBAL SOLAR RADIATION COEFFICIENTS ESTIMATED FROM SOLAR SHINE IN THE COLOMBIAN COFFEE REGION

A new relationship between global solar radiation measured on a horizontal surface and sunshine duration was studied for 17 meteorological stations in the coffee growing zone of Colombia during the period 1998 – 2002. Daily information was taken through a Belfort pyranograph and a Campbell-Stokes heliograph following the recommendations of the World Meteorological Organization. Linear correlations were established between the monthly average daily clearness index ( $RG/RA$ ) and the relative possible sunshine hours ( $n/N$ ) to fit the Angström-Prescott equation for individual stations, geographical groups and the entire measured data of all the stations together. Estimated values were compared with measured values using the well known statistical tests such as the mean bias error, root mean square error, mean percentage error and the percentage difference in conjunction with the  $t$ -statistic. In general, all the models derived fitted the data adequately and can be used to estimate monthly mean daily global solar radiation in areas where only sunshine hours data are available.

**Keywords:** Colombia, bright sunshine hours, regression analysis.

---

\* Investigador Científico III (hasta 2010). Disciplina de Agroclimatología, Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé, Manizales, Caldas, Colombia.

\*\* Investigador. Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, D.C., Colombia.

\*\*\* Investigador. Unidad de Planeación Minero Energética. Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, D.C., Colombia.

\*\*\*\* Docente Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. Bogotá, D.C., Colombia.

La importancia de la radiación solar ha sido reconocida desde la antigüedad y hoy en día ofrece un gran potencial en una variada gama de aplicaciones como fuente de energía renovable limpia. Después de la crisis energética de los años 1970, el continuo aumento de los precios de la energía y los efectos ambientales adversos como la contaminación del aire, la disminución de la capa de ozono y el efecto de invernadero el uso de la energía solar ha recibido un renovado impulso en las dos últimas décadas.

La radiación solar se utiliza en campos tales como la arquitectura y el planeamiento urbano, agricultura y horticultura (optimización de la productividad, modelos de simulación), iluminación natural, térmica solar (calefacción, ventilación, calentamiento de agua), tratamiento de aguas (desinfección y desalinización), generación de electricidad (celdas fotovoltaicas, concentradores solares), entre otros, los cuales pueden también contribuir en la mitigación de la problemática del cambio climático al disminuir la emisión de gases de efecto de invernadero.

Para poder hacer uso de la radiación solar se requiere de su medición a través del tiempo, con equipos confiables como los piranómetros. No obstante, debido a su costo y frecuente calibración son pocas las series de datos que se encuentran disponibles en los distintos países y, en general, se recurre a su estimación a través del brillo solar (número de horas de sol). Esta última variable se mide con un equipo denominado heliógrafo, cuyo manejo es sencillo, confiable y hace parte de las estaciones climáticas que se encuentran ampliamente distribuidas en el mundo.

Angström en 1924 (2) encontró una buena relación lineal entre la radiación solar global

y el brillo solar, y propuso una ecuación para el cálculo de la radiación. Posteriormente, Prescott (22) le introdujo una modificación y desde entonces ha sido utilizada con éxito en distintos lugares del mundo (1, 3, 4, 6, 7, 8, 15, 17, 20, 21, 23).

El objetivo de este estudio fue la aplicación de la ecuación modificada de Angström para establecer los coeficientes de regresión a y b, de diferentes lugares, con base en los registros radiométricos y heliométricos medidos, de manera que a partir de ellos se pueda estimar la radiación solar global en una superficie horizontal, en cualquier sitio de la zona cafetera colombiana.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Instrumental e información.** La información de radiación solar global y brillo solar para el período 1998-2002 se registró en 17 estaciones climatológicas principales, ubicadas en predios de estaciones experimentales del Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé, que hacen parte del Servicio Meteorológico de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-FNC (9). Su localización en la geografía cafetera y sus registros mensuales se presentan en las Tablas 1 y 2.

La radiación solar global se midió en actinógrafos de registro diario tipo Belfort, cuyo sensor está constituido por dos láminas idénticas de metal, una pintada de negro y la otra altamente reflectiva, que captan la radiación en el rango de 360 – 2.000 nm (5).

Este instrumental se calibró cada 3 años con el patrón nacional del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y sus gráficas se evaluaron mediante un planímetro y el programa Autocad versión 2000, con errores

**Tabla 1.** Localización de las estaciones climáticas de estudio en la zona cafetera colombiana.

Estación	Municipio	Departamento	Latitud N		Longitud W		Altitud
			Grados	Minutos	Grados	Minutos	m
			10	25	73	34	1.134
San Antonio	Floridablanca	Santander	7	06	73	04	1.539
El Rosario	Venecia	Antioquia	5	58	75	42	1.635
Rafael Escobar	Supía	Caldas	5	27	75	38	1.307
Santa Helena	Marquetalia	Caldas	5	19	75	00	1.395
Santa Bárbara	Sasaima	Cundinamarca	4	56	74	25	1.478
La Trinidad	Libano	Tolima	4	54	75	02	1.456
Albán	El Cairo	Valle del Cauca	4	47	76	11	1.510
La Catalina	Pereira	Risaralda	4	45	75	44	1.321
Maracay	Quimbaya	Quindío	4	36	75	44	1.402
Paraguaicito	Buenavista	Quindío	4	24	75	44	1.203
La Sirena	Sevilla	Valle del Cauca	4	17	75	54	1.519
Manuel Mejía	El Tambo	Cauca	2	24	76	44	1.735
Jorge Villamil	Gigante	Huila	2	20	75	31	1.420
Ospina Pérez	Consacá	Nariño	1	15	77	29	1.603

por debajo del 5%, en el marco del trabajo Atlas de radiación solar de Colombia (13). El brillo solar se midió en un heliógrafo Campbell-Stokes tipo ecuatorial (18).

La exposición y altura del instrumental estuvo de acuerdo con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (28).

### Análisis

**Control de la calidad de los datos y generación de datos faltantes.** Para la radiación solar global y el brillo solar se adelantaron los siguientes pasos:

- Al tener como control que en la superficie no llega más del 85% de la radiación solar extraterrestre (efectos de absorción, dispersión y reflexión en la atmósfera) y que el brillo solar no puede exceder el valor máximo teórico posible, se contrastaron estos valores con sus correspondientes datos medidos.
- Para las estaciones con datos faltantes, éstos

se estimaron para períodos no superiores a 10 días consecutivos. El faltante no podía pertenecer a una racha de días donde no se disponía de información. Se consideró como mínimo contar con 600 días consecutivos de datos.

- Se obtuvo un modelo de Angström grado 3, de la forma como se presenta en la Ecuación <1>:

$$\frac{RG}{RA} = m_1 \left(\frac{n}{N}\right) + m_2 \left(\frac{n}{N}\right)^2 + m_3 \left(\frac{n}{N}\right)^3 + b$$

Ecuación <1>

Donde:

*RG* = Radiación solar global diaria, medida en el lugar (lecturas del actinógrafo)

*RA* = Radiación solar global diaria recibida en el límite de la atmósfera

*n* = Número de horas de sol en el sitio (medidas del heliógrafo)

*N* = Máximo número de horas de brillo solar diarias astronómicamente posible

*m1, m2, m3, b* = Coeficientes específicos de la regresión múltiple.

**Tabla 2.** Valores medios mensuales de brillo solar (horas) y radiación solar global ( $\text{MJ.m}^{-2}\text{-día}^{-1}$ ) en estaciones de la zona cafetera colombiana.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Pueblo Bello	8,5	7,6	6,7	5,7	5,2	5,8	6,6	6,2	5,3	5,5	6,6	6,9	6,4
	22,5	22,1	21,7	20,6	19,7	20,8	21,7	21,2	19,6	19,0	19,1	19,1	20,6
San Antonio	5,5	4,1	3,5	3,2	3,1	3,1	3,9	3,8	3,6	4,0	3,6	3,6	3,8
	14,8	13,6	13,7	13,2	12,9	13,1	13,7	13,7	13,7	14,0	12,6	12,0	13,4
El Rosario	6,4	5,0	5,1	4,5	4,9	5,8	6,6	6,5	4,6	4,4	4,5	4,2	5,2
	16,9	15,1	15,9	14,8	15,6	16,5	17,8	17,3	15,1	14,3	14,2	13,7	15,6
Rafael Escobar	6,4	5,0	4,7	5,0	4,7	5,3	6,2	6,6	4,9	5,1	4,8	4,9	5,3
	18,3	17,3	17,2	17,4	16,5	16,5	17,5	18,4	17,1	17,2	16,1	15,8	17,1
Santa Helena	4,3	2,9	2,8	3,1	4,2	4,2	6,0	6,3	4,4	4,1	3,6	3,0	4,1
	12,9	11,7	11,8	11,6	13,3	13,1	15,3	16,1	13,8	13,1	12,0	11,1	13,0
Santa Bárbara	4,4	3,3	2,9	3,1	3,4	3,7	4,6	4,6	3,6	4,1	3,8	3,3	3,7
	14,5	13,9	13,5	13,8	14,5	14,0	16,0	14,6	13,9	15,2	14,0	13,3	14,3
La Trinidad	3,7	3,4	3,4	3,3	3,7	4,3	5,5	6,3	4,3	4,4	3,3	3,2	4,1
	13,5	13,7	14,3	14,0	14,1	14,9	16,6	18,1	15,8	15,5	13,2	12,6	14,7
Albán	4,1	3,7	3,6	3,8	3,8	4,4	5,2	5,6	4,1	4,2	3,2	3,0	4,1
	13,4	13,4	14,7	15,2	14,9	15,5	16,7	16,7	15,0	14,4	12,7	12,2	14,6
La Catalina	5,5	4,4	4,1	3,6	3,5	4,0	5,1	5,5	3,8	4,4	4,0	4,3	4,3
	17,0	16,3	15,6	15,2	14,3	15,0	16,2	17,0	15,2	15,9	14,9	14,6	15,6
Maracay	5,1	4,1	4,0	3,6	3,6	3,9	5,2	5,9	3,8	4,4	3,6	3,7	4,2
	15,3	14,7	15,0	14,3	13,7	14,0	15,5	16,4	14,3	15,0	13,4	13,2	14,6
Paraguaicito	5,5	4,6	4,2	3,8	3,8	4,1	5,1	5,4	3,8	4,4	4,0	4,1	4,4
	16,8	16,2	16,4	15,9	14,5	14,9	16,1	16,4	15,6	15,8	14,6	14,0	15,6
La Sirena	4,0	3,4	3,0	3,0	3,0	3,5	4,5	5,2	3,5	3,7	3,1	3,6	3,6
	13,2	12,8	12,8	12,9	12,7	13,2	14,3	15,1	13,2	12,8	11,8	12,0	13,1
Manuel Mejía	5,1	4,7	4,2	3,9	4,0	3,5	5,4	6,3	4,2	4,6	3,6	4,4	4,5
	16,0	16,1	16,2	15,8	14,8	14,8	16,1	17,3	15,2	16,2	14,1	14,9	15,6
Jorge Villamil	4,2	3,3	2,7	2,8	2,6	3,0	2,8	3,3	3,4	3,5	3,2	3,3	3,2
	15,3	14,1	13,2	13,8	13,2	14,2	13,9	14,4	15,0	14,7	14,3	13,9	14,2
Ospina Pérez	4,4	3,9	3,5	3,7	3,7	4,4	5,2	6,1	4,6	5,1	4,3	4,4	4,4
	14,9	14,3	14,3	14,5	14,2	13,9	15,5	16,7	15,7	16,6	15,3	14,9	15,1

Posteriormente, se determinó el error estándar de la estimación, para depurar los datos diarios que presentaron una dispersión mayor al error estándar. Los datos faltantes y aquellos que se apartaron del valor estimado del error estándar, se reemplazaron por los valores obtenidos con la regresión polinómica.

Para finalizar se hizo otra depuración al promedio diario de la serie con una regresión lineal (modelo Angström de primer grado) con su correspondiente prueba de F al 0,01.

**Estimación de los coeficientes de regresión  $a$  y  $b$ .** Para la estimación de los coeficientes  $a$  y  $b$  se utilizó la ecuación modificada de

Angström de primer grado, que relaciona la radiación global solar con el brillo solar a través de la Ecuación <2>:

$$\frac{RG}{RA} = \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad \text{Ecuación <2>}$$

Donde:

*RG* es la radiación solar global medida en la estación; *RA* es la radiación solar global extraterrestre recibida en un plano horizontal para un día determinado sobre la localización deseada; *n* es el número de horas de brillo solar medido en la superficie; *N* es la duración del día obtenida a partir de consideraciones astronómicas; *a* y *b* son los coeficientes de regresión de un modelo lineal simple, entre *RG/RA* y *n/N*, determinados por mínimos cuadrados. *RA* y *N* se obtuvieron considerando la posición geográfica del lugar, la declinación solar, el ángulo horario para la salida del sol y la constante solar; éstas se derivaron de acuerdo con la metodología utilizada por Guzmán *et al.* (11).

Con las series de cada una de las estaciones se obtuvieron la radiación solar global y las horas de duración del sol medias diarias, con esta información se estableció la relación lineal entre el denominado índice de claridad *RG/RA* y la duración relativa posible del brillo solar *n/N*. En cada estación se determinó el intervalo para cada uno de los coeficientes de regresión, con un coeficiente de confianza del 95%, y se evaluó la posible agrupación de estaciones por igualdad estadística de los modelos, de acuerdo con la prueba F al 5%.

La bondad de los modelos obtenidos se examinó de acuerdo con las siguientes medidas estadísticas que son recomendadas en la comparación de ecuaciones que estiman la radiación solar global (1, 12, 14, 16, 26):

- El error de sesgo medio (*ESM*), que se refiere al error sistemático, sus valores

positivos indican una sobrestimación, los negativos una subestimación y se expresa mediante la Ecuación <3>:

$$M = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (RGe - RGm)}{n} \right] \quad \text{Ecuación <3>}$$

Donde:

*ESM*: Error de sesgo medio.

*RGe*: Radiación solar global estimada (MJ.m<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup>)

*RGm*: Radiación solar global medida en la estación (MJ.m<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup>)

*n*: Número de observaciones

El error porcentual medio (*EPM*), es una medida global de la precisión de la estimación y desviaciones de ± 10% son aceptables (12) (Ecuación <4>):

$$EPM = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{RGm - RGe}{RGm} \right\} \cdot 100}{n} \right] \quad \text{Ecuación <4>}$$

Donde:

*EPM*: Error porcentual medio

*RGe*: Radiación solar global estimada (MJ.m<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup>)

*RGm*: Radiación solar global medida en la estación (MJ.m<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup>)

*n*: Número de observaciones.

Estos dos tipos de errores permiten visualizar si hay sobreestimación o subestimación de los datos y los valores bajos indican un buen ajuste del modelo.

La raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) muestra la variación de las estimaciones con respecto a los datos registrados, es siempre positivo y es deseable que esté cerca de cero, su expresión se presenta en la Ecuación <5>.

$$RECM = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (RGe - RGm)^2}{n} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación <5>}$$

Donde:

*RECM*: Raíz cuadrada del error cuadrático medio

*RGe*: Radiación solar global estimada (MJ.m<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup>)

*RGm*: Radiación solar global medida en la estación (MJ.m<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup>)

*n*: Número de observaciones

El estadístico *t* permite la comparación objetiva de los modelos, establece la significancia estadística y entre más pequeño sea su valor, mejor es el desempeño de un modelo. Éste calculó mediante la Ecuación <6>:

$$t = \left[ \frac{(n-1) \cdot ESM^2}{RECM^2 - ESM^2} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación <6>}$$

Los modelos obtenidos por grupos geográficos y el de todas las estaciones reunidas, así como los derivados en dos países tropicales como Ruanda (*RG/RA* = 0,242 + 0,641) (24) y Venezuela (*RG/RA* = 0,263 + 0,344) (1), y la ecuación estimada para Cenicafé (Manizales, Caldas) (*RG/RA* = 0,261 + 0,506) (10), se emplearon para

evaluar su desempeño con respecto a los datos promedios mensuales diarios medidos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

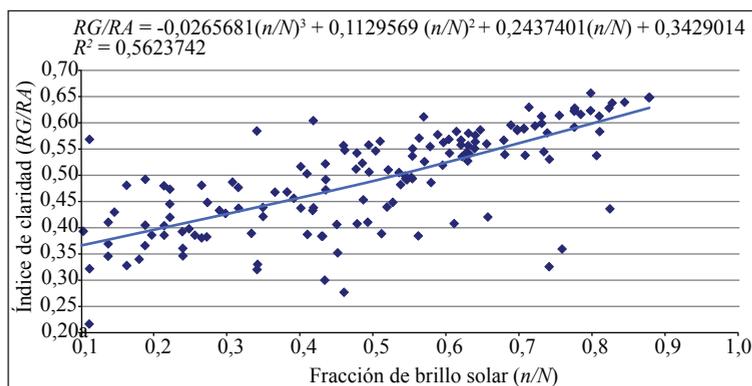
**Depuración de la información.** En la Figura 1 se ilustra un ejemplo con la estación Albán (El Cairo, Valle), donde inicialmente se aprecian los datos en su dispersión original con el modelo de Angström de tercer grado y un coeficiente de determinación de 0,562.

Los registros diarios se depuraron, descartando aquellos valores incompletos o dudosos, que quedaron por fuera del rango de una desviación estándar (Figura 2).

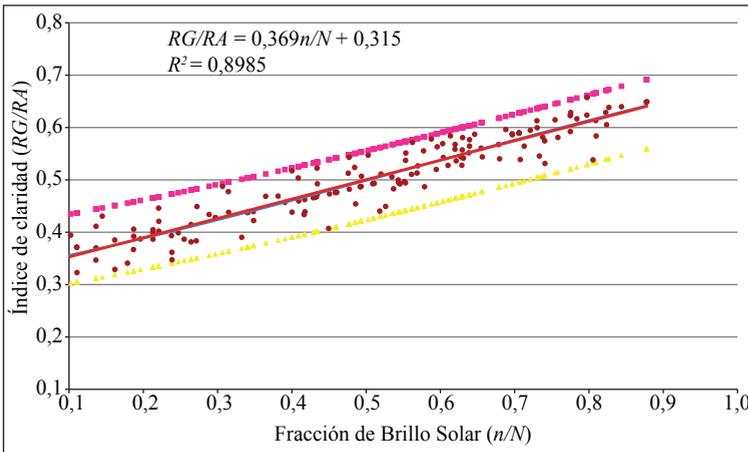
Finalmente, en la Figura 3 con los promedios diarios de la serie se efectuó una nueva depuración, utilizando el modelo de Angström de primer grado.

Este procedimiento se realizó en cada una de las 17 estaciones componentes del estudio, hasta obtener registros depurados y confiables para realizar las otras determinaciones.

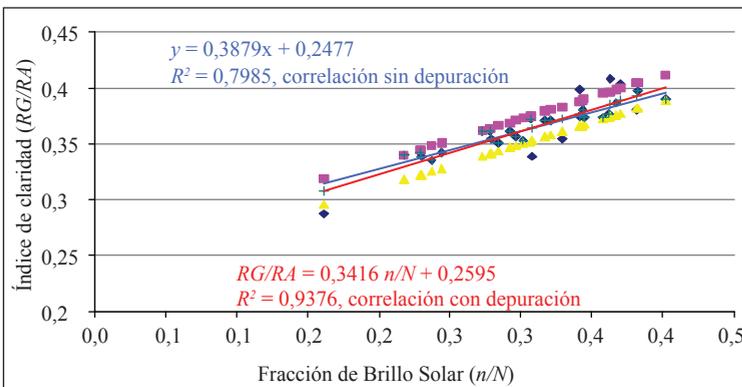
**Selección de estaciones y regresiones obtenidas por estación.** Después de la verificación y complementación de las series de radiación para el período 1998



**Figura 1.** Variación de los datos de radiación y brillo solar con el modelo de Angström grado 3, en la estación Albán (El Cairo, Valle).



**Figura 2.** Primera depuración de los datos diarios de radiación y brillo solar en la estación Albán (El Cairo, Valle).



**Figura 3.** Modelo Angström de primer grado, para la segunda depuración de los datos de radiación y brillo solar, en la estación Albán (El Cairo, Valle).

– 2002, se identificó heterogeneidad en la información de las estaciones Gabriel M. Barriga y Alberto Santos atribuida a datos erróneos y por ello se descartaron en este estudio. Para las quince estaciones restantes se estableció la relación entre la fracción de radiación solar global ( $RG/RA$ ) y la fracción de brillo solar ( $n/N$ ) aplicando la fórmula modificada de Angström y el uso del programa estadístico SAS (25).

En la Tabla 3, para cada una de las localidades aparecen los coeficientes  $a$  y  $b$  cuyos valores fluctuaron entre 0,193 y 0,306 el primero y desde 0,404 hasta 0,602 el segundo. No se observa en su variación

ninguna dependencia de la latitud o la altitud. Estos valores se encuentran dentro de los rangos encontrados en distintos trabajos a través del mundo (10, 19).

El coeficiente  $b$  de la regresión es diferente de cero según el estadístico de prueba  $t$  al 5% e indica su significancia estadística y la estrecha relación entre las dos variables analizadas. Los altos coeficientes de determinación (0,717 – 0,968) fueron estadísticamente significativos. En la Figura 4 se ilustra la variación del coeficiente  $b$  para las quince estaciones estudiadas y allí se visualiza la posibilidad de efectuar algunos agrupamientos por localidades.

**Tabla 3.** Coeficientes de regresión para índices de radiación ( $RG/RA$ ) y brillo solar ( $n/N$ ) medios mensuales en 15 estaciones de la zona cafetera colombiana.

Estación	$a$	L.I.	L.S.	$b$	L.I.	L.S.	$R^2$
Pueblo Bello	0,306	0,276	0,337	0,516	0,45941	0,57168	0,854
San Antonio	0,239	0,225	0,252	0,436	0,39473	0,47768	0,884
El Rosario	0,193	0,172	0,214	0,559	0,51150	0,60661	0,905
Rafael Escobar	0,296	0,277	0,315	0,408	0,36695	0,44966	0,871
Santa Helena	0,214	0,204	0,223	0,436	0,40881	0,46275	0,948
Santa Bárbara	0,210	0,184	0,237	0,602	0,51781	0,68512	0,781
La Trinidad	0,251	0,243	0,259	0,466	0,44418	0,48881	0,968
Albán	0,250	0,230	0,270	0,458	0,39944	0,51716	0,807
La Catalina	0,277	0,265	0,289	0,435	0,40198	0,46810	0,923
Maracay	0,263	0,253	0,263	0,404	0,37703	0,43177	0,938
Paraguaicito	0,277	0,261	0,294	0,427	0,38363	0,46964	0,872
La Sirena	0,239	0,227	0,252	0,414	0,37297	0,45417	0,878
Manuel Mejía	0,270	0,249	0,292	0,436	0,37955	0,49141	0,807
Jorge Villamil	0,257	0,233	0,281	0,531	0,44317	0,61844	0,717
Ospina Pérez	0,239	0,218	0,259	0,484	0,42917	0,53843	0,844

L.I.: Límite inferior al 95%; L.S.: Límite superior al 95%.

### Regresiones por modelos agrupados.

Partiendo de las constantes de regresión  $a$  y  $b$ , la dispersión registrada en la Figura 4 y la ubicación geográfica de cada estación (Tabla 1), se definieron cuatro grupos a saber:

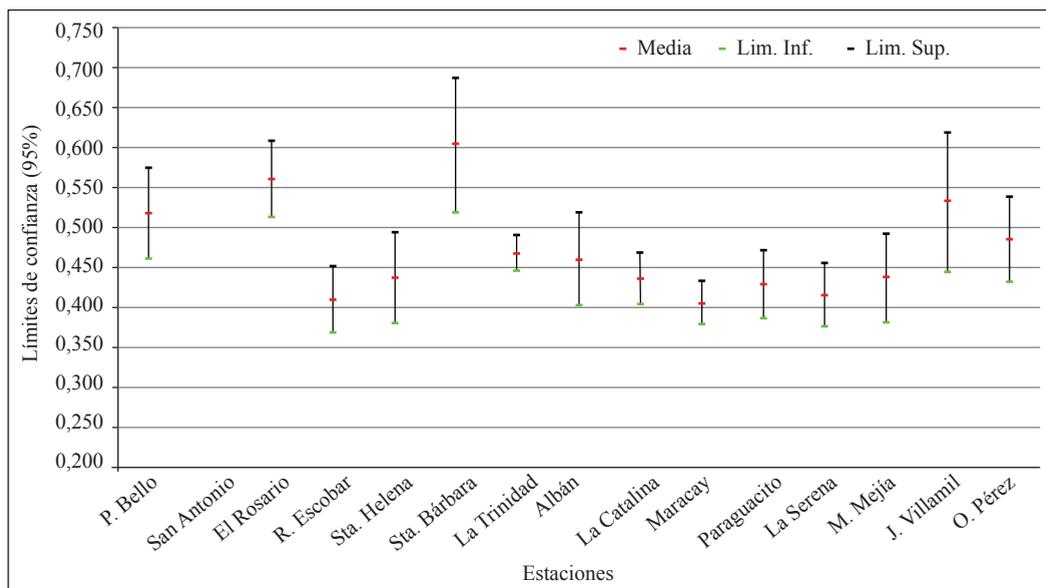
- Grupo 1: Zona Norte, constituido por las estaciones Pueblo Bello, San Antonio y El Rosario.
- Grupo 2: Zona Central Andina, que comprende las estaciones Rafael Escobar, Santa Helena, Albán, La Catalina, Maracay, Paraguaicito y La Sirena.
- Grupo 3: Cordillera Oriental, vertiente occidental, con las estaciones Santa Bárbara y Jorge Villamil.
- Grupo 4: Zona Sur, integrado por las estaciones La Trinidad, Manuel Mejía y Ospina Pérez.

Con la información de los promedios mensuales diarios del índice de claridad ( $RG/RA$ ) y el brillo solar relativo ( $n/N$ ) se estimaron las ecuaciones para cada grupo conformado, y para un grupo adicional que reunió todas las 15 estaciones.

En la Tabla 4 se registran las características de las regresiones obtenidas. El coeficiente  $a$  de las regresiones varió entre 0,167 y 0,253, mientras que el coeficiente  $b$  se movió de 0,464 a 0,696 y fueron igualmente significativos al 5%. Los coeficientes de determinación fueron estadísticamente significativos con valores entre 0,675 y 0,871.

En las Tablas 5 a la 9 se registra el desempeño de los diferentes modelos aplicados a las estaciones representativas en comparación con los datos medidos.

La radiación solar global estimada con la fórmula de Ruanda  $RG/RA = 0,242 +$



**Figura 4.** Coeficiente b para la fórmula Angström-Prescott con sus respectivos límites de confianza al 95%, en estaciones de la zona cafetera colombiana.

**Tabla 4.** Coeficientes de regresión para índices de radiación ( $RG/RA$ ) y brillo solar ( $n/N$ ) medios mensuales para agrupaciones geográficas y todas las estaciones en la zona cafetera colombiana.

Agrupación	Estación	a	L.I.	L.S.	b	L.I.	L.S.	R <sup>2</sup>
Zona norte	Pueblo Bello, San Antonio, El Rosario	0,167	0,146	0,187	0,696	0,65024	0,74222	0,834
Zona central andina	Rafael Escobar, Santa Helena, Albán, La Catalina, Maracay, Paraguaicito, La Sirena	0,234	0,224	0,243	0,497	0,47142	0,52285	0,776
Cordillera Oriental	Santa Bárbara, Jorge Villamil	0,249	0,230	0,269	0,515	0,43759	0,49032	0,675
Zona sur	La Trinidad, Manuel Mejía, Ospina Pérez	0,253	0,243	0,263	0,464	0,44987	0,58015	0,871
Única	Todas	0,221	0,214	0,228	0,553	0,534	0,572	0,790

L.I. = Límite inferior; L.S. = Límite superior

0,641 ( $n/N$ ) registró un buen acuerdo con los datos medidos, solamente en la estación de Pueblo Bello perteneciente a la zona norte, donde la relación fue significativa ( $t$  estimado = 0,2 menor que el  $t$  crítico = 2,2) y los valores de  $ESM$ ,  $RECM$  y  $EPM$  fueron bajos. Este comportamiento se atribuye a que la suma de los coeficientes

$a$  y  $b$  es muy parecido, con valores de 0,883 en Ruanda y de 0,863 en Pueblo Bello. Varios autores han encontrado que la similitud en esta sumatoria permite que las regresiones obtenidas en unas condiciones climáticas particulares puedan ser extrapoladas a otras regiones, con buenos resultados (1, 7, 17).

**Tabla 5.** Valores de radiación solar global medida y estimada ( $\text{MJ.m}^{-2}\text{-día}^{-1}$ ) con sus correspondientes valores del error de sesgo medio (*ESM*), error porcentual medio (*EPM*), raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) y los errores porcentuales en la estación Pueblo Bello.

Meses	RG estimada						Error porcentual					
	RG medida	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	
Enero	22,5	16,5	22,9	20,3	21,8	20,1	26,7	-1,5	10,0	3,3	10,7	
Febrero	22,1	16,7	22,7	20,3	21,3	20,0	24,1	-2,7	8,0	3,4	9,5	
Marzo	21,7	16,8	22,2	20,1	20,6	19,6	22,3	-2,5	7,2	5,0	9,5	
Abril	20,6	16,1	20,6	18,9	18,7	18,2	21,9	0,1	8,2	9,2	11,6	
Mayo	19,7	15,3	19,2	17,8	17,2	17,0	22,2	2,5	9,6	12,4	13,5	
Junio	20,8	15,6	19,9	18,3	18,1	17,6	24,8	4,2	11,9	13,1	15,2	
Julio	21,7	16,5	21,5	19,5	19,7	19,0	24,0	1,0	9,8	8,9	12,5	
Agosto	21,2	16,4	21,2	19,3	19,4	18,7	22,9	0,2	8,9	8,6	11,7	
Septiembre	19,6	15,3	19,3	17,8	17,4	17,1	22,0	1,6	9,1	11,2	12,8	
Octubre	19,0	14,9	19,1	17,6	17,4	16,9	21,2	-0,8	7,5	8,3	10,8	
Noviembre	19,1	15,0	19,8	17,9	18,4	17,5	21,5	-4,0	6,0	3,5	8,2	
Diciembre	19,1	14,6	19,5	17,5	18,2	17,2	23,6	-2,1	8,0	4,7	9,9	
<i>ESM</i>		-4,8	0,1	-1,8	-1,6	-2,3						
<i>RECM</i>		4,8	0,5	1,8	1,7	2,4						
<i>EPM</i>		23,1	-0,4	8,7	7,6	11,3						
<i>Estadístico t</i>		8,5	0,2	5,1	2,3	5,6						

**Tabla 6.** Radiación solar global medida y estimada ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ ) con sus correspondientes valores del error de sesgo medio (*ESM*), error porcentual medio (*EPM*), raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) y los errores porcentuales en la estación Rafael Escobar:

Meses	RG medida	RG estimada						Error porcentual			
		Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström
Enero	18,3	15,4	20,2	18,3	17,3	17,9	16,1	-10,2	0,0	5,9	2,6
Febrero	17,3	14,7	18,5	17,1	16,0	16,4	14,6	-7,4	0,6	7,1	4,8
Marzo	17,2	14,9	18,5	17,2	16,1	16,4	13,0	-7,9	-0,5	6,2	4,2
Abril	17,4	15,2	19,0	17,6	16,5	16,9	12,7	-9,2	-1,3	5,3	3,1
Mayo	16,5	14,4	17,8	16,6	15,5	15,8	12,7	-7,9	-0,7	6,1	4,2
Junio	16,5	14,6	18,4	17,0	15,9	16,3	11,7	-11,3	-2,9	3,7	1,3
Julio	17,5	15,6	20,2	18,4	17,3	17,9	11,0	-15,3	-5,2	1,2	-1,9
Agosto	18,4	16,5	21,6	19,6	18,5	19,1	10,4	-17,4	-6,6	-0,3	-3,7
Septiembre	17,1	15,0	18,7	17,4	16,3	16,6	12,4	-9,4	-1,5	5,1	3,0
Octubre	17,2	14,9	18,8	17,4	16,3	16,7	13,1	-9,4	-1,1	5,4	3,1
Noviembre	16,1	13,9	17,4	16,1	15,1	15,4	13,8	-7,6	0,1	6,7	4,6
Diciembre	15,8	13,6	17,0	15,8	14,7	15,1	14,0	-7,8	0,1	6,6	4,4
<i>ESM</i>		-2,2	1,7	0,3	-0,8	-0,4					
<i>RECM</i>		2,2	1,8	0,5	0,9	0,6					
<i>EPM</i>		13,0	-10,0	-1,5	4,9	2,5					
<i>Estadístico t</i>		8,0	2,9	0,7	2,3	0,9					

**Tabla 7.** Radiación solar global medida y estimada ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ ) con sus correspondientes valores del error de sesgo medio (*ESM*), error porcentual medio (*EPM*), raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) y los errores porcentuales en la estación Paraguaito.

Meses	RG estimada						Error porcentual					
	RG medida	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	
Enero	16,8	14,6	18,7	17,2	16,1	16,5	13,1	-11,1	-2,0	4,4	1,7	
Febrero	16,2	14,4	17,8	16,6	15,5	15,8	11,3	-9,7	-2,3	4,6	2,6	
Marzo	16,4	14,4	17,5	16,5	15,3	15,6	12,3	-6,7	-0,3	6,6	5,1	
Abril	15,9	13,9	16,6	15,7	14,6	14,8	12,6	-4,4	1,1	8,1	7,1	
Mayo	14,5	13,4	16,0	15,1	14,0	14,2	7,5	-10,3	-4,6	2,9	1,8	
Junio	14,9	13,3	16,0	15,1	14,0	14,2	10,9	-7,5	-1,4	5,7	4,3	
Julio	16,1	14,4	18,0	16,7	15,6	16,0	10,5	-12,2	-4,0	2,8	0,5	
Agosto	16,4	15,2	19,3	17,8	16,6	17,1	7,5	-17,3	-8,1	-1,2	-3,9	
Septiembre	15,6	13,8	16,6	15,7	14,6	14,7	11,2	-6,2	-0,6	6,6	5,4	
Octubre	15,8	14,3	17,5	16,4	15,3	15,6	9,8	-10,7	-3,6	3,4	1,7	
Noviembre	14,6	13,3	16,0	15,1	14,1	14,3	9,3	-9,8	-3,4	3,8	2,4	
Diciembre	14,0	12,9	15,7	14,8	13,8	14,0	7,7	-12,1	-5,4	1,9	0,3	
<i>ESM</i>		-1,4	1,5	0,4	-0,6	-0,4						
<i>RECM</i>		1,7	1,6	0,6	0,8	0,6						
<i>EPM</i>		10,3	-9,8	-2,9	4,1	2,4						
<i>Estadístico t</i>		1,7	2,9	1,2	1,7	0,9						

**Tabla 8.** Radiación solar global medida y estimada  $MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$  con sus correspondientes valores del error de sesgo medio (*ESM*), error porcentual medio (*EPM*), raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) y los errores porcentuales en la estación Santa Bárbara.

Meses	RG medida	RG estimada					Error porcentual				
		Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström
Enero	14,5	13,5	16,6	15,5	15,2	14,7	7,3	-14,2	-6,7	-4,6	-1,4
Febrero	13,9	13,0	15,3	14,6	14,2	13,6	6,3	-9,9	-5,0	-2,6	2,0
Marzo	13,5	13,0	14,9	14,4	14,0	13,3	3,4	-10,8	-7,0	-4,2	1,0
Abril	13,8	13,2	15,2	14,6	14,3	13,6	4,8	-10,1	-5,9	-3,2	1,7
Mayo	14,5	13,0	15,3	14,6	14,2	13,6	10,1	-5,4	-0,8	1,6	6,0
Junio	14,0	12,9	15,4	14,6	14,3	13,7	7,5	-9,8	-4,3	-2,0	2,2
Julio	16,0	13,9	17,1	16,0	15,7	15,2	12,9	-7,2	-0,2	1,7	4,8
Agosto	14,6	14,4	17,7	16,5	16,2	15,7	1,6	-21,2	-13,2	-11,1	-7,7
Septiembre	13,9	13,6	16,2	15,4	15,0	14,4	2,1	-16,1	-10,3	-7,8	-3,4
Octubre	15,2	13,9	16,9	15,9	15,6	15,0	8,3	-11,2	-4,6	-2,4	1,1
Noviembre	14,0	13,0	15,6	14,7	14,4	13,9	7,2	-11,3	-5,3	-3,0	0,9
Diciembre	13,3	12,1	14,2	13,6	13,2	12,7	8,8	-7,1	-2,2	0,2	4,5
<i>ESM</i>		-1,0	1,6	0,8	0,4	-0,1					
<i>RECM</i>		1,1	1,7	0,9	0,7	0,5					
<i>EPM</i>		6,7	-11,3	-5,5	-3,1	1,0					
<i>Estadístico t</i>		1,9	2,7	1,5	0,9	0,3					

**Tabla 9.** Radiación solar global medida y estimada ( $\text{MJ.m}^{-2}\text{-día}^{-1}$ ) con sus correspondientes valores del error de sesgo medio (*ESM*), error porcentual medio (*EPM*), raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) y los errores porcentuales en la estación Manuel Mejía.

Meses	<i>RG</i> medida					<i>RG</i> estimada					Error porcentual				
	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström
Enero	16,0	14,5	18,3	16,9	16,2	16,0	16,2	16,2	16,2	16,2	9,1	-14,5	-5,8	-0,1	-1,5
Febrero	16,1	14,7	18,2	17,0	16,2	16,1	16,2	16,2	16,2	16,2	8,8	-13,2	-5,4	0,2	-0,4
Marzo	16,2	14,5	17,7	16,6	15,7	15,8	15,7	15,7	15,7	15,7	10,1	-9,5	-2,8	2,5	2,6
Abril	15,8	13,9	16,8	15,8	14,9	15,0	14,9	14,9	14,9	14,9	12,1	-5,7	0,2	5,3	5,9
Mayo	14,8	13,4	16,1	15,2	14,3	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3	9,6	-8,8	-2,7	2,6	3,2
Junio	14,8	12,5	14,7	14,0	13,1	13,3	13,1	13,1	13,1	13,1	15,6	0,4	5,1	9,8	11,2
Julio	16,1	14,4	18,2	16,8	16,2	15,9	16,2	16,2	16,2	16,2	10,5	-13,3	-4,5	1,2	-0,3
Agosto	17,3	16,0	20,8	19,0	18,4	17,9	18,4	18,4	18,4	18,4	7,4	-20,6	-9,9	-3,6	-6,6
Septiembre	15,2	14,3	17,3	16,3	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	6,3	-13,9	-7,0	-1,5	-1,3
Octubre	16,2	14,7	18,1	16,9	16,1	16,0	16,1	16,1	16,1	16,1	9,5	-12,0	-4,4	1,2	0,6
Noviembre	14,1	13,1	15,6	14,8	13,9	14,1	13,9	13,9	13,9	13,9	6,8	-10,9	-5,3	0,0	1,2
Diciembre	14,9	13,5	16,6	15,6	14,8	14,7	14,8	14,8	14,8	14,8	9,3	-11,4	-4,2	1,3	1,1
<i>ESM</i>		-1,5	1,7	0,6	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2					
<i>RECM</i>		1,5	1,9	0,9	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7					
<i>EPM</i>		9,6	-11,0	-3,9	1,6	1,6	1,3	1,3	1,3	1,3					
<i>Estadístico t</i>		4,1	2,1	1,0	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3					

El modelo de Venezuela  $RG/RA = 0,263 + 0,344 (n/N)$  tuvo un adecuado desempeño en las estaciones de San Antonio y El Rosario (Grupo 1), Paraguaicito (Grupo 2) y Santa Bárbara (Grupo 3). Los valores negativos de *ESM* mostraron una subestimación de la radiación y los errores porcentuales máximos estuvieron entre 9,8% y 13,1%.

El modelo de Cenicafé  $RG/RA = 0,261 + 0,506 n/N$  obtenido con registros de la zona cafetera, presentó buenos resultados en las estaciones de los Grupos 2, 3 y 4, con valores bajos de *ESM* y *RECM* y errores porcentuales medios alrededor del 5%. Sin embargo, no se constituyó en una buena opción para las estaciones de Pueblo Bello, San Antonio y El Rosario situadas en la parte norte (Grupo 1), debido a que sus valores del estadístico *t* no fueron significativos.

Los modelos derivados para cada una de las agrupaciones geográficas y el correspondiente a la reunión de todas las estaciones se presentan en las Ecuaciones <7>, <8>, <9>, <10> y <11>.

Grupo 1 (estaciones Pueblo Bello, San Antonio y El Rosario):

$$RG/RA = 0,167 + 0,696 (n/N) \text{ <7>}$$

Grupo 2 (estaciones Rafael Escobar, Santa Helena, Albán, La Catalina, Maracay, Paraguaicito y La Sirena):

$$RG/RA = 0,234 + 0,497 (n/N) \text{ <8>}$$

Grupo 3 (estaciones Santa Bárbara y Jorge Villamil):

$$RG/RA = 0,249 + 0,515 (n/N) \text{ <9>}$$

Grupo 4 (estaciones La Trinidad, Manuel Mejía y Ospina Pérez):

$$RG/RA = 0,253 + 0,464 (n/N) \text{ <10>}$$

Todas las estaciones:

$$RG/RA = 0,221 + 0,553 (n/N) \text{ <11>}$$

Los modelos de los grupos 2, 3 y 4 y el de todas las estaciones fueron los de mejor ajuste, lo que se reflejó en sus valores más bajos de *ESM* (-0,6 a 0,4), *RECM* (0,5 a 0,9) y errores porcentuales promedios inferiores al 5% (Tablas 5 a la 9). En general, se observó una ligera tendencia a la subestimación de la radiación solar global a través de los valores negativos del *ESM*.

En cuanto al grupo 1 estos dos modelos dieron resultados contrastantes. Por ejemplo, en la estación Pueblo Bello no fueron significativos, lo cual es un indicativo de la existencia de condiciones climáticas diferentes a las de las otras estaciones estudiadas. En efecto, allí se recibe una notable mayor radiación solar global media de 20,6 MJ MJ.m<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup> favorecida por su régimen monomodal de la lluvia. En las otras estaciones, la radiación es menor y fluctúa entre 13,4 y 17,1 MJ.m<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup> valor característico de zonas montañosas de media ladera, con abundante nubosidad a lo largo del año, donde es común encontrar que el promedio de la duración del brillo solar no sobrepase el 50% del máximo astronómico posible (Tabla 2). Mientras que en la estación El Rosario de este mismo grupo, es posible utilizar solo el modelo de la agrupación geográfica que tiene desviaciones máximas alrededor del 10% y en la estación San Antonio pueden usarse los dos modelos con razonable precisión.

El limitado desempeño de los modelos de

los países tropicales de Ruanda y Venezuela, en la mayor parte de la zona cafetera, confirma que las constantes  $a$  y  $b$  de la regresión están influenciadas por el sitio y conviene contar con datos locales de radiación y brillo solar para conseguir estimaciones de mejor precisión (1, 10, 19).

De los dos modelos derivados para la zona cafetera (grupos geográficos y todas las estaciones) se podría utilizar cualquiera de ellos, pero el de una sola ecuación ( $RG/RA = 0,221 + 0,553 (n/N)$ ) presenta una ventaja práctica de uso. A éstos se une la alternativa de utilizar el modelo de Cenicafé obtenido en un trabajo anterior ( $RG/RA = 0,261 + 0,506 (n/N)$ ) que es igualmente de una sola fórmula (10).

En la estación de Pueblo Bello, de la región norte del país, donde ninguno de los modelos ensayados se ajustó, lo adecuado es emplear la ecuación obtenida para el mismo sitio que tiene la expresión  $RG/RA = 0,306 + 0,516 (n/N)$  y extenderla a su zona de influencia cafetera en la Sierra Nevada de Santa Marta y posiblemente en la Serranía de Perijá.

El cálculo de la radiación solar global en la zona cafetera colombiana, con base en los coeficientes  $a$  y  $b$  obtenidos en este trabajo, debe considerarse como un primer acercamiento a los valores reales, considerando que las series de datos utilizados fueron cortas (5 años), y además, hay que tener en cuenta que los actinógrafos por su fabricación y menor precisión, solamente permiten obtener estimaciones a nivel diario.

Se recomienda en las mediciones de la radiación solar global en la zona cafetera el uso de piranómetros, que son de mayor precisión unido a un programa estricto de calibración con el patrón nacional cada 3

años, para obtener información confiable y comparable, y derivar unos coeficientes  $a$  y  $b$  más precisos, que permitirían la estimación de la radiación incluso al nivel horario.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento a la doctora Esther Cecilia Montoya R. de la Disciplina de Biometría por su continuo apoyo en la parte estadística. Igualmente, a los auxiliares Luis G. Henao R., Fabián Sánchez L. y Wilmar A. Rendón G. de la disciplina de Agroclimatología, encargados del manejo de la red meteorológica de la FNC y del procesamiento de la información.

## LITERATURA CITADA

1. ALMOROX, J.; BENITO, M.; HONTORIA, C.H. Estimation of global solar radiation in Venezuela. *Interciencia* 33(4):280-283. 2008.
2. ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. *Royal meteorological society* 50:121-125. 1924.
3. AZIZ, F.A. Computation of solar radiation on horizontal surface over some Iraqi cities. *Engineering and technology* 29(10):2026-2043. 2011.
4. BAKIRCI, K. Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. *Energy* 34:485-501. 2009.
5. BELFORT INSTRUMENT COMPANY. Instructions book for pyranograph No 11900. Baltimore: Belfort instrument company, 1978. 8 p.
6. BURARI, F.W.; ABDUL'AZEZ, M.A.; MEDUGU, D.W. Comparative studies of measured and estimated values of global solar radiation using a constructed reliable model pyranometer and Angström-Prescott model at Bauchi, Nigeria. *Advances in applied science research* 1(1):80-88. 2010.
7. EL S., A.A.; TRABEA, A.A. Estimation of global solar radiation on horizontal surfaces over Egypt. *Egypt journal of solids* 28(1):163-175. 2005.

8. FAYADH, M.A.; GHAZI, Y.M. Estimation of global solar radiation on horizontal surfaces over Haditha, Samara, and Beji, Iraq. *The Pacific journal of science and technology* 1(1):73-82. 2010.
9. FNC; CENICAFÉ. *Disciplina de agroclimatología: Archivos meteorológicos de 1998 a 2002*. Chinchiná : Cenicafé, 2002.
10. GÓMEZ G., L.; GUZMÁN M., O. Relación empírica entre la radiación solar global y el brillo solar en el área de Cenicafé, Chinchiná, Caldas (Colombia). *Cenicafé* 46(4):205-218. 1995.
11. GUZMÁN M., O.; SIMBAQUEVA, R.O.; CHAVES C., B.; GÓMEZ G., L. Estimación de la radiación solar global y el brillo solar en el límite de la atmósfera. *Cenicafé* 43(2):61-65. 1992.
12. HALOUANI, N.; NGUYEN, C.T.; VO N., D. Calculation of monthly average global solar radiation on horizontal surfaces using daily hours of bright sunshine. *Solar energy* 50(3):247-258. 1993.
13. IDEAM; UPME. *Atlas de radiación solar de Colombia*. Bogotá: Imprenta nacional de Colombia, 2004. 175 p.
14. IQBAL, M. *An introduction to solar radiation*. New York : Academic press, 1983. 390 p.
15. IZIOMON, M.G.; MAYER, H. Performance of solar radiation models: A case study. *Agricultural and forest meteorology* 110:1-11. 2001.
16. JACOVIDES, C.P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agriculture and water management* 27:365-371. 1995.
17. KATIYAR, A.K.; PANDEY, C.K. Simple correlation for estimating the global solar radiation on horizontal surfaces in India. *Energy* 35:5043-5048. 2010.
18. LAMBRECHT. *Leaflet for sunshine recorder Campbell: Stokes type*. Gottingen : Lambrecht, 1991. 1 p.
19. MARTÍNEZ L., J.A.; TENA, F. The historical evolution of the Angström formula and its modifications: Review and bibliography. *Agricultural and forest meteorology* 33:109-128. 1984.
20. MUZATHIK, A.M.; NIK, W.B.W. Daily global solar radiation estimate based on sunshine hours. *International journal of mechanical and materials engineering* 6(1):75-80. 2011.
21. PODESTÁ, G.P.; NUÑEZ, L. Estimating daily solar radiation in the Argentine pampas. *Agricultural and forest meteorology* 123:41-53. 2004.
22. PRESCOTT, J.A. Evaporation from water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal society of science of Australia* 64:114-118. 1940.
23. REVFEIM, K.J.A. Estimating solar radiation income from bright sunshine records. *Royal meteorological society* 107:427-435. 1981.
24. SAFARI, B.; GASORE, J. Estimation of global solar radiation in Rwanda using empirical models. *Asian journal of scientific research* 2(2):68-75. 2009.
25. SAS INSTITUTE. *Sas user's guide: Statistics*. 5a. ed. Carolina del norte : SAS Institute, 1985. 1029 p.
26. STONE, R.J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar energy* 51:291-298. 1993.
27. WANG, Y.; ZHANG, L. Relationship between global solar radiation and sunshine duration for northwest China. *International journal of the physical sciences* 5(7):1023-1033. 2010.
28. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. 5a. ed. Geneva : WMO, 1983.

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

**DIRECCIÓN**

Fernando Gast H., Biólogo Ph.D.  
Ángela Liliana Zapata R., Administradora de Empresas M.Sc.

**PROGRAMA PRODUCCIÓN Y PRODUCTIVIDAD**

Juan Carlos García L., Ing. Agrónomo Ph.D.

**PROGRAMA CAFICULTURA Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA**

Néstor Miguel Riaño H., Ing. Agrónomo Ph.D.

**DISCIPLINAS DE INVESTIGACIÓN**

**Calidad**

Gloria Inés Puerta Q., Ing. Química, Ing. Alimentos M.Sc.  
Claudia Patricia Gallego A., Bacterióloga \*\*  
Andrés Mauricio Villegas H., Ing. Agrónomo M.Sc.\*\*  
Mariana Santos R., Medica Veterinaria Zootecnista  
Gustavo Echeverri M.

**Gestión de Recursos Naturales y Conservación**

Nelson Rodríguez V., Ing. Químico Ph.D.  
Diego Antonio Zambrano F., Ing. Químico  
Rocío Espinosa A., Médico Veterinario y Zootecnista  
Claudia Rocío Gómez P., Tec. Química  
Juan Carlos López N., Microbiólogo \*\*  
Andrés Mauricio López L., Médico Veterinario y Zootecnista  
José Rafael Rodríguez N., Lic. Biología y Química Esp.  
Laura Vanessa Quintero Y., Ing. Química \*\*  
Sergio Gómez Rios, Aprendiz Universitario  
Daniela Guzmán C., Aprendiz Sena

**Fisiología vegetal**

Claudia Patricia Flórez R., Ing. Agrónomo Ph.D.  
Aristóteles Ortiz, Químico, M.Sc  
Jenny Lorena Aguirre M., Ing. de Alimentos  
Claudia Yoana Carmona G., Ing. Agrónomo  
Luz Fanny Echeverry G., Química  
Marta Bibiana Escobar P., Tec. Químico  
Lizardo Norbey Ibarra R., Ing. Agrónomo  
Mauricio Serna O., Ing. Electrónico  
Carlos Andrés Unigarro M., Ing. Agrónomo M.Sc.  
Humberto Iván Ríos., Ingeniero Ambiental Esp.  
Yulieth Paola Giraldo E. Ing. de Sistemas y Telecom Esp.  
Juan David Hernández A., Ing. Agrónomo M.Sc.  
Claudia Marcela Mora A. \*\*  
Mario Franco A.  
Braian Alejandro López O.  
Claudia Patricia Valencia V.  
José Robín García C.  
Rocío del Pilar Pineda S., Ing. de Alimentos

**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, Geólogo\*\*  
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.  
Arturo Gómez V.

**Fitotecnia**

Francisco Fernando Farfán V., Ing. Agrónomo M.Sc.  
José Raúl Rendón S., Ing. Agrónomo M.Sc.  
Carlos Augusto Ramírez C., Tec. Técnicas Forestales  
Leidy Tatiana Bermúdez F., Ing. Agrónomo  
Nathalia Díaz M., Ing. Agrónomo  
José Rubiel Castrillón G, Ing. Sistemas y Telecom.

**Mejoramiento Genético**

José Ricardo Acuña Z., Biólogo Ph.D.  
María del Pilar Moncada B., Ing. Agrónomo Ph.D.  
Diana María Molina V., Bacterióloga Ph.D  
Carlos Ernesto Maldonado L., Ing. Agrónomo M.Sc.\*  
Jefferson Medina O., Biólogo\*\*  
Alexa Yadira Morales C., Bióloga  
Ligia Belén Suescún P., Ing. de Prod. Biotecnológica  
Mónica Quintero M., Ing. Biológica \*\*  
Conrado Antonio Quintero D., Administrador Financiero  
Carlos Augusto Vera A., Administrador Financiero  
Jairo Jaramillo O., Tec. en Electrónica  
Andrea Valencia O., Bióloga \*\*  
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\*  
Aníbal Arcila M., Ing. Agrónomo  
Mauricio Jiménez Q., Tec. Administración Agropecuaria  
Lucio Navarro E., Biólogo\*  
Juan Paulo Pimentel S., Tec. Adm. Empresas Agropecuarias  
Juan Carlos Ortiz F.  
Carlos Alberto Quintero A.  
Diana Soraya Rodríguez A., Téc. en Producción de Café  
Claudia Bibiana Tabares B.  
Faber de Los Ríos P.  
Diana Marcela Giraldo V.

### **Agroclimatología**

Carolina Ramírez C., Ing. Agrícola  
Wilmar A. Rendón G., Tec. en Sistemas Informáticos  
Myriam Giraldo M.  
Luis Gonzaga Henao R.  
Fabián Sánchez L.  
Luis Fernando Torres Q.  
Jorge Hernán Marulanda E., Tec. en Electrónica  
Orlando Salazar G.

### **Fitopatología**

Álvaro León Gaitán B., Microbiólogo Ph.D.  
Juan Manuel López V., Ing. Agrónomo, M.Sc.  
Alejandra María Hoyos G. Ing. Agrónomo  
Carlos Alberto Zuluaga E., Tec. en Mantenimiento en Comp. y Redes  
Carlos Arturo González V.  
Jorge Dicksson Ocampo M.  
Jaroliver Cardona G.  
Juan Carlos López C.

### **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 \*\*  
Mario López L.  
Juan Sebastián Ospina R., Aprendiz Sena

### **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.\*\*  
Ricardo José Grisales M., Tec. en Electrónica  
José Farid López D., Tec. en Administración Agropecuaria  
Javier Arias H.  
Mario Espinosa G.  
Javier Velásquez H.

### **EXPERIMENTACIÓN**

---

Carlos Gonzalo Mejía M., Adm. de Empresas Agropecuarias M.Sc.  
Kelly Johana Correa A., Prof. en Adm. de Mercadeo

#### **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 Líbano**

Jorge Camilo Torres N., Ing. Agrónomo

### **Estación Experimental Paraguaito**

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., Técnico en Mantenimiento Eléctrico\*\*

#### **Documentación**

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

#### **Economía**

César Alberto Serna G., Contador, M.Sc.

#### **Divulgación y Transferencia**

Sandra Milena Marín L., Ing. Agrónomo 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  
Sebastián Sánchez A., 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., Contador Público Esp.  
Jesús Danilo González O., Contador Esp.  
María Consuelo González H.  
Adrián Castro D., Aprendiz

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

Óscar Fernando Ramírez C., Ing. Mecatrónica\*\*  
Cristian David Sabogal E., Ing Electrónico y Electricista  
Gabriel Hernando Ortiz C., Tec. en Gestión Bancaria y Financiera  
Uriel López P.  
José Asdrúbal Muñoz  
Rogelio Rodríguez G.  
Javier Vanegas V.  
Eduardo Villegas A.  
Fredy Hernán Osorio C.  
Mauricio Alexander Erazo S., Técnico Electricista  
Cristian Andrés Chica G., Aprendiz Universitario

**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., Tec. Administración de Negocios

Germán Uriel G., Administrador de Empresas, Esp.

Elsa Natalia Quintero C., Profesional en Salud Ocupacional Esp.\*\*

**Planeación Financiera y Presupuesto**

Jesús Alberto Cardona L. Ing. Industrial M.Sc.

Damaris Márquez G., Administradora Financiera\*\*

Federico Giraldo D., Administrador de Empresas

**Gestión de Bienes y Servicios Contratación**

Juan David Alzate Ocampo, Economista, M.Sc.

Mauricio Loaiza M., Ing. Industrial

Luz Stella Duque C., Tec. en Administración de Negocios

Ángela Jaramillo G., Prof. en Comercio Internacional\*\*

Luis Alfredo Amaya F., Administrador Público

Yolanda Castaño G.

Gabriel Antonio Melo P.

Juan Pablo Jaramillo B., Técnico en Fotografía

Lina María Giraldo, Tec. Asistente Administrativo\*\*

Óscar Eduardo Morales V., Aprendiz

Yuliana Paola Zambrano 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., Ingeniero de Sistemas\*\*

Arley Valencia S., Ingeniero Electrónico\*\*

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.

---

\*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<sup>-1</sup>, y no 5 g de peso seco.día<sup>-1</sup>
  - \_ Se aplicaron 25 g.ha<sup>-1</sup> del ingrediente activo, y no 25 g i.a./ha
  - \_ Cada planta recibió 20 g.ha<sup>-1</sup> de agua, y no 20 g H<sub>2</sub>O/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)

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