

Cenicafé

Revista del
Centro Nacional de Investigaciones de Café



Volumen 66 Número 1

Enero - Junio 2015



**Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia**

Ministro de Hacienda y Crédito Público

Mauricio Cárdenas Santamaría

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural

Aurelio Iragorri Valencia

Ministro de Comercio, Industria y Turismo

Cecilia Álvarez Correa

Director del Departamento Nacional de Planeación

Simón Gaviria Muñoz

COMITÉ NACIONAL

Período 1° enero/2015- diciembre 31/2018

Jose Fernando Montoya Ortega

Jose Alirio Barreto Buitrago

Eugenio Velez Uribe

Danilo Reinaldo Vivas Ramos

Cliford Enrique Bonilla Smith

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 FELIPE ACERO LÓPEZ (E)

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 Cenicafe, deben obtener el permiso del Centro Nacional de Investigaciones de Café y del autor del artículo y reconocer por escrito los créditos a la Revista Cenicafe como fuente original del material.

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

La Revista Cenicafe, órgano divulgativo del Programa de Investigación Científica de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y el Fondo Nacional del Café se publica semestralmente.

Editada en Marzo 2015 Tel: 57(6)8506550 Fax: 57(6)8504723 A.A.: 2427 Manizales
E-mail: cenicafe@cafedecolombia.com
www.cenicafe.org

Cenicafé

Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café

Manizales - Caldas - Colombia

VOL. 66

ENERO - JUNIO 2015

No. 1

CONTENIDO

ALTERNATIVAS PARA DISMINUIR LA VOLATILIZACIÓN DE NITRÓGENO PRODUCIDA POR LA FERTILIZACIÓN CON UREA. Hernán González Osorio; Siavosh Sadeghian Khalajabadi; Rubén Darío Medina Rivera; Andrés Felipe Castro Quintero7

OPTIONS TO REDUCE THE N LOSSES BY VOLATILIZATION FROM UREA FERTILIZATION

EL BARRENADOR DEL TALLO Y LA RAÍZ DEL CAFÉ, *Plagiohammus colombiensis*. Luis Miguel Constantino Chuaire; Pablo Benavides Machado17

THE COFFEE STEM AND ROOT BORER, *Plagiohammus colombiensis*

EROSIVIDAD DE LA LLUVIA EN LA REGIÓN CAFETERA DE QUINDÍO, COLOMBIA. Luz Adriana Lince Salazar; Andrés Felipe Castro Quintero25

RAINFALL EROSIVITY IN THE COFFEE REGION OF QUINDÍO, COLOMBIA

EVALUACIÓN DE UN REACTOR METANOGÉNICO TIPO FILTRO ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE PARA TRATAR AGUAS MIELES DEL CAFÉ. Diego Antonio Zambrano Franco; Nelson Rodríguez Valencia; Paula Andrea Orozco Restrepo; Uriel López Posada.....32

EVALUATION OF A UPFLOW ANAEROBIC FILTER (UAF) FOR THE WATER WASTE COFFEE TREATMENT

MANEJO DE LIXIVIADOS Y AGUAS DE LAVADO EN EL PROCESO DE BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ. César Augusto Ramírez Gómez; Carlos Eugenio Oliveros Tascón; Juan Rodrigo Sanz Uribe46

MANAGEMENT OF LEACHATES AND WASTE WATERS COMING FROM WET COFFEE PROCESSING

PROPIEDADES DE UN INCEPTISOL DERIVADO DE GRANITO Y SUS IMPLICACIONES EN LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS. Luis Fernando Salazar Gutiérrez61

SOIL PROPERTIES OF AN INCEPTISOL DERIVATE FROM GRANITE AND ITS IMPLICATIONS IN THE LANDSLIDES SUSCEPTIBILITY

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 66 (I)

Carmenza Góngora	PhD. Cenicafé, Federación Nacional de Cafeteros (FNC)
Zulma Nancy Gil P.	PhD. Cenicafé, FNC
Siavosh Sadeghian K.	PhD. Cenicafé, FNC

ALTERNATIVAS PARA DISMINUIR LA VOLATILIZACIÓN DE NITRÓGENO PRODUCIDA POR LA FERTILIZACIÓN CON UREA

Hernán González Osorio*; Siavosh Sadeghian Khalajabadi*;
Rubén Darío Medina Rivera**; Andrés Felipe Castro Quintero*

GONZÁLEZ O. H.; SADEGHIAN K. S.; MEDINA R. R. D.; CASTRO Q. A. F. Alternativas para disminuir la volatilización de nitrógeno producida por la fertilización con urea. Revista Cenicafé 66(1): 7-16. 2015

Con el fin de estudiar la volatilización de nitrógeno (N) y hallar opciones conducentes a su mitigación, se realizaron tres experimentos, donde se evaluaron las pérdidas por volatilización del N a partir de la aplicación de la urea en diferentes formas y modalidades: Urea en la superficie del terreno como *prilled* y en forma granular, urea *prilled* incorporada a 3 y 6 cm en el suelo, disuelta en agua, en mezcla con sulfato de amonio (SAM) (2/3 de N como urea y 1/3 como SAM), aplicada en tres dosis sobre la superficie y suministrada después de encalamiento. Las evaluaciones se efectuaron en un cafetal en crecimiento vegetativo, plantado en un *Pachic Fulvudands*, de la zona cafetera central de Colombia. Después de 20 días de la fertilización, el acumulado de la volatilización de N a partir de la urea *prilled* en la superficie y de su incorporación a 3 y 6 cm fue 28%, 4,0% y 0,2%, con la urea en solución 16%, en tanto que con la urea granulada 20%. Puede establecerse que: i) En la medida que el pH del suelo se impacta menos con la reacción alcalina derivada de la hidrólisis de la urea, la volatilización fue menor, razón de ello es que al reducir la dosis y/o al mezclar dicha fuente con SAM, las pérdidas estuvieron entre 11% y 0,3%, respectivamente; ii) Los incrementos de humedad del suelo redujeron el fenómeno; iii) La aplicación de urea sobre un área recién encalada no potencializa la volatilización.

Palabras clave: Dosis, N-NH₃, urea *prilled*, urea granular, SAM, urea disuelta, encalamiento.

OPTIONS TO REDUCE THE N LOSSES BY VOLATILIZATION FROM UREA FERTILIZATION

With the aim of deepen in the study of nitrogen (N) volatilization in the Coffee Zone of Colombia and to find new options to reduce this phenomenon, were carried out three assays. The treatments evaluated were *prilled* urea (PU) and granular urea (coated in formaldehyde) applied on the soil surface, PU in to the soil (3 and 6 cm on deep), in solution, urea with ammonium sulfate (SAM), applied in three different doses on the soil surface and applied just after of the liming. This study was conducted in a coffee field during growth vegetative state in a *Pachic Fulvudand*. After 20 days, the volatilization losses from PU on surface and the urea in to the soil, were 28, 4 y 0,2%, respectively; with urea in solution this phenomenon was 16% while to the granular urea form, 20%. Could be established to the losses were low according to less impact on the pH soil derived from urea hydrolysis. Therefore by reducing the urea doses and blend this source with SAM, the volatilization varied since 11 to 0,3%. Finally, due to in fact N-volatilization require biological mediation, it was observed that the soil moisture could explain the N losses, also the urea applied with the lime, not increased the volatilization.

Keywords: Urea *prilled*, urea granular, SAM, doses, urea in solution, lime.

*Investigador Científico I, Investigador Científico II y Asistente de Investigación, respectivamente, Disciplina de Suelos.

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

La nutrición con nitrógeno (N) es imprescindible para el crecimiento y la producción de café en Colombia (13). Buena parte de los requerimientos del cultivo pueden proporcionarse con fertilizantes tales como DAP, nitrato o sulfato de amonio, nitrato de calcio o de magnesio, algunos complejos granulados y la urea (14), esta última que presenta una particular acogida entre los caficultores de Colombia por ser de alta concentración y bajo costo en comparación con otros fertilizantes nitrogenados; no obstante, la efectividad agronómica de esta fuente fertilizante es objeto de discusión, debido a que resultados experimentales demuestran que más del 25% del N que contiene, puede perderse por volatilización (2, 9), esto sin contar con otras formas del elemento que son inmovilizadas o las que se pierden por lixiviación (3).

Dadas estas circunstancias, se vienen planteando estrategias para mejorar la eficiencia de la fertilización con N. Algunas son el uso de fuentes con diferente solubilidad (1), modalidades de aplicación, el fraccionamiento y la incorporación del fertilizante y el recubrimiento con polímeros que inhiben la actividad microbiana (7); herramientas que aparte de contribuir a enfrentar la problemática citada, apuntarían a disminuir los costos de producción y a mitigar el impacto ambiental que se presenta por el uso excesivo de abonos nitrogenados.

Por lo anterior, con el objetivo de profundizar en el estudio de la volatilización de N en la zona cafetera y de hallar nuevas opciones conducentes a su mitigación, se evaluaron las pérdidas del elemento bajo diferentes modalidades de aplicación de la urea, en un cafetal en estado de crecimiento vegetativo, de la zona cafetera central de Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Estación Central Naranjal de Cenicafé, ubicada en el municipio de Chinchiná (Caldas) con una altitud de 1.381m, precipitación anual de 2.782 mm y temperatura media de 20,9°C, se realizaron tres experimentos en un cafetal en estado de crecimiento vegetativo, plantado en un *Pachic Fulvudands* (materiales no cristalinos >50%), con las siguientes propiedades en los primeros 20 cm de profundidad: materia orgánica 12,2%, pH 5,1; Ca 1,8 cmol_c.kg⁻¹, Mg 0,25 cmol_c.kg⁻¹ y K 0,15 cmol_c.kg⁻¹; y pendiente del terreno del 2 %.

En el primer experimento, realizado en agosto de 2011, se evaluó la volatilización de N-NH₃ a partir de la urea aplicada al voleo e incorporada a 3 y 6 cm en el suelo. En los tres tratamientos, la dosis de N correspondió a 3 g/árbol. Con la misma dosis de N en un segundo experimento que se instaló en octubre de 2011, el fenómeno fue medido luego de suministrar urea granulada (recubierta con formaldehído), urea en solución y urea en mezcla física con sulfato de amonio (1/3 del N como SAM y 2/3 partes en forma de urea); al tiempo que se cuantificaron las pérdidas de la urea *prilled* para tres dosis (1, 2 y 3 g de N). En el experimento número tres, iniciado en diciembre del mismo año, las pérdidas del N contenido en la urea fueron medidas cuando dicha fuente fue suministrada inmediatamente después de haber aplicado cal dolomita.

Las pérdidas de N (variable de respuesta) fueron evaluadas a través de la metodología descrita por Lara *et al.* (8), la cual tiene como propósito capturar el amoníaco volatilizado dentro de un colector tipo semiabierto-estático, al interior del cual se instalan dos discos de espumas de poliuretano impregnadas con solución 0,5 N de H₂SO₄ y glicerina

al 3%. En los tres experimentos, la unidad experimental estuvo conformada por un colector semiabierto para amoníaco, ubicado a 10 cm de la planta de café Variedad Castillo® Naranja. Los tratamientos fueron dispuestos bajo un diseño completamente aleatorio con ocho unidades experimentales, determinadas estadísticamente de acuerdo con los siguientes criterios logrados a partir de la investigación de González y Sadeghian (1): varianza estimada de 1,63, asociada al promedio de volatilización de N, una diferencia mínima aceptable de 1,6% de N volatilizado; un nivel de significancia del 5% y una confiabilidad del 90%. Durante los siguientes cinco días después de la aplicación de los tratamientos y a los 10 y 20 días (fechas de muestreo), se determinó la concentración de N-NH₃ por destilación. Después de la última valoración, en el 50% de las unidades experimentales de cada tratamiento, se tomaron muestras de suelo entre 5 y 7 cm de profundidad y se determinó el pH (método potenciométrico relación suelo: agua 1:1).

En cada uno de los experimentos y para cada fecha de muestreo, se obtuvo el

promedio y desviación estándar de la variable de respuesta acumulada y se hizo análisis de varianza bajo el diseño experimental propuesto. Se aplicó la prueba de comparación de Tukey al 5%, para aquellos análisis donde hubo efecto de tratamientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Transcurridos 20 días luego de aplicar los tratamientos del experimento 1, el acumulado de pérdidas de N a partir de la urea aplicada en la superficie fue en promedio de 25,7%, en tanto que con la incorporación de dicha fuente a 3 y 6 cm en el suelo, fue de 3,8% y 0,17%, respectivamente (Figura 1). En la Tabla 1 se presentan los promedios acumulados de pérdida de N por volatilización y su respectiva desviación estándar, para cada uno de los tratamientos y días después de la aplicación, se observa que a los 20 días después de aplicados los tratamientos, éstos difieren, encontrándose las menores pérdidas al incorporar la urea a 6 cm de la superficie.

Este resultado puede explicarse debido a que la volatilización es un fenómeno influenciado

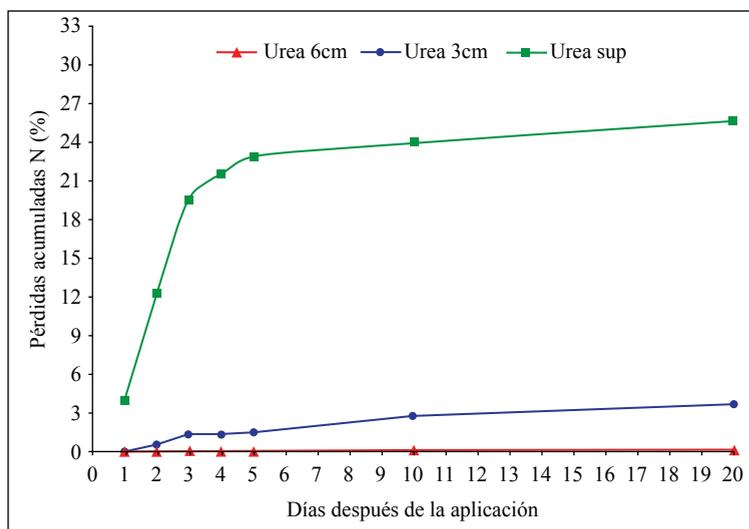


Figura 1. Promedios y desviación estándar de las pérdidas acumuladas de N por volatilización, a partir de la urea aplicada superficialmente e incorporada a 3 y 6 cm del suelo.

por microorganismos de reconocida ubicuidad en los suelos agrícolas del mundo (10), por lo tanto, resulta evidente que los procesos que conducen a la manifestación de dichas pérdidas no se restringen exclusivamente a la superficie del suelo sino que continúan aun después de alcanzar los primeros centímetros del mismo. Así, mientras haya microorganismos y urea, la volatilización continúa, solo que al interior del suelo las paredes de los agregados se convertirían en barrera física e impedirían que la totalidad del amoníaco generado retorne a la atmósfera, tal como lo explican González y Sadeghian (1).

Con relación a la aplicación de urea con recubrimiento y en solución (experimento 2), para cada fecha de muestreo, el análisis de varianza no mostró efecto de los tratamientos, por tal motivo se procedió a evaluar la probabilidad de error tipo II, con el fin de corroborar si no había efectos de tratamientos como tal. Dichas probabilidades fueron mayores al 20%, en todas las fechas de evaluación. Por ejemplo, para la evaluación en el día 20, la probabilidad de error tipo II fue de 51,6%, lo que indica que con el tamaño de muestra evaluado, no se tiene una evidencia suficiente para mantener la hipótesis nula.

En la Tabla 2 se presentan el promedio y desviación estándar de N volatilizado para cada fecha de evaluación y modalidad de aplicación de urea.

El seguimiento a los valores de pH residual del suelo, luego de evaluar las modalidades de aplicación en este experimento, constituye un aspecto clave para reunir mayores elementos de juicio, es decir, que una vez esta fuente fertilizante se incorpora, continúan las transformaciones de las que es objeto; situación que se corrobora en el ambiente alcalino que genera su hidrólisis, tal como se presenta en la Figura 2.

El suministro de urea en diferentes dosis condujo a que la volatilización se incrementara de manera exponencial (Figura 3), puesto que luego de aplicar 1, 2 y 3 g de N, se registraron pérdidas de 10%, 15% y 26%, respectivamente, a los 20 días de evaluación (Figura 4). A partir de los 10 días, las dosis evaluadas mostraron diferencias en el porcentaje de N volatilizado, según prueba Tukey al 5%.

Los registros obtenidos pueden tener una estrecha relación con los cambios

Tabla 1. Promedios y desviación estándar de las pérdidas acumuladas de N por volatilización, para cada día y profundidad de aplicación.

Día	Profundidad de aplicación					
	Superficial		3 cm		6 cm	
	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
1	4,0 A	1,070	0,05 B	0,074	0,01 B	0,014
2	12,3 A	2,135	0,54 B	0,735	0,04 B	0,031
3	19,6 A	2,282	1,37 B	1,880	0,07 B	0,032
4	21,5 A	1,027	1,40 B	2,027	0,07 B	0,032
5	22,9 A	1,374	1,66 B	2,311	0,08 B	0,042
10	24,0 A	2,935	2,84 B	2,961	0,12 B	0,071
20	25,7 A	3,213	3,77 B	3,656	0,16 C	0,122

Para cada día, letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas, según prueba de Tukey al 5%.

Tabla 2. Promedios y desviación estándar de las pérdidas acumuladas de N para cada día y modalidades de aplicación de la urea.

Día	Modalidad					
	Granular		Prilled		En solución	
	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
1	3,3 A	2,74	2,57 A	0,41	2,90 A	2,40
2	9,1 A	4,96	9,24 A	0,89	8,35 A	3,19
3	13,3 A	6,93	15,62 A	1,17	10,80 A	4,32
4	15,7 A	7,93	19,31 A	2,58	12,57 A	5,13
5	16,5 A	8,35	20,85 A	2,78	13,13 A	5,34
10	18,0 A	9,05	23,62 A	3,02	14,87 A	6,42
20	19,4 A	9,72	26,25 A	3,67	16,46 A	7,20

Para cada día, letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas, según prueba de Tukey al 5%.

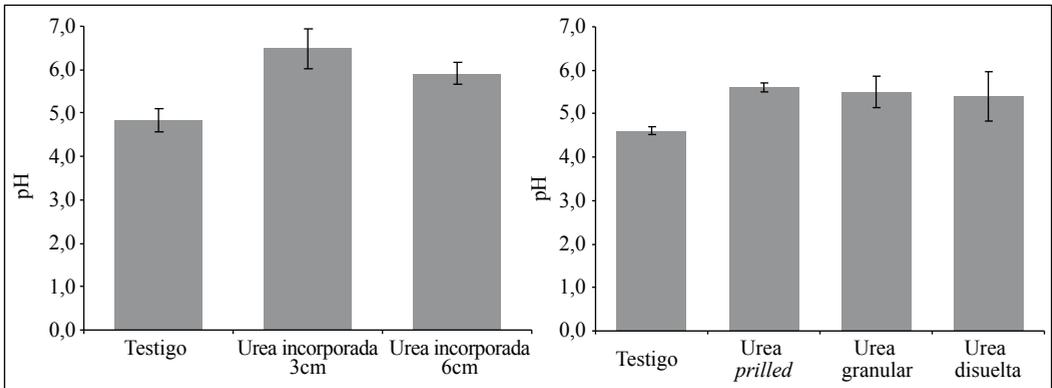


Figura 2. Cambios en valor del pH generado por los tratamientos 20 días después de su aplicación. Barras verticales indican intervalos con coeficiente de confianza del 95%.

que sobre el pH del medio ejerce la transformación de la urea. En este sentido, la acción de la ureasa genera un ambiente de basicidad, en el cual el suelo que circunda el fertilizante alcanza un pH inicial igual o mayor de ocho (12). Bajo estas circunstancias, el sólo hecho de que los gránulos permanezcan separados unos de otros o haya un menor número de ellos por unidad de área, permitirá que el impacto sobre el pH y la subsiguiente generación de amoníaco sea inferior. Estos resultados coinciden con lo encontrado en cultivos de arroz por Lin *et al.* (10),

quienes registran que los aumentos en la volatilización de N se presentan conforme se aplica mayor cantidad de urea.

Bajo estas consideraciones, no es la fuente fertilizante *per se* la que conduce a que la volatilización se presente, es la forma de aplicación (dosis por área) que actúa complementariamente para que la magnitud del fenómeno sea evidente.

Por lo anterior, se confirma que, una mayor distribución de gránulos de urea sobre el terreno conduce a que se presente

una menor volatilización. Puede decirse entonces que la cantidad de urea por unidad de área hallada luego de una práctica de fertilización al voleo, según la recomendación de Cenicafé, puede significar una volatilización posiblemente inferior a la registrada con la dosis de 1 g de N.

De otro lado, cuando la urea se aplicó junto con el SAM, la volatilización se redujo al 11% (Figura 5), situación que pudo haberse presentado ante la reacción química que exhiben ambos fertilizantes al ingresar al suelo. De esta forma, el remanente ácido derivado de la hidrólisis de esta fuente (4) y la posterior nitrificación del amonio, pudo neutralizar parte de la fuente de alcalinidad proveniente de la transformación de la urea.

Como es evidente, y aunque no todo el N aportado en este tratamiento provenía de la urea (66%), la cantidad suministrada

correspondiente a 2 g de N produjo un efecto similar en términos de disminución de la volatilización, como cuando se aplicó 1 g de N.

El pH del suelo luego de 20 días, descriptivamente se incrementó con relación al testigo (pH: 4,6) en 1,0 y 0,5 unidades con la adición de urea y urea en mezcla con SAM, respectivamente.

Efecto del encalamiento

A pesar de haber suministrado urea sobre un área encalada la volatilización no se incrementó; en otras palabras, la generación de amoníaco a partir de la urea en presencia de la cal, fue igual que cuando el fertilizante nitrogenado se aplicó sólo (Figura 6). Este resultado puede explicarse bajo dos esquemas a nivel general, primero, que la cal tarda en transformarse y reaccionar física y

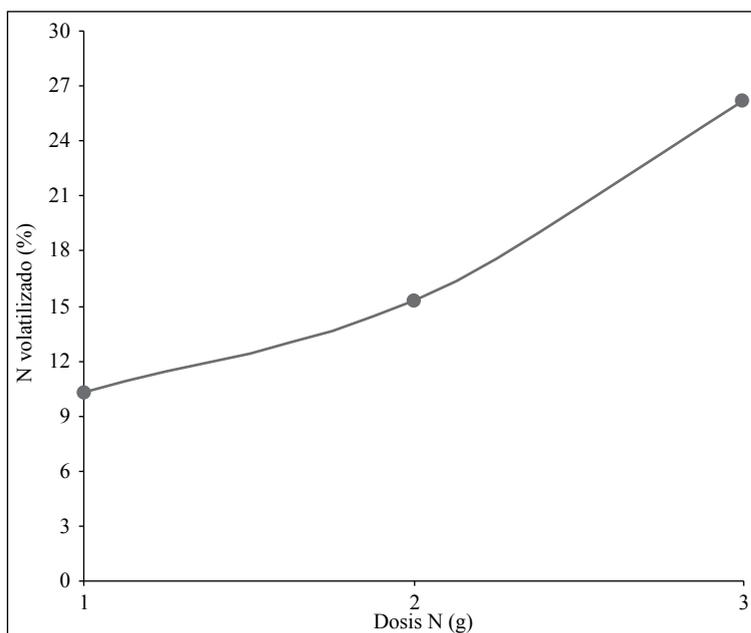


Figura 3. Volatilización de N en respuesta a la dosis de urea aplicada.

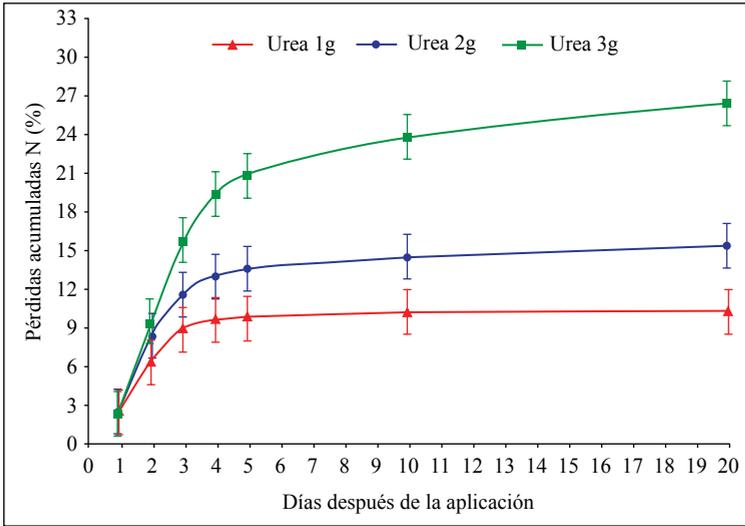


Figura 4. Efecto de la dosis en la volatilización del N aplicado a partir de la urea *prilled*. Barras verticales indican la desviación estándar.

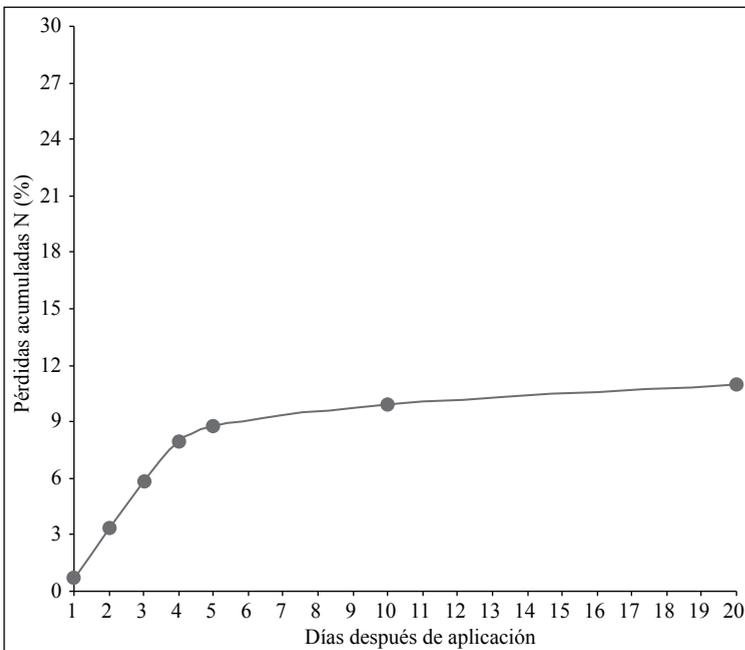


Figura 5. Volatilización de N a partir de la urea aplicada con SAM.

químicamente, lo que implica una menor presión de iones OH^- y bicarbonato en el medio durante los días de evaluación (Figura 7). Sobre este aspecto, Hayashi *et al.* (5, 6) hallaron cómo la volatilización de N a partir de la urea se reducía en

ambientes de suelos ácidos. Sin embargo, cabe destacar que es posible que la hidrólisis de la urea se encuentre limitada a un rango de pH tan específico, que los aumentos en la alcalinidad, no favorecerían la continuidad del fenómeno.

Paralelo a lo anterior, la tendencia en la volatilización fue similar a la registrada para los experimentos anteriores, sólo que en menor proporción, es decir, al cabo de 20 días de evaluación, los máximos porcentajes de $N-NH_3$ en el acumulado, no superaron el 21%. La diferencia en los valores frente a los experimentos antes descritos, estaría posiblemente relacionado con el mayor contenido de humedad que para esta época presentó el suelo (10% más humedad). En este sentido, el desplazamiento parcial del oxígeno del suelo por incrementos en la humedad, pudo haber condicionado la máxima expresión del componente vivo involucrado en el proceso de transformación de la urea como lo explican González y Sadeghian (1); situación que puede también reducir la concentración de N aprovechable (11). Adicionalmente puede sugerir la disolución de la fuente y su rápida incorporación en el suelo, tal como se discutió.

Por último, cabe aclarar que es necesario estudiar si las estrategias evaluadas contribuyen a incrementar la eficiencia en el uso del elemento por el cultivo.

Los resultados de las investigaciones muestran que el fenómeno de pérdidas de N a partir de la urea aplicada en plantaciones de café en estado de crecimiento vegetativo, puede reducirse significativamente bajo las siguientes modalidades: i). Este fertilizante se cubre con el suelo; ii). El fertilizante se aplica esparcido en la superficie del terreno (no concentrado), tal como ocurre en aplicaciones al voleo; o iii). La urea se suministra con un fertilizante de hidrólisis ácida como el sulfato de amonio. De igual manera, pudo corroborarse que la aplicación de la urea inmediatamente luego de adicionar cal como enmienda, no incrementa la volatilización del N, pese a esto, no se descarta que las pérdidas sean potencialmente superiores una vez la cal reaccione.

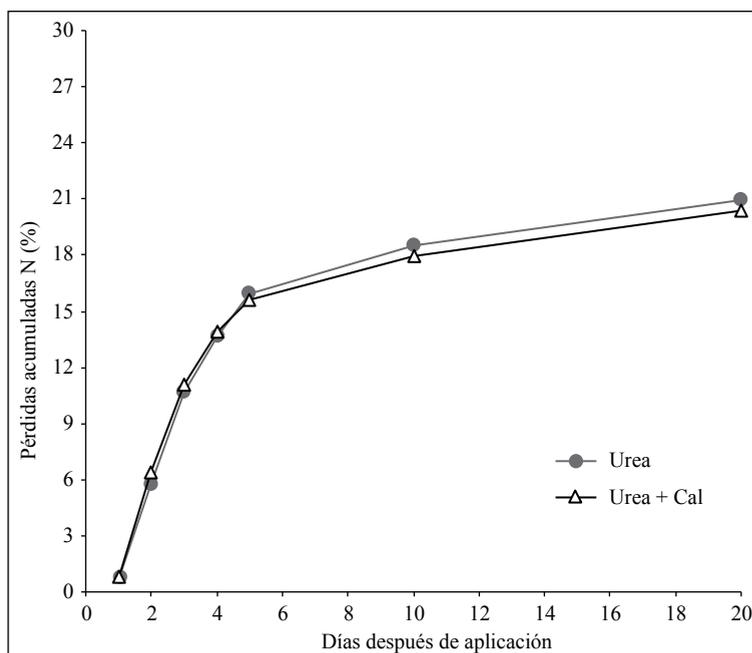


Figura 6. Volatilización de N a partir de la urea aplicada sobre un área de encalamiento.

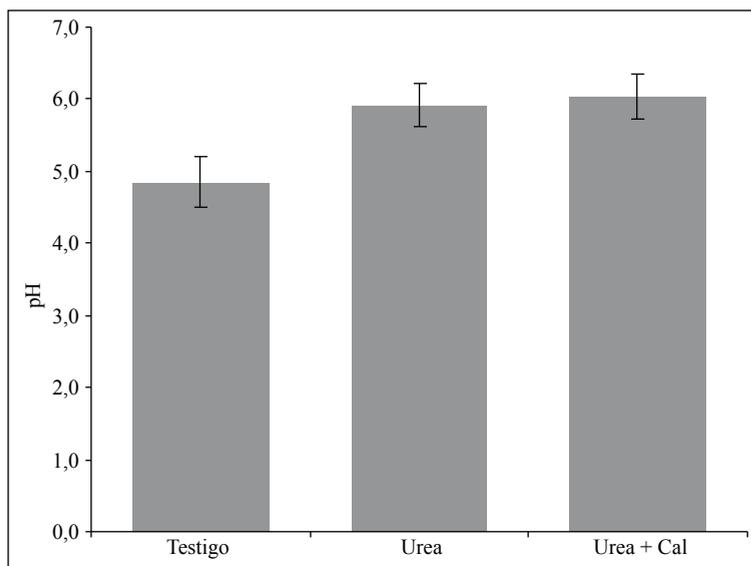


Figura 7. pH del suelo 20 días después de la aplicación de los tratamientos. Barras verticales indican intervalos con coeficiente de confianza del 95%.

LITERATURA CITADA

- GONZÁLEZ O., H.; SADEGHIAN K., S. Volatilización de nitrógeno a partir de diferentes fuentes fertilizantes en la etapa de crecimiento vegetativo del café. *Cenicafé* 63(1):132-143. 2012.
- GONZÁLEZ O., H. Pérdidas de nitrógeno por lixiviación y volatilización a partir de diferentes fuentes fertilizantes. p. 65-69. En: *CENICAFÉ. Informe anual de actividades: Disciplina de suelos. Chinchiná : Cenicafé, 2011.*
- GONZÁLEZ O., H.; SADEGHIAN K., S. Lixiviación de nitrógeno en suelos de la zona cafetera a partir de diferentes fuentes fertilizantes. *Cenicafé* 63(1):111-119. 2012
- GUERRERO R., R. Propiedades generales de los fertilizantes sólidos: Manual Técnico. 4 ed. Bogotá : Monómeros Colombo Venezolanos, 2004. 46 p.
- HAYASHI, K.; KOGA, N.; YANAI, Y. Effects of field-applied composted cattle manure and chemical fertilizer on ammonia and particulate ammonium exchanges at an upland field. *Atmospheric environment*. 43(35):5702-5707. 2009
- HAYASHI, K.; HAYAKAWA, A.; AKIYAMA, H.; YAGI, K. Measurement of ammonia emission using a dynamic chamber technique: A case study of surface incorporated manure and ammonium sulfate at an upland field of light-colored Andosol. *Soil science and plant nutrition*. 55(4):571-581. 2009.
- KRAJEWSKAY, B. Ureases I. Functional, catalytic and kinetic properties: A review. *Journal of molecular catalysis B. enzymatic* 59(1/3):9-21. 2009.
- LARA, A.; TRIVELIN, P. Eficiencia de um coletor semi-aberto estático na quantificação de N-NH₃ volatilizado da uréia aplicação ao solo. *Revista brasileira de ciencia do solo* 14:481-487. 1997.
- LEAL V., L.A.; SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en cafetales en etapa productiva. *Cenicafé* 58(3):216-226. 2007.
- LIN, DE-X.; FAN X., H.; FENG, H.; ZHAO, H.T.; LUO J., F. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake region, China. *Pedosphere* 17(5):639-645. 2007.
- MOTAVALLI P., P.; ANDERSON, S.H.; PENGTHAMKEERATI, P. Surface compaction and poultry litter effects on corn growth, nitrogen availability and physical properties of claypan soils. *Field crops research*. 84(3):303-318. 2003
- OSUMANU H., A.; AMINUDDIN, H.; HUSNI M., H.A.; MOHAMADU B., J.; ANUAR, A.R.; NICK M., A.M. Enhancing the urea-N use efficiency in

- Maize (*Zea mays*) cultivation acid soils using urea atended with Zeolita and TSP. American journal of applied sciences 6(5):829-833. 2009.
13. SADEGHIAN K., S. Fertilización: Una práctica que determina la producción de los cafetales. Chinchiná : Cenicafé, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 391).
 14. SADEGHIAN K., S.; GONZÁLEZ O., H. Alternativas generales de fertilización para cafetales en la etapa de producción. Chinchiná : Cenicafé, 2012. 8 p. (Avances Técnicos No. 424).

EL BARRENADOR DEL TALLO Y LA RAÍZ DEL CAFÉ, *Plagiohammus colombiensis*

Luis Miguel Constantino Chuaire*; Pablo Benavides Machado*

CONSTANTINO C. L. M.; BENAVIDES M. P. El barrenador del tallo y la raíz del café, *Plagiohammus colombiensis*. *Revista Cenicafé* 66(1): 17-24. 2015

A partir del año 2012 se presentaron consultas de caficultores sobre un insecto barrenador de tallos y raíces del café en los departamentos de Cesar, Santander, Norte de Santander y Boyacá, en Colombia. Se realizaron visitas de campo, recolección del material afectado, descripción de daños en árboles de café y búsqueda de hospedantes alternos en el campo. Los resultados de este estudio permitieron determinar que el agente causal del marchitamiento de los árboles de café es una especie nueva para la ciencia, la cual fue descrita con el nombre de *Plagiohammus colombiensis* Constantino, Benavides y Esteban, 2014, del orden Coleoptera, de la familia Cerambycidae. Se presentan recomendaciones de manejo de este habitante natural de la caficultura colombiana, plaga potencial del café.

Palabras clave: Coleoptera, Cerambycidae, *Coffea arabica*, Colombia.

THE COFFEE STEM AND ROOT BORER, *Plagiohammus colombiensis*

since the year 2012, coffee growers are requesting information about a stem and root borer on coffee crops in the departments of Cesar, Santander, Norte de Santander and Boyacá. We visited affected coffee crops, collected infested coffee stems, described the damages and looked for alternative hosts in the field. The results of this study allowed us to describe a new species for science, identified as *Plagiohammus colombiensis* Constantino, Benavides and Esteban, 2014, of the Order Coleoptera, family Cerambycidae. We present control strategies to manage this natural Colombian coffee areas inhabitant, potential insect pest of coffee.

Keywords: Coleoptera, Cerambycidae, *Coffea arabica*, Colombia.

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

El barrenador del tallo y la raíz del café, *Plagiohammus colombiensis* Constantino, Benavides & Esteban 2014 (Coleoptera: Cerambycidae), es una nueva especie de insecto endémico de Colombia, recientemente descrito. El primer reporte en el país de un barrenador afectando plantaciones de café se generó en el año 2001, en un cafetal envejecido en la localidad de El Carmen, Santander (6). Entre los años 2012 a 2014, se han venido presentando ataques localizados de esta plaga en cultivos de café *Coffea arabica* Variedad Castillo®, en diferentes departamentos del Nororiente del país, en localidades ubicadas en el flanco occidental de la cordillera Oriental, en la cuenca hidrográfica del río Magdalena, entre los 1.000 y los 1.400 m de altitud, en zonas de ampliación de frontera agrícola, con predominio de bosques húmedos premontanos y montanos bajos (7).

Los últimos muestreos realizados por Cenicafé en colaboración con el Servicio de Extensión de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, reportan la presencia del barrenador del tallo del café en los municipios cafeteros de La Gloria y Aguachica en la Serranía de Perijá, en el departamento del Cesar¹, así como en los municipios de El Carmen, Girón, Río Negro y El Playón (Santander)², El Carmen (Norte de Santander) y Maripí (Boyacá) (7). Se prevé que su distribución sea más extensa en la medida que se hagan más inventarios en otras localidades del país. La presencia de árboles barrenados conlleva al marchitamiento progresivo de los árboles de café, lo cual ha generado preocupación

entre los caficultores, que en su mayoría son pequeños productores.

El género *Plagiohammus* Dillon y Dillon, 1941, es un grupo de coleópteros de la familia Cerambycidae (subfamilia Lamiinae) originario de Centro y Suramérica, conocidos comúnmente como escarabajos longicornios, que se caracterizan por poseer antenas, al menos tan largas como el cuerpo; presentan el cuerpo alargado y cilíndrico, y patas largas (8). Las larvas son cilíndricas y alargadas, con cabezas redondas y carentes de patas. Los segmentos del cuerpo son constreñidos en forma de tornillo. La mayoría de las larvas taladran el cambium o la parte central del tronco de los árboles. Unos pocos taladran en las raíces y los tallos a la altura del nivel del suelo, como acontece con el barrenador del tallo y la raíz del café. La mayoría de especies de Cerambycidos son plagas de árboles forestales, ciertas especies son de considerable importancia económica. El género *Plagiohammus* tiene un total de 31 especies distribuidas en la región Neotropical, desde México hasta Brasil (5, 8, 10). Monné (10) y Martínez (9) registraron para Colombia tres especies: *P. elatus* (Bates, 1872), *P. blairi* (Breuning, 1936) y *P. spinipennis* (Thomson, 1860), sin precisar las localidades de recolección y hospedantes. Con la descripción de *P. colombiensis* se eleva a 32 el número de especies conocidas de *Plagiohammus* (7). De todas las especies de *Plagiohammus* sólo se conocen los hospedantes para tres especies, todas en el género *Coffea* (3, 4). Otros hospedantes reportados para la especie *P. spinipennis* incluyen la teca *Tectona grandis* (Lamiaceae), *Vernonia patens* (Asteraceae)

¹ CONSTANTINO, L.M., BENAVIDES, M.P. 2012. Evaluación del daño del barrenador del tallo y la raíz del café *Plagiohammus* sp. (Coleoptera: Cerambycidae) en el municipio de Aguachica, Cesar. Informe técnico, Disciplina de Entomología, Cenicafé. 13 p.

² CONSTANTINO, L.M., BENAVIDES, M.P. 2013. Presencia del barrenador del tallo y la raíz del café *Plagiohammus* sp. (Coleoptera: Cerambycidae) en el municipio de Girón, Santander. Informe técnico, Disciplina de Entomología, Cenicafé. 14 p.

y *Lantana camara* (Verbenaceae), en Costa Rica y México (1). Barrera *et al.* (3) reportan para México tres especies de barrenadores del tallo y la raíz del cafeto: *P. maculosus* en la región de Chiapas, *P. spinipennis* en el estado de Veracruz y Chiapas, y *P. mexicanus* en el estado de Hidalgo. En la región cafetera de México, en la vertiente del Pacífico del Estado de Chiapas, la infestación del barrenador se encuentra a una altitud de 1.000 m. Un estudio realizado recientemente en esta región reportó que el 34,8% de 23 localidades muestreadas estaban afectadas, con niveles de infestación entre 0,8% y 24,5%. Los productores de las zonas altas de esta región consideran al barrenador como una de las plagas más importantes del café en México. Ávila (2) indica que *P. maculosus* se ha reportado atacando plantas de café en países como Costa Rica, Nicaragua, El Salvador, Guatemala, Honduras y México. Este mismo autor reporta a *P. maculosus* como plaga del café en Guatemala, desde 1935, con niveles de infestación entre 5,0% y 25,0% en el municipio de Santa Cruz. Este estudio tuvo como finalidad identificar los daños ocasionados por *P. colombiensis* en Colombia, describir los estados biológicos de la especie, determinar la existencia de hospedantes alternos y emitir recomendaciones de manejo integrado en plantaciones de café.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó entre junio de 2012 hasta diciembre de 2013, con una intensidad de muestreo de 30 h/día/hombre/año. Las visitas de campo para identificar y estudiar el barrenador del tallo en plantaciones de café, se realizaron en compañía del Servicio de Extensión de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia en los municipios de Aguachica (Cesar), Río Negro (Santander), El Carmen (Norte de Santander) y Maripí (Boyacá).

Se visitaron lotes de café afectados y se describieron los daños, posteriormente se tomaron muestras de tallos de árboles de café barrenados. Para esto, se desenterraron 50 árboles afectados, con la ayuda de un palín, cavando alrededor del plato del árbol en un diámetro de 40 cm, dejando la raíz principal intacta. Se hizo un corte lateral con un machete, a lo largo de las galerías, hasta encontrar estados del insecto. Los árboles afectados con presencia de larvas maduras fueron cortados en trozos de 30 cm de longitud, se envolvieron en papel periódico humedecido con agua y se empacaron en neveras, para transportarlos al laboratorio de Entomología de Cenicafé, con el fin de criar las larvas hasta la obtención de adultos. Posteriormente, los trozos de tallos de café se dispusieron en cajas de cría plásticas cubiertas con tapa y cuatro orificios de ventilación, forrados con tela muselina, los cuales se mantuvieron en un cuarto de cría a temperatura ambiente (25°C y 80±2% de humedad relativa), durante 18 meses. Para mantener la humedad, los trozos de tallos se asperjaron con un atomizador con agua destilada una vez por semana. Una vez emergieron los insectos adultos, se realizó la descripción de la especie.

Con el fin de identificar árboles hospedantes de la especie del cerambícido que afecta al café, y considerando los hábitos nocturnos de este insecto, se montaron ocho trampas de capturas de adultos, de luz de interceptación vertical con recipiente recolector, adaptadas con bombillos de luz fluorescente blanca y negra, y operadas con baterías recargables de 12 voltios. Para evitar que los adultos recolectados se escaparan, se colocaron 40 mL de agua con detergente, para romper tensión superficial, en el fondo de cada recipiente recolector. Las trampas se colgaron a una altura de dos metros del suelo, durante ocho horas continuas dentro de los cafetales afectados.

Igualmente, se hizo búsqueda del insecto en diferentes especies de árboles utilizados como sombrío del café y en troncos de madera descompuesta dentro de los lotes afectados. Se cortaron trozos de madera con galerías y presencia de larvas de Cerambycidae los cuales fueron conservados en neveras y transportados al laboratorio de Entomología de Cenicafé para su identificación.

Con la información de campo y laboratorio, de los daños causados a las plantaciones de café, la identificación de la especie de insecto atacando los árboles y el estudio de los hospedantes alternos, se realizó una propuesta de manejo integrado del insecto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El barrenador del tallo y la raíz del café, *Plagiohammus colombiensis*, ataca árboles de café de todas las edades; cuando afecta árboles entre los 18 y 36 meses, causa marchitamiento. Los árboles afectados se reconocen por los montículos de aserrín en la base del tallo, producto de la evacuación de material que realiza la larva del insecto, por el orificio de entrada, cuando ésta se encuentra barrenando el tallo central y el cuello de la raíz principal (Figura 1a). La larva barrena y destruye la médula del tallo y los haces vasculares, ocasionando la interrupción del flujo de savia. Cuando la larva penetra el tronco, se dirige hacia la base de la raíz principal y la barrena; luego, sube siguiendo el tallo central, hasta una altura de 10,0 a 30,0 cm del suelo. Una vez alcanza la altura máxima, empupa en una cámara construida dentro de la galería. La pupa queda cubierta con un capullo construido con fibras de madera. Cuando emerge el adulto, éste realiza un orificio de salida en el tronco del árbol, el cual es circular, de 0,8 cm de diámetro, a una

altura aproximada de 10,0 cm del suelo en el tallo principal (Figura 1b).

En la inspección de troncos de café infestados por el barrenador, se encontraron cinco diferentes condiciones de ataque en árboles de café: 1. Árboles de 2 y 4 años con ataques recientes del barrenador, con presencia de aserrín fresco, y a nivel del suelo un orificio de entrada de la larva de 2,0 mm de diámetro aproximadamente (Figura 1c); 2. Árboles productivos de 2 y 4 años, con orificios de salida del adulto del barrenador a 10 cm del suelo, con un diámetro aproximado de 0,8 cm (Figuras 1b-d); 3. Árboles marchitos o improductivos, con orificios de salida del adulto del barrenador (Figura 1e), 4. Árboles productivos, con abundante aserrín viejo y sin orificio de salida; 5. Árboles marchitos o improductivos con abundante aserrín viejo, con orificios de salida del adulto del barrenador.

Los árboles del estado 1 contienen larvas del cerambícido en instares iniciales, mientras que los del estado 4 contienen larvas de últimos instares, con 5,5 cm de longitud y tonalidad blanco-crema (Figura 1f). Posiblemente en árboles, aparentemente sanos de café, con orificios de salida del barrenador, la larva no haya alcanzado a dañar completamente la raíz principal ni los haces vasculares, permitiendo la translocación de nutrientes y el desarrollo del árbol; sin embargo, todos los casos estudiados hasta la fecha, evidenciaron las raíces principales completamente barrenadas y dañadas (Figura 1 g-h).

El adulto de *P. colombiensis* es un escarabajo longicornio de 2,50 cm de largo por 0,75 cm de ancho, con cuerpo pardo claro, alargado y cilíndrico, con seis manchas grandes amarillo intenso, de forma irregular, con muchos puntos amarillos pequeños esparcidos sobre los

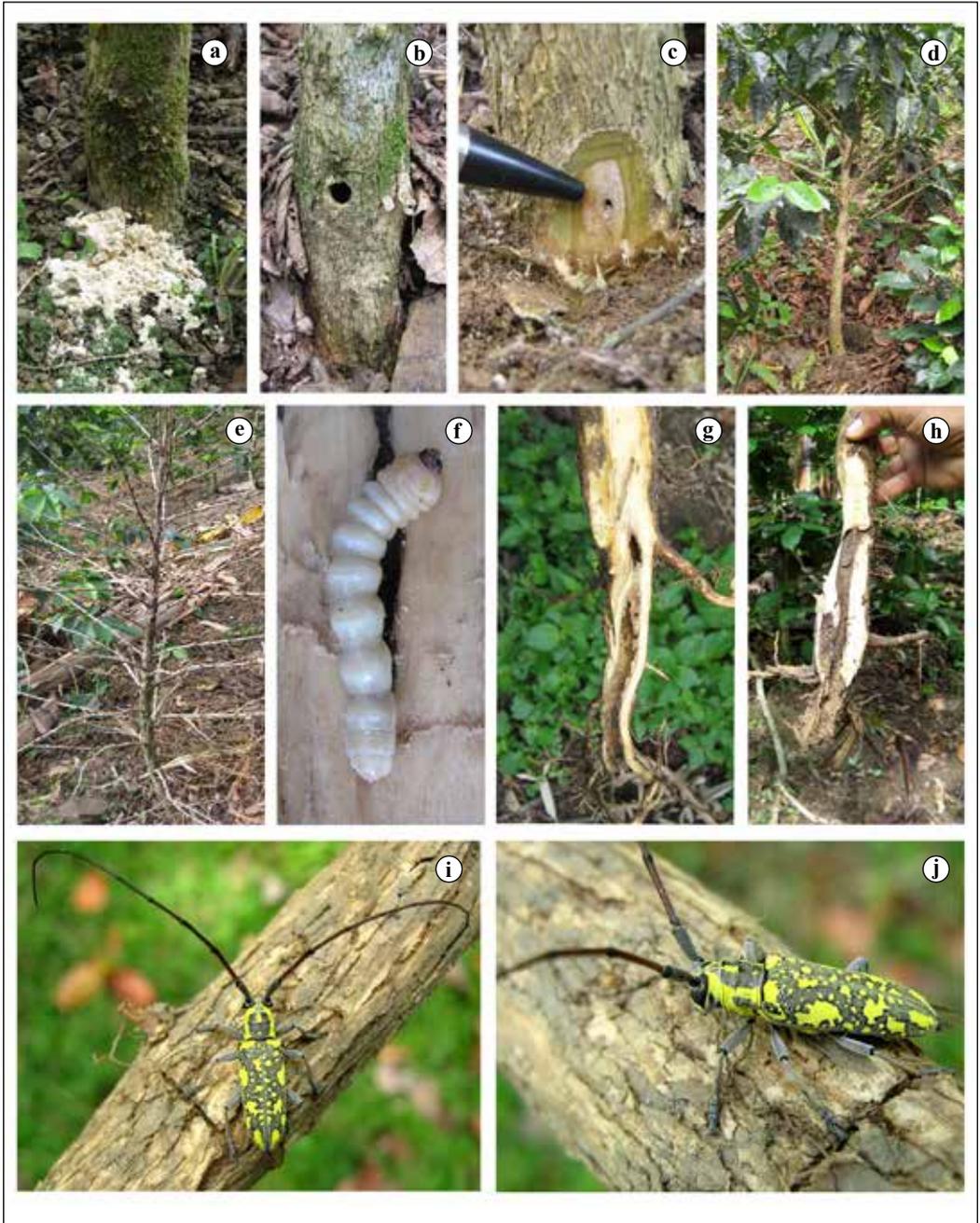


Figura 1. a. Aserrín producido por la larva en la base de un tallo de café; b. Orificio de salida del adulto; c. Orificio de entrada de la larva; d. Árbol aparentemente sano, con orificio de salida; e. Árbol seco, con orificio de salida en el tallo; f. Larva; g. Galería en la raíz principal; h. Galería en el tallo; i. *Plagiohammus colombiensis*, adulto, vista dorsal; j. Adulto, vista lateral.

élitros (Figura 1 i-j). El pronoto posee una banda lateral continua y una banda dorsal interrumpida y amarilla. Antenas pardas y anaranjadas, del doble de largo del cuerpo en los machos y más cortas en las hembras. Cabeza con frente amarilla y ojos compuestos grandes y negros. Las larvas son alargadas, levemente achatadas, semicilíndricas, blanco-crema, carentes de patas torácicas, con el pronoto de la cabeza redondeado, levemente achatado cubierto con una placa torácica, amarillo-crema, cabeza café oscura y un par de mandíbulas fuertes; el cuerpo presenta seis segmentos abdominales y tres torácicos constreñidos en forma de tornillo, que le permiten a la larva moverse a lo largo de las galerías que barrenan en el tallo y la raíz. La larva madura alcanza una longitud de hasta 5,50 cm (Figura 1f). La pupa está cubierta con un capullo construido con fibras de madera. La pupa de color crema oscuro, se asemeja en su morfología al futuro adulto. La duración del ciclo desde huevo hasta pupa es de 18 meses aproximadamente (7).

Los adultos son de hábitos nocturnos, por lo que en el día es difícil observarlos. Son fototrópicos, es decir, son atraídos a fuentes de luz. Se desconocen los momentos de vuelo de los adultos, ya que a pesar de haberse instalado trampas de luz en los departamentos de Santander y Cesar, durante los meses de diciembre y mayo, no hubo capturas de adultos de *P. colombiensis*. Con base en observaciones del daño en el campo, pudo determinarse que la hembra ovípara sobre la corteza del tallo principal, cerca de la base del árbol, a nivel del suelo. Cuando la larva emerge, perfora el tallo y empieza a barrenar la parte central del tronco hacia la raíz principal. Es importante considerar que siendo los cerambícidos barrenadores de plantas arbóreas, los cafetales que estén contiguos a zonas boscosas estarán más

propensos al ataque de este insecto, habitante natural del bosque.

Se realizó la búsqueda de hospedantes alternos en especies forestales utilizadas como sombrío en los cafetales, especialmente, en guamo blanco (*Inga oerstediana*), que es la especie de sombrío más utilizada en cafetales en el Norte de Colombia; también en otras especies forestales y en troncos descompuestos en el suelo de los cafetales. No se hallaron larvas del género *Plagiohammus* en los árboles de sombrío ni en troncos caídos, sin embargo, se hallaron barrenando en tallos de guamo blanco, dos especies de cerambícidos diferentes a *Plagiohammus*: *Pantomallus martinezi* Martins y Galileo, 2005, y *Criodion cinereum* (Oliver, 1795). Estos dos barrenadores no se tenían reportados en guamo, por lo que se consideran nuevos registros de hospedante. Es factible que el hospedante primario de *Plagiohammus* sea una especie forestal, ya que todos los ataques del barrenador del tallo del café se han presentado en zonas de ampliación de frontera agrícola en cafetales rodeados de bosques.

De acuerdo con las observaciones realizadas en este estudio, se propone el siguiente plan de manejo del barrenador del tallo y la raíz del café:

- Identificar y marcar los árboles de café afectados para realizar control y seguimiento (la presencia de aserrín en la base del tallo es el indicador de presencia de la larva (Figura 1a).
- Eliminar los árboles secos, marchitos o improductivos, que tengan orificios de salida del barrenador.
- Eliminar y destruir, fuera del cafetal, los árboles marchitos o improductivos que presenten alta cantidad de aserrín pero que

no tengan orificio de salida del adulto del barrenador. Esta medida es una estrategia de control cultural, la cual tiene como finalidad interrumpir el ciclo del insecto.

- Inyectar una solución insecticida en los árboles con ataques recientes del barrenador, con presencia de aserrín fresco, por el orificio de entrada de la larva a nivel del suelo. Se sugiere usar productos organofosforados en concentración de 3,0 cm³.L⁻¹ de agua o piretroides a 1,0 cm³.L⁻¹ de agua. Aplicar un volumen de 1 cm³ por árbol. Taponar inmediatamente el orificio de entrada con arcilla, barro o cera.
- Inyectar la misma solución insecticida, pero en mayor volumen, a los árboles productivos con abundante aserrín viejo sin orificio de salida. Esta medida se recomienda para matar la larva de últimos instares o los adultos, que están dentro de los árboles antes de emerger y colonizar otros cafetos.

Se recomienda explorar el uso de trampas de luz, como medidas de control o disrupción del apareo de los adultos; buscar enemigos naturales de control, no eliminar la totalidad de las especies arbóreas cuando se renueven cafetales con sombrío natural, ni almacenar dentro del lote residuos (ramas, troncos) de árboles eliminados. No dejar tocones de los árboles eliminados y hacer corte a nivel del suelo.

AGRADECIMIENTOS

A Agustín Giraldo Gómez, Director Ejecutivo del Comité de Cafeteros de Cesar – Guajira. A Héctor Agustín Rivero, Servicio de Extensión de Cesar - Guajira, seccional Sur (Municipio de Aguachica). Al caficultor Evelio Quintana, Vereda La Yegüera, municipio de Aguachica; a Henry Corrales del Servicio de Extensión

del Comité de Cafeteros de Boyacá; a Laura Marcela Ballén, Juan Fernando Almonacid, Justo Pastor Castaño y Humberto Jaimes del Servicio de Extensión del Comité de Cafeteros de Santander, Seccional Rionegro. Al caficultor Diego Andrés Domínguez, Vereda Altamira (Girón, Santander), a Zulma Nancy Gil y al personal de apoyo de la Disciplina de Entomología- Cenicafé, Carlos A. Quintero y Mauricio Jiménez.

LITERATURA CITADA

1. ARGUEDAS, M., CHAVERRI, P. 1997. Abejones barrenadores (Cerambycidae). Cartago, Costa Rica, ITCR-CIT. (Serie Plagas y Enfermedades Forestales N° 20). 8 p.
2. ÁVILA, L.A. 2005. Impacto agronómico del daño causado por el barrenador del tallo del caféto (*Plagiohammus maculosus* Bates) en el municipio de Santa Cruz Naranjo del departamento de Santa Rosa, Guatemala. Tesis. Fitotecnia. Universidad de San Carlos de Guatemala. 40 p.
3. BARRERA, J., HERRERA, J., VILLALOBOS, J., GÓMEZ, B. 2004. El barrenador del tallo y la raíz del café. Una plaga silenciosa. Proyecto Manejo Integrado de Plagas, folleto técnico No. 9. El Colegio de la Frontera Sur ECOSUR, Tapachula, Chiapas, México. 8 p.
4. BARRERA, J. 2008. Atlas de insectos de interés agrícola en cafetales del Soconusco y Sierra de Chiapas. Ecosur. El Colegio de la Frontera Sur, Tapachula, Chiapas, México. 26 p.
5. BEZARK, L. 2008. A Photographic Catalog of the Cerambycidae of the New World. The Genus *Plagiohammus* (Lamiinae). Disponible en línea. http://plant.cdfa.ca.gov/byciddb/default_wImage.asp
6. CÁRDENAS, R., POSADA, F. J. 2001. El taladrador de tallos y raíces *Plagiohammus maculosus* Bates (Coleoptera: Cerambycidae) Pp. 60-61. En: Los Insectos y otros habitantes de cafetales y platanales. Comité de Cafeteros del Quindío. Optigraf, Armenia. 250 p.
7. CONSTANTINO, L.M., BENAVIDES, M.P., ESTEBAN, J.R. 2014. Description of a new species of coffee stem and root borer of the genus

- Plagiohammus* from Colombia (Coleoptera: Cerambycidae: Lamiinae), with a key to the Neotropical species. *Insecta Mundi*, 337:1-21.
8. DILLON, L. S., DILLON, E. S. 1941. The tribe Monocharini in the Western Hemisphere (Coleoptera: Cerambycidae). *Scientific Publications of the Reading Public Museum*. 1: 1-135.
 9. MARTÍNEZ, C. 2000. Escarabajos longicornios (Coleoptera: Cerambycidae) de Colombia. *Biota Colombiana. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt*, 1: 76-105.
 10. MONNÉ, M. 2005. Catalogue of the Cerambycidae (Coleoptera) of the Neotropical Region. Part II. Subfamily Lamiinae. *Zootaxa*, 1023: 1- 760.

EROSIVIDAD DE LA LLUVIA EN LA REGIÓN CAFETERA DE QUINDÍO, COLOMBIA

Luz Adriana Lince Salazar*; Andrés Felipe Castro Quintero*

LINCE S. L. A.; CASTRO Q.; A. F. Erosividad de la lluvia en la región cafetera de Quindío, Colombia. *Revista Cenicafé* 66(1): 25-31. 2015

La erosividad, también conocida como agresividad climática, es la causa de las mayores pérdidas naturales de suelo cultivable en los Andes colombianos. Con el objetivo de determinar el nivel de agresividad climática y la distribución de las lluvias en la región cafetera del departamento del Quindío (Colombia), se realizó un estudio con los datos de precipitación diaria, de los registros climáticos de 19 estaciones de la Red Climática de la Federación de Cafeteros, en el periodo de 1997 a 2011. Se estimó el índice de erosividad ($R-EI_{30}$), mediante un modelo validado para la región cafetera central de Colombia, el cual emplea el índice modificado de Fournier (*IMF*), y se calculó la variabilidad temporal de la distribución de las lluvias mediante el índice de concentración de las precipitaciones (*ICP*). Los resultados indican que los valores promedio del *IMF* fueron muy altos (>160), los de *R* entre alto y muy alto (7.500-15.000 MJ.mm.ha⁻¹) y los *ICP* fueron mayores al 13%, que se clasifican como uniformes y moderadamente estacionales. Tanto los valores de intensidad como de distribución indican que los suelos de la zona se ven afectados por una fuerte agresividad climática, con la lluvia como agente erosivo en todos los meses del año.

Palabras clave: Índice de Fournier, Índice modificado de Fournier, índice de concentración de las precipitaciones, I_{30} , precipitación.

RAINFALL EROSIVITY IN THE COFFEE REGION OF QUINDÍO, COLOMBIA

Rainfall erosivity – also known as climatic aggressiveness – is the main cause of the greatest natural losses of arable soil in the Colombian Andes. In order to determine the climatic aggressiveness level and the rainfall distribution in the coffee region of Quindío, Colombia, a study using data of daily precipitation of climate records in 19 stations at Cenicafé – FNC, from 1997 to 2011 was carried out. The rate of annual historical rainfall erosivity ($R - EI_{30}$) was estimated using a validated model for the Central Coffee Region of Colombia, which uses the modified Fournier index (*MFI*). The temporary variability of rainfall distribution was also calculated for every year through the index of precipitation concentration (IPC). The mean values of MFI for the region (> 160), the R values were between high to very high (7.500 – 15.000 MJ.mm.ha⁻¹), and the IPC values were lower than 13%, which are classified as moderately seasonal and uniform. Both erosivity and distribution values indicate that soils in the area are affected by strong climatic aggressivity with the rain as an erosive agent during all the months of the year.

Keywords: Fournier index, modified Fournier index, precipitation concentration index, I_{30} , precipitation.

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

La erosividad de la lluvia, también conocida como agresividad climática, es uno de los factores detonantes de la erosión de los suelos, la cual según Mabit y Bernard (13) es la forma más generalizada y seria de degradación.

Los factores importantes que se tienen en cuenta en la evaluación de la erosividad son la intensidad y la distribución (5). El primero está determinado por la energía cinética que alcanza la gota de lluvia en la caída; dicho fenómeno fue demostrado por Wischmeier (26) e incluido en el índice de erosividad I_{30} que se relaciona con el factor de erosividad de la lluvia (R), el cual hace referencia a la máxima intensidad que presenta un evento lluvioso en un periodo de 30 min. y su energía cinética.

Los índices más destacados para medir la erosividad de la lluvia y su distribución son el factor R propuesto por Wischmeier y Smith (26) implementado en Los Estados Unidos, el índice de Fournier (IF) propuesto por Fournier (8) desarrollado para la costa oeste de África, el índice modificado de Fournier (IMF) planteado por Arnoldus (3), y entre las correlaciones destacadas se tienen la de Renard y Freimund (18), que sugieren el uso entre el IFM y el factor R para regiones con datos deficientes. Otro índice importante es el de concentración de las precipitaciones (ICP) desarrollado por De Luis *et al.* (7) y Oliver (16), que tiene como finalidad cuantificar la heterogeneidad de la precipitación en términos de series de lluvias mensuales.

Los estudios de erosividad de la lluvia y su distribución se han desarrollado para África (13, 23), Estados Unidos (24), Colombia (10), Perú (21), Italia (6), España (1), China (27), Corea (11), Chile (4) y

Brasil (14, 15). Para la región cafetera central de Colombia, Rivera (19) presentó un modelo de correlación entre el IMF y el I_{30} , para los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda, dicho modelo fue aplicado por Ramírez *et al.* (17) para la región cafetera de Caldas. (22) realizaron un análisis similar para la región centro – sur del mismo departamento, en el cual calcularon la erosividad y la variación temporal de las lluvias, mediante los Índices de Fournier Anual (IFA), Modificado de Fournier (IMF) y Concentración de las Precipitaciones (ICP). En la revisión de antecedentes no se encontraron estudios enfocados a determinar la erosividad de la lluvia en la zona cafetera del departamento del Quindío, motivo por el cual se realizó un estudio cuyo objetivo fuera determinar la erosividad de la lluvia en la zona cafetera del departamento del Quindío.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio correspondió a la región cafetera del departamento del Quindío, ubicada entre los $04^{\circ} 04' 41'' - 04^{\circ} 43' 18''$ N y entre los $75^{\circ} 23' 41'' - 75^{\circ} 53' 56''$ W, en el flanco occidental de la cordillera Central de Colombia. Políticamente está dividido en 12 municipios, con potencial cafetero, perteneciente a los ecotopos 208A, 210A y 211A. La precipitación anual histórica va desde 944 mm hasta 4.173 mm, en un régimen bimodal, con picos en los meses de abril y octubre.

Se reunieron los datos de precipitación diaria de los registros climáticos de 19 estaciones climáticas de la Red Climática de la Federación Nacional de Cafeteros-FNC, en el período de 1997 a 2011. Se trabajó con espacios temporales entre 15 y 11 años (Tabla 1), debido a que algunas estaciones presentaron registros incompletos.

Tabla 1. Localización de las estaciones climáticas de la Red Climática Cafetera – FNC y períodos empleados.

Estación	Municipio	Lat. (N)	Long. (W)	Elevación (m)	Años	
					Total	período
El Agrado	Montenegro	04°31'	75°48'	1.275	15	1997 – 2011
El Porvenir	Pijao	04°19'	75°47'	1.470	15	1997 – 2011
La Bella	Calarcá	04°30'	75°40'	1.449	15	1997 – 2011
La Ilusión	Circasia	04°35'	75°43'	1.442	15	1997 – 2011
La Miranda	La Tebaida	04°26'	75°51'	1.193	15	1997 – 2011
Maracay	Quimbaya	04°36'	75°44'	1.402	15	1997 – 2011
Sorrento	Montenegro	04°33'	75°49'	1.203	15	1997 – 2011
Vivero	Quimbaya	04°37'	75°46'	1.330	15	1997 – 2011
Tucumán	Armenia	04°32'	75°44'	1.250	14	1998 – 2011
La Argentina	La Tebaida	04°27'	75°47'	1.200	14	1998 – 2011
La Esperanza	Filandia	04°38'	75°41'	1.671	14	1997 – 2003, 2005 – 2011
La Pradera	Armenia	04°28'	75°43'	1.350	13	1997 – 1998, 2000 – 2009, 2011
La Alejandría	Génova	04°11'	75°47'	1.600	12	1997 – 2000, 2003 – 2007, 2009 – 2011
La Esperanza	Buenavista	04°22'	75°45'	1.428	12	1997 – 1998, 2000 – 2006, 2008 – 2011
La Julia	Montenegro	04°33'	75°45'	1.250	12	1997 – 1999, 2002 – 2003, 2005 – 2011
Mónaco	Córdoba	04°25'	75°42'	1.250	12	1997 – 2002, 2004 – 2005, 2008 – 2011
Paraguaicito	Buenavista	04°24'	75°44'	1.203	11	1998, 2000 – 2002, 2005 – 2011
Quebradanegra	Calarcá	04°27'	75°40'	1.500	11	1997 – 1998, 2000 – 2004, 2006, 2009 – 2011
El Jardín	Calarcá	04°28'	75°42'	1.300	11	1998, 2000 – 2002, 2005 – 2011

Para la estimación del $R - EI_{30}$, anual histórico, se empleó el modelo validado por Rivera (20) para las condiciones pluviométricas de la región cafetera central (Caldas, Quindío y Risaralda) mediante la Ecuación <1>, la cual tiene como variable independiente el IMF , que se calculó para cada año mediante la Ecuación <2> (19), y posteriormente se obtuvo el promedio histórico anual de cada estación climática. El valor promedio de IFM fue el empleado en la Ecuación <1>. Las clasificaciones del R (IE_{30}) y el IMF se presentan en las Tablas 2 y 3.

$$IE_{30} = \sum_1^{12} 38,4 (IMF) + 28,3 \quad <1>$$

Donde:

IE_{30} = Índice de erosividad

IMF = Índice modificado de Fournier

$$IMF_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} (P_{ij})^2}{P_j} \quad <2>$$

Donde

IMF_j = Índice modificado de Fournier en el año j

P_{ij} = Precipitación del mes i , en el año j

P_j = Precipitación total del año j

Los métodos de autocorrelación espacial tenidos en cuenta para la espacialización del factor R fueron el kriging ordinario y el peso inverso de la distancia (IDW), empleando los registros de erosividad. Se utilizó el software ArcGis extensión geostatistical analyst.

El cálculo del ICP interanual se realizó mediante la Ecuación <3>, propuesta por Oliver (16), y su clasificación se presenta en la Tabla 4.

Tabla 2. Clasificación de la erosividad de las lluvias (20).

Clase	Erosividad R (MJ.mm.ha ⁻¹)	Clasificación
1	<1.000	Natural
2	1.000 – 5.000	Muy baja
3	2.500 – 5.000	Baja
4	5.000 – 7.500	Moderada
5	7.500 – 10.000	Alta
6	10.000 – 15.000	Muy alta
7	15.000 – 20.000	Severa
8	> 20.000	Extremadamente severa

Tabla 3. Clasificación para el Índice de concentración de las precipitaciones- *ICP* (17) y el Índice Modificado de Fournier-*IFM* (2).

Clase	<i>IFM</i>		<i>ICP</i>	
	Rango	Clasificación	Rango	Clasificación
1	<60	Muy baja	0,8 – 10	Uniforme
2	60 – 90	Baja	11 – 15	Moderadamente estacional
3	90 – 120	Moderada	16 – 20	Estacional
4	120 – 160	Alta	21 – 50	Altamente estacional
5	>160	Muy alta	51 – 100	Irregular

$$ICP = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{12} P_{ij}^2}{(\sum_{i=1}^{12} P_{ij})^2} <3>$$

Donde:

ICP = Índice de concentración de las precipitaciones

P_{ij} = Precipitación del mes *i*, en el año *j*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Índice Modificado de Fournier (*IMF*). Los valores promedio del *IMF* estuvieron entre 218 y 314, que según la clasificación de Apaydin *et al.* (2) es un valor muy alto (>160).

De la totalidad de los datos individuales anuales, solo la estación climática La Alejandría (Génova), en el año 2009, presentó un valor en la categoría alto (143); las demás localidades

presentaron valores correspondientes a la clasificación muy alto (Tabla 4). Estos valores indican que los suelos pueden verse afectados por una fuerte agresividad climática con la lluvia como agente erosivo, lo cual concuerda con lo reportado por Rivera (19), Hoyos *et al.* (10), Ramírez *et al.* (17) y (22), para los Andes colombianos.

Erosividad (*R*). Se encontraron valores entre 8.765 y 12.406 MJ.mm.ha⁻¹, que según la clasificación de Rivera y Gómez (20), corresponden a un nivel de erosividad entre alto y muy alto.

De las 19 estaciones evaluadas, 14 presentaron valores de *R* muy alto, lo que marcó una clasificación regional. En cinco estaciones climáticas se registraron valores de *R* altos, de las cuales cuatro se encuentran

Tabla 4. Valores promedio del Índice Modificado de Fournier, Erosividad (R), *ICP* y sus clasificaciones.

Estación	Municipio	<i>IFM</i>		Erosividad		<i>ICP</i>	
		Promedio	Clasificación	(MJ.mm.ha ⁻¹)	Clasificación	(%)	Clasificación
El Agrado	Montenegro	235,50	Muy alto	9.382,95	Alta	10	Uniforme
El Jardín	Calarcá	301,86	Muy alto	11.930,86	Muy alta	11	M. E.
El Porvenir	Pijao	265,14	Muy alto	10.521,13	Muy alta	12	M. E.
La Alejandría	Génova	218,07	Muy alto	8.765,32	Alta	12	M. E.
La Argentina	La Tebaida	259,66	Muy alto	10.310,41	Muy alta	11	M. E.
La Bella	Calarcá	261,27	Muy alto	10.372,36	Muy alta	12	M. E.
La Esperanza	Filandia	314,23	Muy alto	12.406,08	Muy alta	11	M. E.
La Esperanza	Buenavista	291,49	Muy alto	11.532,81	Muy alta	11	M. E.
La Ilusión	Circasia	284,82	Muy alto	11.276,87	Muy alta	11	M. E.
La Julia	Montenegro	271,35	Muy alto	10.804,96	Muy alta	11	M. E.
La Miranda	La Tebaida	234,97	Muy alto	9.362,34	Alta	11	M. E.
La Pradera	Armenia	251,62	Muy alto	10.107,63	Muy alta	11	M. E.
Maracay	Quimbaya	270,54	Muy alto	10.728,41	Muy alta	10	Uniforme
Mónaco	Córdoba	282,73	Muy alto	11.196,40	Muy alta	11	M. E.
Paraguaicito	Buenavista	261,71	Muy alto	10.389,32	Muy alta	11	M. E.
Quebradanegra	Calarcá	287,14	Muy alto	11.365,76	Muy alta	12	M. E.
Sorrento	Montenegro	236,30	Muy alto	9.453,81	Alta	11	M. E.
Tucumán	Armenia	250,63	Muy alto	9.963,63	Alta	10	Uniforme
Vivero	Quimbaya	253,39	Muy alto	10.069,77	Muy alta	11	M. E.

M.E.: Moderadamente estacional.

en el flanco occidental, con influencia parcial en los municipios de Montenegro, La Tebaida y Génova, y la quinta estación corresponde a Tucumán, la cual no marca diferencia en la zona por estar cerca a 10.000 MJ.mm.ha⁻¹, valor a partir del cual se considera erosividad muy alta (Tabla 4). Los resultados encontrados son similares a los reportados por Ramírez *et al.*, (17) y (22) para el departamento de Caldas, el cual al igual que la zona de estudio se encuentra en la región cafetera central de Colombia.

En cuanto a la espacialización se empleó el método del peso inverso de la distancia – *IDW* (Inverse Distance Weighting) (Figura 1), por presentar un error del cuadrado medio menor que el kriging ordinario, posiblemente

debido a que los puntos de referencia son pocos (menos de 32), para tener resultados confiables en kriging (9).

Índice de concentración de las precipitaciones (*ICP*). La variabilidad temporal de la distribución de las lluvias se registró entre 10 y 12, que según la clasificación de IPC propuesta por Oliver (16), es uniforme y moderadamente estacional (Tabla 4). Se encontraron algunos tiempos marcados donde la erosividad puede ser mayor, sin embargo, debido a que los valores están próximos a la concentración uniforme ($\approx 10\%$) puede presumirse que son poco relevantes y no son determinantes para producir la mayor agresividad en un tiempo determinado y, por ende, la erosión puede darse de igual manera

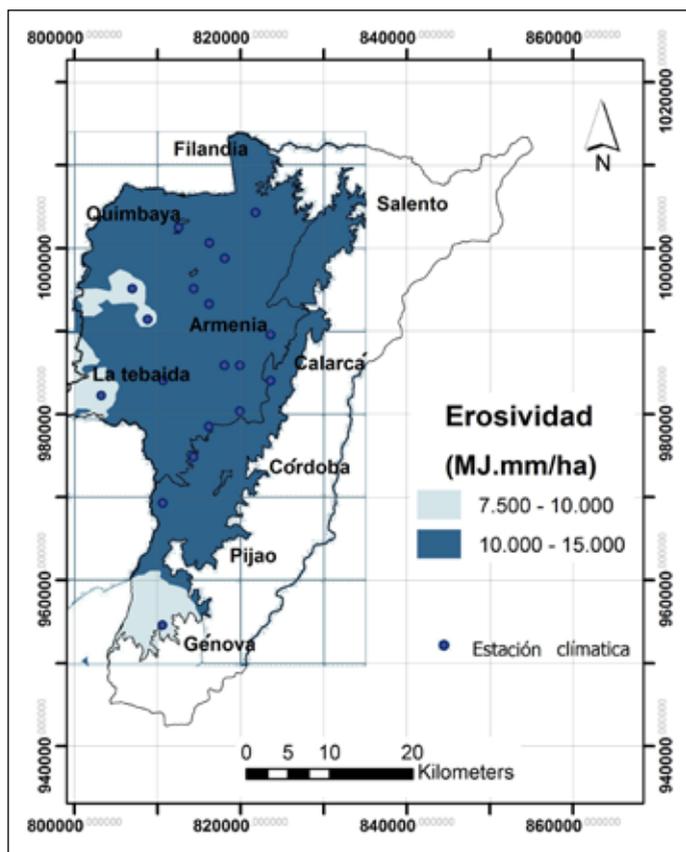


Figura 1. Mapa de distribución espacial de la erosividad (R) en la región cafetera del departamento del Quindío.

en todos los meses del año. El *ICP* calculado concuerda con los valores reportados por (22) para el departamento de Caldas.

Los anteriores resultados permiten concluir para la zona y el período evaluado, que la erosividad de la lluvia presenta una baja variabilidad espacial, con un 90% de áreas en un nivel muy alto (10.000 – 15.000 MJ.mm/ha) y el 10% restante de áreas en un nivel alto (75.000 – 10.000 MJ.mm/ha), el cual según el *ICP* es constante todo el año.

LITERATURA CITADA

1. ANGULO-MARTÍNEZ, M.; BEGUERÍA, S. 2009. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 379(1), 111–121.
2. APAYDIN, H.; ERPUL, G.; BAYRAMIN, I.; GABRIELS, D. 2006. Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey. *Journal of Hydrology*, 328(3), 726–732.
3. ARNOLDUS, H.M.J. 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin*.
4. BONILLA, C.A.; VIDAL, K.L. 2011. Rainfall erosivity in central Chile. *Journal of Hydrology*, 410(1), 126–133.
5. BRADY, N.; WEIL, R. R. 1999. *The nature and properties of soil*. New Jersey: Prentice Hall. 881 p.

6. CAPOLONGO, D.; DIODATO, N.; MANNAERTS, C. M.; PICCARRETA, M.; STROBL, R. O. 2008. Analyzing temporal changes in climate erosivity using a simplified rainfall erosivity model in Basilicata (southern Italy). *Journal of Hydrology*, 356(1), 119–130.
7. DE LUIS M.; GONZÁLEZ–HIDALGO J.C.; RAVENTÓS, J.; SÁNCHEZ, J.R.; CORTINA, J. 1997. Distribución espacial de la concentración y agresividad de la lluvia en el territorio de la Comunidad Valenciana. *Cuaternario y Geomorfología*, 11:33–44
8. FOURNIER, F. 1960. Climat et érosion; la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. (First edition) Presses Universitaires de France, Paris.
9. GOOVAERTS, P. 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of hydrology*, 228(1), 113–129.
10. HOYOS, N.; WAYLEN, P. R.; JARAMILLO, Á. 2005. Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Journal of hydrology*, 314(1), 177–191.
11. LEE, J. H.; HEO, J. H. 2011. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. *Journal of Hydrology*, 409(1), 30–48.
12. MABIT, L.; BERNARD, C. 2007. Assessment of spatial distribution of fallout radionuclides through geostatistics concept. *Journal of Environmental Radioactivity*, 97(2), 206–219.
13. MANNAERTS, C. M.; GABRIELS, D. 2000. Rainfall erosivity in Cape Verde. *Soil and Tillage Research*, 55(3), 207–212.
14. MELLO, C. D., VIOLA, M. R., BESKOW, S., Y NORTON, L. D. (2013). Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. *Geoderma*, 202, 88–102.
15. OLIVEIRA, P. T.; RODRIGUÉS, D. B.; SOBRINHO, T.A.; CARVALHO, D.F.D.; PANACHUKI, E. 2012. Spatial variability of the rainfall erosive potential in the State of Mato Grosso do Sul, Brazil. *Engenharia Agrícola*, 32(1), 69–79.
16. OLIVER, J. E. 1980. Monthly precipitation distribution: a comparative index. *The Professional Geographer*, 32(3), 300–309.
17. RAMÍREZ, F.; HINCAPIÉ, E.; SADEGHIAN, S.; Y PÉREZ, U. 2007. Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. *Cenicafé (Colombia)*, 58(1):40–52.
18. RENARD, K. G.; FREIMUD, J. R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157, 287–306.
19. RIVERA, J. H. 1990. Determinación de los índices de erosividad, erodabilidad y erosión potencial en la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). Palmira (Colombia), Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 310 p. (Tesis maestría)
20. RIVERA, J. H.; GÓMEZ, A. A. 1991. Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). *Cenicafé*, 42(2), 37–52.
21. ROMERO, C. C.; BAIGORRIA, G. A.; STROOSNIJDER, L. 2007. Changes of erosive rainfall for El Niño and La Niña years in the northern Andean highlands of Peru. *Climatic Change*, 85(3–4), 343–356.
22. OBANDO, M. F.; ECHEVERRI, T. L. 2010. Erosividad de las lluvias en la Región Centro–Sur del Departamento de Caldas, Colombia. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*, 63(1), 5307–5318.
23. VRIELING, A., STERK, G., DE JONG, S. M. 2010. Satellite–based estimation of rainfall erosivity for Africa. *Journal of hydrology*, 395(3), 235–241.
24. WANG, G.; GERTNER, G.; SINGH, V.; SHINKAREVA, S.; PARYSOW, P.; ANDERSON, A. 2002. Spatial and temporal prediction and uncertainty of soil loss using the revised universal soil loss equation: a case study of the rainfall–runoff erosivity “R” factor. *Ecological Modelling*, 153(1), 143–155.
25. WISCHMEIER, W. H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil–loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 23(3), 246–249.
26. WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. *Agric. Hbk 537. U.S.D.A.–Sci. and Educ. Admin.*, Washington, DC.
27. ZHANG, Y. G.; NEARING, M. A.; ZHANG, X. C.; XIE, Y.; WEI, H. 2010. Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multiscenario projections in Northeast China. *Journal of hydrology*, 384(1), 97–106.

EVALUACIÓN DE UN REACTOR METANOGÉNICO TIPO FILTRO ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE PARA TRATAR AGUAS MIELES DEL CAFÉ¹

Diego Antonio Zambrano Franco*; Nelson Rodríguez Valencia*;
Paula Andrea Orozco Restrepo**; Uriel López Posada***

ZAMBRANO F., D. A.; RODRÍGUEZ V., N.; OROZCO R., P. A.; LÓPEZ P., U. Evaluación de un reactor metanogénico tipo filtro anaeróbico de flujo ascendente para tratar aguas mieles del café. *Revista Cenicafé* 66(1): 32-45. 2015

Se evaluó el desempeño de un reactor metanogénico, tipo filtro anaeróbico de flujo ascendente (UAF), fabricado en polietileno negro, con tercios de botellas plásticas no retornables, como medio de soporte de bacterias metanogénicas. Como inóculo se utilizó estiércol de ganado vacuno. Este reactor hacía parte de un Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio-SMTA, ubicado en Cenicafé, para el tratamiento de las aguas residuales generadas durante el lavado del café. Las etapas de aclimatación y arranque del reactor metanogénico duraron 256 días, tiempo durante el cual se aplicaron cargas orgánicas de DQO entre 0,30-8,75 kg.m⁻³.d⁻¹. Se determinó la temperatura al interior del reactor, por medio de una sonda metálica, con lecturas diarias a las 9:00, 13:00 y 17:00 h, y análisis fisicoquímicos a los afluentes y efluentes del reactor, utilizando los métodos normalizados por la APHA. El volumen de biogás se determinó por medio de un medidor húmedo de gas y el porcentaje de metano en el biogás por absorción del CO₂ con solución de NaOH. El reactor empacado presentó una porosidad del 98,70% y el área específica de contacto del medio de soporte fue de 51,67 m²m⁻³. El promedio de la temperatura en el interior del reactor fue de 26°C, a lo largo del día, con valores de 31°C en la tarde. Las eficiencias de remoción para el estado estable del reactor metanogénico fueron 80,0%, 83,4%, 46,0% y 74,3%, para las variables DQO, DBO₅, ST y SST, respectivamente. El costo total del SMTA se redujo un 40% de lo establecido en sus modelos iniciales, alcanzando costos de COP \$2.625.000 (USD 1035), para una finca con 2% de día pico y una producción de 1.500 arrobas de café pergamino seco.

Palabras clave: Aguas residuales, tratamientos anaerobios, sistemas biológicos, contaminación hídrica.

EVALUATION OF A UPFLOW ANAEROBIC FILTER (UAF) FOR THE WATER WASTE COFFEE TREATMENT

This research was conducted in order to evaluate the performance of a methanogenic reactor of 2 m³, type upflow anaerobic filter (UAF), made of black polyethylene, using inside thirds of non-returnable PET plastic bottles as a means methanogenic bacteria support. As inoculum of methanogenic bacteria, cattle manure was used at a rate of 119 g SSV L⁻¹. This reactor was part of a Modular System Anaerobic Treatment SMTA, located in the National Coffee Research Center "Cenicafé" to treat wastewater generated during washing of coffee. The stages of acclimatization and methanogenic reactor startup lasted 256 days and during this time organic loads ranging between 0,3 and 8,75 kg DQO m⁻³ d⁻¹ were applied. The temperature monitoring was carried into the reactor by means of a metal probe daily with 3 readings: at 9:00, 13:00 and 17:00 hours and physicochemical analysis to the reactor influent and effluent using standar methods by APHA. The volume of biogas obtained during the treatment process was determined by a wet gas meter and the percentage of methane in the biogas by CO₂ absorption with NaOH. It was found that the reactor packed with non-returnable plastic bottles had a porosity of 98,7% and the specific contact area of the support means was 51,67 m² m⁻³ reactor. The average temperature inside the reactor throughout the day was 26°C, reaching values of 31°C in the afternoon. The average removal efficiencies for methanogenic reactor in steady state were 80,0%, 83,4%, 46,0% and 74,3%; for COD, BOD₅, ST and SST variables respectively. The total cost of SMTA it decreases in 40% as provides in their initial models, reaching COP \$ 2.625.000 costs (USD 1035) for a farm with 2% peak day and a production of 1,500 pounds of dry parchment coffee.

Keywords: Wastewater, Anaerobic treatment, Honey Coffee, Biological systems, Upflow anaerobic filters, Water pollution.

¹ Fragmento de la Tesis "Arranque y puesta en marcha de un reactor metanogénico tipo UAF para el tratamiento de las aguas residuales del lavado del café, presentada por la coautora como requisito para optar al título de Ingeniera Química. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2003. 90 p.

* Investigador Científico II e Investigador Científico III, respectivamente. Disciplina de Gestión de Recursos Naturales y Conservación, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

** Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

*** Auxiliar I de Investigación. Gestión de Bienes y Servicios, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

La producción de grandes volúmenes de aguas residuales en el proceso de beneficio húmedo del café, presenta un alto riesgo de impacto ambiental negativo, debido a que éstas transportan una alta carga contaminante en términos de sólidos y Demanda Química de Oxígeno-DQO, así como una alta acidez, reflejada en los bajos valores del pH, cuyo vertimiento en las corrientes de agua puede ocasionar serios desequilibrios del ecosistema receptor y, la consiguiente, disminución de su productividad (2). Es así, como la industria cafetera, de gran importancia y significado en la vida socioeconómica del país, se convierte en una de las más contaminantes, responsable del 55% de la huella hídrica gris agrícola en Colombia (3). Desde 1984, en Cenicafé se han efectuado investigaciones relacionadas con el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del beneficio, tendientes a encontrar la solución más económica para descontaminarlas (12).

En el laboratorio, luego de estudiar varias tecnologías, se propusieron los primeros prototipos de plantas de tratamiento de aguas residuales en fincas cafeteras, las cuales después de ser evaluadas y ajustadas, arrojaron como resultado el desarrollo del Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA), constituido por una fase hidrolítica-acidogénica y una fase metanogénica, sistema que ha tenido amplia aceptación en las zonas cafeteras de los departamentos de Tolima, Cundinamarca, Magdalena, Quindío, Cauca, Caldas y Huila, entre otros. En el montaje del reactor metanogénico se han evaluado satisfactoriamente diferentes medios de soporte de microorganismos, como la borra de café, la guadua, botellas no retornables y llantas usadas, y diferentes materiales del reactor, tales como el asbesto cemento, la fibra de vidrio y el polietileno. La tecnología SMTA ganó en el 2008 el premio de la tercera

convocatoria Aurelio Llano Posada, en su categoría Investigación y Desarrollo (11).

El presente trabajo se desarrolló con el objetivo de evaluar la factibilidad y desempeño de un reactor metanogénico tipo UAF fabricado en polietileno, utilizando Botellas Plásticas No Retornables (BPNR) como material de soporte de la biomasa, buscando plantear una estrategia más económica para el montaje de los reactores metanogénicos, que forman parte de los SMTA, que utilizan trozos de guadua, y obtener eficiencias de remoción acordes con lo exigido por la legislación colombiana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se construyó un reactor metanogénico utilizando un tanque fabricado en polietileno negro, de 2.000 L de capacidad, con una altura de 173 cm, diámetro superior de 147,5 cm y diámetro inferior de 115 cm. Se prepararon 350 L de inóculo metanogénico (con una concentración, por reactor, de Sólidos Suspendedos Volátiles de $3,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), mezclando estiércol de ganado vacuno y agua corriente en proporción 1:1 (V/V). La mezcla se almacenó en canecas plásticas y se dejó reposar durante tres semanas (Figura 1).

Posteriormente, se filtró la mezcla utilizando un cedazo de malla mosquitera, dejando pasar sólo la fase líquida, la cual constituyó el inóculo. Como sustrato se utilizó agua residual del lavado de café (ARL) obtenida mediante la utilización de tanque tina, el cual permite un consumo promedio de agua de $4,13 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$ de café pergamino seco (cps), con una concentración de DQO de 27.400 ppm, pH de 3,85 y una relación DQO/ST de 1,2 (10). No se utilizó agua residual de despulpado, dado que las nuevas tecnologías de beneficio ecológico involucran el despulpado y transporte de la pulpa sin agua (1).



Figura 1. Preparación de inóculo metanogénico con estiércol vacuno.

El reactor se empacó completamente con botellas plásticas no retornables de 2,0 y 2,5 L de capacidad, partidas en tercios; el tercio inferior tuvo la forma de un cilindro con tapa en uno de sus extremos, el tercio medio tuvo la forma de un cilindro sin tapas y el tercio superior tuvo la forma de un cono.

Los microorganismos se aclimataron a la nueva fuente de alimento, constituida por las aguas mieles. La etapa de aclimatación se llevó a cabo durante los primeros 58 días, durante la cual se fijó un tiempo de retención hidráulico de 2,6 días. Al iniciar, la carga orgánica aplicada, en términos de DQO, se estableció en $0,3 \text{ kg.m}^3.\text{día}^{-1}$

La etapa de arranque y estabilización se llevó a cabo mediante un aumento gradual de carga, sin neutralizar las aguas residuales. Tuvo una duración de 204 días, comprendida entre los días 59 y 256, el tiempo de retención hidráulico se mantuvo en 2,6 días. El monitoreo del reactor metanogénico se

inició una vez efectuado el arranque, hasta condiciones de estado estable. Se registraron las características fisicoquímicas de los afluentes y efluentes, tales como el pH, DQO, DBO₅, SST y ST, temperatura y producción de cantidad y calidad del biogás producido.

Para la medición de la temperatura en el interior del reactor, se instalaron dos tubos de PVC, uno en el centro y otro junto a la pared, para permitir el paso de una sonda (Figura 2).

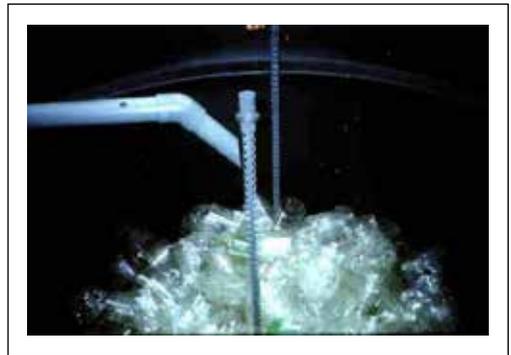


Figura 2. Tubos para sondeo de temperatura interna de los tanques y tercio de botellas para soporte de biopellicula.

El monitoreo de las características físico químicas de los afluentes y efluentes (Tabla 1) se realizó con base en los métodos de la APHA (5).

Para la determinación de la porosidad del reactor empacado con los tercios de las botellas no retornables (P_o), se calculó el volumen del agua en el reactor sin empacar (V_r) y el volumen del agua en el reactor empacado (V_o), como se presenta en la Ecuación <1>.

$$P_o = \frac{V_o}{V_c} * 100 \quad <1>$$

Tabla 1. Variables físico-químicas monitoreadas en la evaluación del reactor.

Variables	Punto de muestreo	Método analítico	Frecuencia	Unidades de medida
Demanda Química de Oxígeno	Afluyente Efluyente	Digestión- semimicroespectrofotométrico	Quincenal	mg.L ⁻¹
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Afluyente Efluyente	Método Winkler	Mensual	mg.L ⁻¹
Sólidos totales	Afluyente Efluyente	Método gravimétrico	Quincenal	mg.L ⁻¹
Sólidos suspendidos totales	Afluyente Efluyente	Método gravimétrico	Quincenal	mg.L ⁻¹
Nitrógeno total y amoniacal	Afluyente Efluyente	Método Kjeldahl	Quincenal	mg.L ⁻¹
Acidez	Afluyente	Titulación NaOH a pH 7,5	Diario	mg de NaOH por g de DQO
Alcalinidad	Efluyente	Método de Jenkis	Diario	mg.L ⁻¹ CaCO ₃
pH	Afluyente Efluyente	Potenciómetro	Diario	
Caudal	Afluyente Efluyente	Volumétrico	Diario	mL.min ⁻¹

Para determinar el área específica de contacto del medio de soporte se contabilizó el número de trozos necesarios para llenar el

reactor, tomando el promedio de las medidas para los trozos de la botella. En su cálculo se aplicó la Ecuación <2>:

$$Aes = [(4\pi rc * Lc * Nc) + (4\pi rcp * Lcp + 2\pi rcp^2 - 2\pi rin^2) * Ncp + (2\pi rco * (rco^2 + Lco^2)^{1/2} * Nco)] / Vc \quad <2>$$

Donde:

Aes = Área específica de contacto en m².m⁻³

rc = Radio promedio de los trozos con forma de cilindro sin tapas

Lc = Longitud promedio de los trozos con forma de cilindro sin tapas

Nc = Número de trozos con forma de cilindro sin tapas

rcp = Radio promedio de los trozos con forma de cilindro con tapa

Lcp = Longitud promedio de los trozos con forma de cilindro con tapa

rin = Radio de la abertura en el fondo del cilindro con tapa

Ncp = Número de trozos con forma de cilindro con tapa

rco = Radio promedio de los trozos con forma de cono

Lco = Longitud promedio de los trozos con forma de cono

Nco = Número de trozos con forma de cono

Vc = Volumen del reactor

La temperatura se determinó por medio de una sonda metálica con sensor de platino, a través de tubos de pvc instalados uno al centro y otro en la pared del reactor, en la parte superior, media e inferior del reactor, ubicados a 1,0; 70,0 y 130,0 cm con respecto al fondo, en horas de la mañana (9:00), al medio día (13:00) y tarde (17:00 pm). Para medir la cantidad de biogás producido se utilizó un medidor húmedo de gas GCA/Precision Scientific. La calidad del biogás (% de CH₄) se determinó por el método

reportado por Field, 1987, modificado por Zambrano (9).

Una vez el reactor alcanzó condiciones de estado estable (pH de salida superior a 6 unidades y relaciones de alcalinidad menores a 0,4) a 23°C y 677 mb de presión, se determinó la velocidad crítica y de arrastre de la biomasa, por medio de ensayos en el laboratorio. Se utilizó un tubo de vidrio de 22,5 cm de largo y 4,3 cm de diámetro, dispuesto en forma vertical, dentro del cual se introdujo un trozo de botella, colonizada por la biomasa, de 2,5 cm de ancho por 4,5 cm de largo (Figura 3).



Figura 3. Dispositivo para la determinación de velocidad crítica y de arrastre.

El tubo de vidrio se adaptó en uno de sus extremos, por medio de una manguera, a una bomba peristáltica encargada de hacer fluir el agua a través de él. En el otro extremo del tubo se adaptó una manguera y se determinó el caudal por medio de un cronómetro y una probeta. El caudal de agua residual se aumentó progresivamente hasta encontrar la velocidad necesaria para iniciar el movimiento de la biopelícula

superficial, el desprendimiento de ésta y el desprendimiento de la biomasa adherida a la pared del trozo de botella. Se realizaron 16 ensayos con trozos de botellas extraídos de la parte superior del reactor instalado en el campo.

Se realizó un análisis estadístico descriptivo, en el cual se calcularon los valores medio, máximo, mínimo, desviación estándar y coeficiente de variación de las siguientes variables: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Totales (ST), Nitrógeno Total (N_T), Nitrógeno Amoniacal ($N-NH_3$), pH y Alcalinidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2, se presenta el análisis estadístico descriptivo para las condiciones de estado estable, para las características físico-químicas de la corriente de salida del reactor.

Evaluación del reactor metanogénico tipo UAF

Etapas de aclimatación. Durante esta etapa se realizó un seguimiento del pH, la alcalinidad y la relación de alcalinidad. Los episodios de acidificación (pH menor a 5,75) se presentaron en los días 17, 20, 27, 45, 46, 47, 48 y 55 después de la inoculación del reactor metanogénico. La alcalinidad evaluada a pH 5,75, en términos de $CaCO_3$ se mantuvo en un valor promedio de 308 $mg.L^{-1}$. Para la aclimatación, la relación de alcalinidad alcanzó valores superiores a 0,9, lo cual indica una sobrecarga de ácidos grasos volátiles, influenciada por la baja tasa de crecimiento de los microorganismos metanogénicos, los cuales se estaban adaptando al sustrato a tratar. La relación de alcalinidad es la relación entre la diferencia de volúmenes de ácido

Tabla 2. Valores estadísticos para características físico-químicas del líquido efluente del reactor UAF en estado estable.

Variables	DQO (ppm)	ST (ppm)	SST (ppm)	N _T (ppm)	N-NH ₃ (ppm)	DBO ₅ (ppm)	Alcalinidad (mg.L ⁻¹ de CaCO ₃)		pH Unidades
							A pH 5,75	A pH 4,3	
Promedio	3.662,0	3.941,0	317,0	139,0	105,0	1.933,0	1.449,0	2.658,0	6,8
Desviación estándar	1.166,0	761,3	58,6	43,3	23,4	682,5	684,0	783,6	0,3
Coefficiente de variación	31,8	19,3	18,5	31,1	22,3	35,3	47,2	29,5	4,8
Máximo	5.160,0	5.038,0	380,0	186,0	134,0	2.550,0	2.255,0	3.698,0	7,2
Mínimo	2.280,0	2.995,0	225,0	84,0	78,0	1.200,0	275,0	1.076,0	6,2
Número de datos	5	5	5	5	5	3	57	57	57

DQO: Demanda Química de Oxígeno; **ST:** Sólidos Totales; **SST:** Sólidos Suspendidos Totales; **N_T:** Nitrógeno total Kjeldahl; **N-NH₃:** Nitrógeno amoniacal; **DBO₅:** Demanda Bioquímica de Oxígeno.

gastados en la titulación de la muestra a pH 5,75 y 4,3 y el volumen de ácido gastado en la titulación de la muestra a pH 4,3. La diferencia entre estos dos volúmenes es el volumen consumido por los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) presentes. Si no existieran ácidos grasos volátiles en solución, el valor de la variable sería 0,20. La presencia de AGV hace que para alcanzar el pH de 4,3 sea necesario añadir más volumen de ácido, con el fin de transformar las sales orgánicas en sus ácidos correspondientes, lo que implica aumento en la relación (5).

Etapas de arranque y estabilización. Durante el arranque, la carga orgánica del afluente, en términos de DQO, se incrementó desde 0,30 hasta 5,13 kg.m⁻³.día⁻¹ (Figura 4). El reactor UAF presentó una baja remoción de DQO debido al aumento paulatino de carga, pero mantuvo el pH en valores superiores a seis unidades, lo cual le permitió neutralizar los ácidos generados en la etapa de hidrólisis, evitando un impacto negativo sobre el crecimiento de las bacterias metanogénicas. A pesar de que en el día 129 el reactor alcanzó una remoción del 79,0% en términos

de la DQO (Figura 5), con pH en valores superiores a 6 unidades, ante el aumento de carga hasta 7,6 kg.m⁻³.día⁻¹, el reactor bajó su eficiencia, por lo que se hizo necesario reducir la concentración del líquido afluente hasta que los valores de remoción fueran superiores al 80%, con el fin de cumplir con la normativa ambiental vigente. Esto implicó disminuir la carga orgánica hasta 2,65 kg.m⁻³.día⁻¹, momento en el cual la eficiencia de remoción alcanzó el 84,3%, permitiendo reiniciar el aumento de carga.

Durante el período de arranque se observó una acidificación entre los días 174 y 189 (Figura 6), donde el líquido efluente presentó valores de pH de 5,45, un descenso significativo de la alcalinidad y relaciones de alcalinidad mayores a 0,9. Dado que los reactores metanogénicos de los SMTA operan sin neutralizar, para permitir su recuperación e impedir que el pH siguiera disminuyendo y afectara a las bacterias metanogénicas, se suspendió el paso de flujo durante un día. Esta acidificación se debió posiblemente al incremento de la acidez del sustrato que alcanzó valores de consumo de titulante

(a pH 7,5), en términos de NaOH, de 152 mg.g⁻¹ de DQO, siendo el valor promedio entre 110 y 120 mg.g⁻¹ de DQO (9). El cambio brusco en la acidez del sustrato puede asociarse a la práctica común de recolección del café cereza, en la cual no todos los granos recolectados son maduros, existe una variedad en la proporción de los granos cosechados clasificados por su grado de madurez, los cuales para el caso de este estudio, mostraron en promedio los siguiente valores: sobremaduro 19,6%, maduro 40,9%, pintón 19,3%, verde 2,4% y seco 17,8%

Esta variabilidad de los granos recolectados conlleva a cambios en la composición química del agua residual. Superada la etapa de acidificación, se observó una recuperación del pH, con valores tendientes a 7,0 (Figura 6). Igualmente, se registró un incremento de la alcalinidad y un rápido descenso de la relación de alcalinidad, indicando una estabilidad del sistema (Figura 7). La relación de

alcalinidad alcanzó en el último período valores alrededor de 0,4, e incluso mucho menores, lo cual coincide con el criterio de estabilidad propuesto por Field (4).

La carga máxima de DQO (8,75 kg.m⁻³.día⁻¹) se alcanzó a los 226 días después de realizada la inoculación (Figura 4) y la eficiencia de remoción de la DQO fue del 77% (Figura 5). La eficiencia de remoción para la DBO₅ durante la etapa de estabilización (días 198 al 256) fue superior al 80% (Figura 5), con lo cual se logró cumplir con lo exigido en el Decreto ley 1594 de 1984 (7).

A partir del día 198 el líquido efluente del reactor metanogénico presentó un pH tendiente a la neutralidad, con remociones de carga orgánica superiores al 76%, en términos de la DQO, lo que implica que los reactores metanogénicos de los Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (SMTA), cuando se encuentran en estado estable pueden operar sin neutralización del sustrato, tal como lo reporta Zambrano (9).

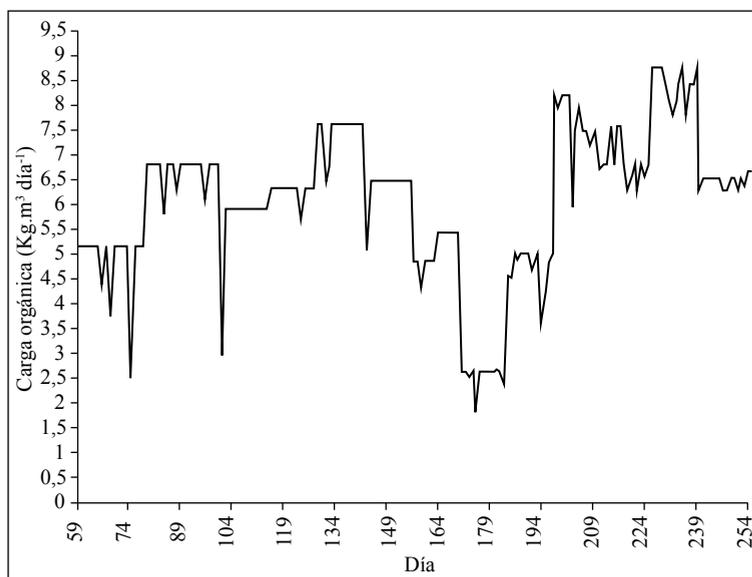


Figura 4. Carga orgánica aplicada.

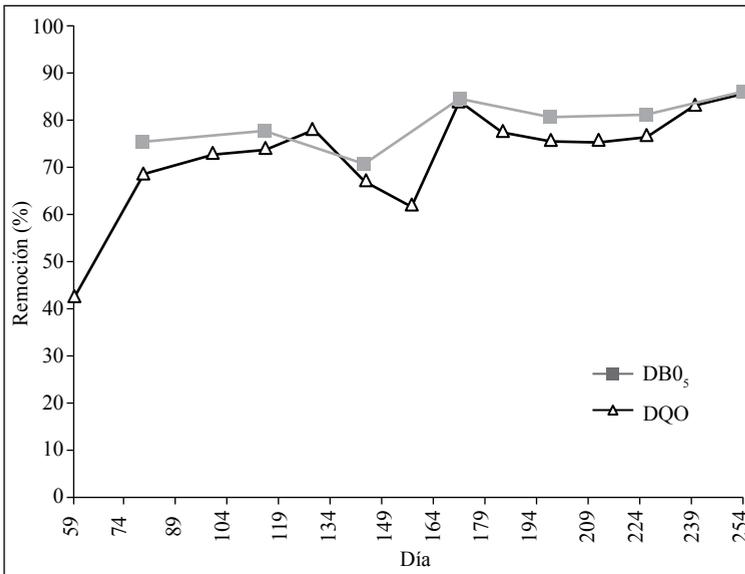


Figura 5. Eficiencia de remoción DQO y DBO₅ (%).

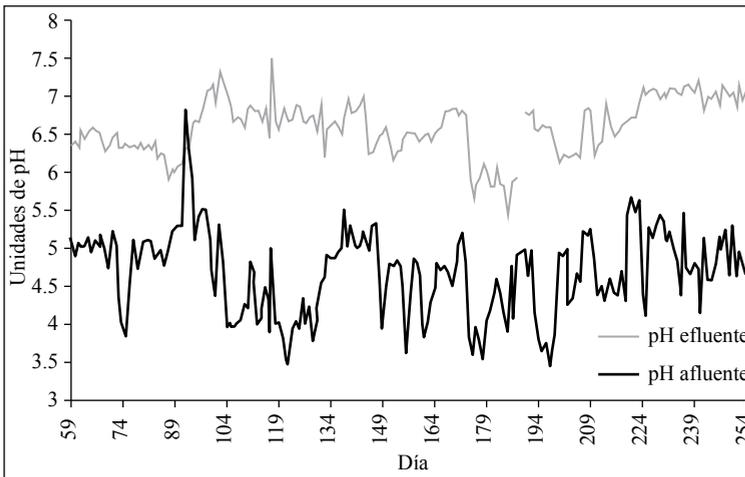


Figura 6. pH líquido afluente y efluente.

El promedio de las eficiencias de remoción para el estado estable del reactor metanogénico UAF fueron del 80,0%, 83,4%, 45,9% y 72,3%, para la DQO, DBO₅, ST y SST, respectivamente (6).

A partir de los datos promedio del líquido efluente puede calcularse una eficiencia de remoción teórica para el SMTA del 86,6%

en términos de la DQO, considerando el valor inicial de DQO del agua miel del café que se genera en el tanque tina cuando se lava el grano y que en promedio tuvo una concentración de DQO de 27.400 ppm (10). De la remoción total teórica, el 61,11% se efectúa en el reactor metanogénico y el 38,89% restante en el reactor hidrolítico-acidogénico y en la recámara de dosificación.

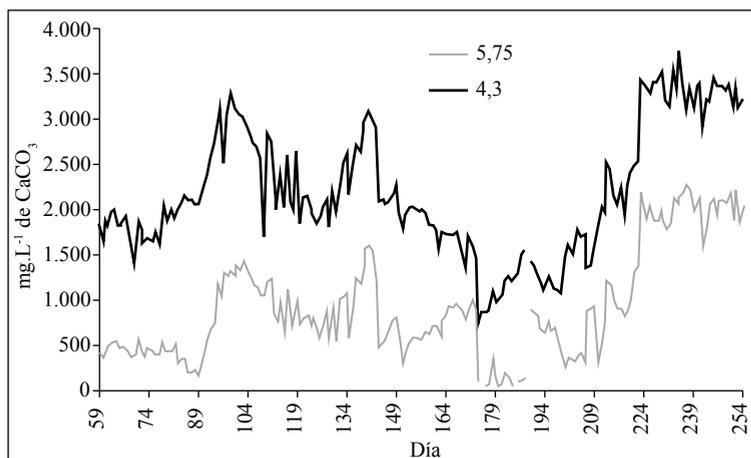


Figura 7. Alcalinidad a pH 5,75 y 4,30.

Durante la digestión anaerobia hubo una mineralización del nitrógeno orgánico, la cual alcanzó en promedio el 81,6% para el reactor UAF evaluado.

Biogás. Para la máxima carga orgánica aplicada al reactor UAF, el volumen de biogás producido, a condiciones normales, fue de $2,50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$ (Figura 8). Durante el período de estabilidad el valor promedio fue $1,98 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$, con un porcentaje de metano del 62% (Figura 9).

Entre los días 169 y 180, se observó una elevación en el porcentaje de metano en el biogás. Durante este período la carga de DQO fue de $2,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$. Las cargas orgánicas bajas permiten mayor tiempo de retención del biogás dentro del reactor, lo que facilita la metabolización del CO_2 y el H_2 producido durante las etapas de hidrólisis y acidogénesis. Entre los días 198 y 256 se observó una estabilidad del valor de la eficiencia metanogénica, indicando una aclimatación de los microorganismos al sustrato. La eficiencia promedio de CH_4 fue de $0,172 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ de DQO aplicado, acorde con el valor reportado por Zambrano (9), para aguas residuales del lavado del café

acidificadas, tratadas a temperatura ambiente y sin neutralización.

Field (4), para el tratamiento anaerobio de residuos, menciona que el reactor se encuentra en estado estable y con una alta eficiencia cuando la producción de metano por kilogramo de DQO removido está comprendida entre $0,3$ y $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ de DQO aplicado, con un valor óptimo de $0,35 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ de DQO aplicado. Las investigaciones desarrolladas en Cenicafé han mostrado para aguas residuales del lavado del café acidificadas, tratadas a temperatura ambiente y sin neutralizar, un valor promedio es $0,227 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ de DQO aplicado. La eficiencia metanogénica para los días de estabilidad fue en promedio $0,219 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ de DQO aplicado, lo cual indica una adecuada degradación y aclimatación de las bacterias metanogénicas adheridas al soporte de botellas plásticas en el reactor UAF.

Ganancia de temperatura del reactor UAF.

En las Tablas 3 y 4 se presentan los valores de la variación de temperatura en el interior del reactor UAF durante el día.

En el interior del reactor a 1,0 cm, 70,0 cm y 130,0 cm, con respecto al fondo, la

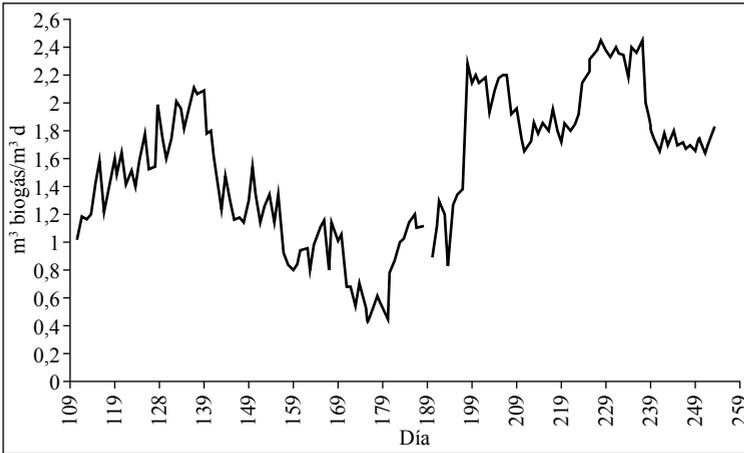


Figura 8. Producción diaria de biogás.

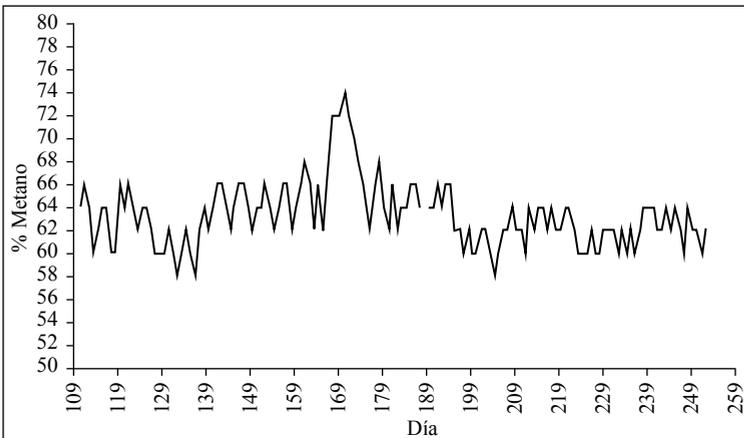


Figura 9. Porcentaje de metano en el biogás.

variación de la temperatura es menor a 1°C . Las diferencias oscilaron entre $0,13$ y $0,37^{\circ}\text{C}$, en promedio, entre la parte superior y la parte media, entre $0,42$ y $0,61^{\circ}\text{C}$ entre la parte media y la parte inferior, y entre $0,55$ y $0,90^{\circ}\text{C}$ entre la parte superior y la parte inferior, entre las 9:00 y las 17:00 horas. La mayor variación de temperatura, a lo largo del reactor, se registró a las 13:00 horas (Tabla 3).

La diferencia entre las temperaturas (a la misma hora) entre el centro y la pared del reactor son despreciables, tanto en la zona

superior, media e inferior, con diferencias promedio en el rango entre $0,11$ y $0,19^{\circ}\text{C}$ (Tabla 4).

Entre las 9:00 y las 17:00 horas, el reactor gana, en su interior, aproximadamente 2°C en cada uno de los puntos donde se determinó la temperatura.

La temperatura promedio a las 9:00 horas fue $24,97^{\circ}\text{C}$ para el centro y $25,08^{\circ}\text{C}$ junto a la pared; a las 13:00 horas fue de $26,02^{\circ}\text{C}$ para el centro y $26,21^{\circ}\text{C}$ junto a la pared, y a las 17:00 horas fue de $26,94^{\circ}\text{C}$

Tabla 3. Valores de temperatura en el interior del reactor, a lo largo de la zona central.

	Parte inferior (1 cm)			Parte media (70 cm)			Parte superior (130 cm)		
	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00
Media	24,65	25,49	26,45	25,07	26,10	27,04	25,20	26,47	27,33
σ	1,46	1,69	1,95	1,52	1,76	2,03	1,50	1,79	2,00
C.V. %	5,92	6,66	7,37	6,06	6,74	7,50	5,97	6,76	7,34
Max	28,60	30,70	30,7	28,90	31,30	31,10	29,00	31,50	31,50
Min	21,30	20,80	22	21,30	21,00	22,70	21,00	21,00	22,60
Datos	182	182	182	182	182	182	182	182	182

Tabla 4. Valores de temperatura en el interior del reactor, a lo largo de la zona adyacente a la pared.

	Parte inferior (1 cm)			Parte media (70 cm)			Parte superior (130 cm)		
	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00
Media	24,73	25,67	26,57	25,24	26,4	27,26	25,29	26,58	27,45
σ	1,47	1,72	1,93	1,52	1,80	2,0	1,49	1,82	1,99
C.V. %	5,97	6,71	7,27	6,02	6,84	7,35	5,93	6,85	7,27
Max	28,60	30,80	30,90	29,00	31,50	31,50	29,10	31,60	31,50
Min	21,30	20,90	22,00	21,20	21,00	22,70	21,0	21,0	22,6
Datos	182	182	182	182	182	182	182	182	182

para el centro y 27,09°C junto a la pared. El promedio de la temperatura ambiente fue de 23,0°C, 26,0°C y 25,9°C para las 9:00, 13:00 y 17:00 horas, respectivamente. En días calurosos, con temperatura ambiente diurna promedio de 27°C, el reactor alcanzó temperaturas hasta de 31,6°C, en horas de la tarde.

Velocidad crítica de arrastre de biopelícula y carga hidráulica máxima admisible. En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos y el análisis estadístico descriptivo. Se determinaron las velocidades necesarias para iniciar el movimiento de la biopelícula superficial (MSF), el desprendimiento de la biopelícula superficial (DFS) y el desprendimiento de la biopelícula adherida al empaque (DFAP).

La biomasa adherida al medio de soporte (botellas plásticas no retornables) inició su movimiento al aplicar una velocidad media de

309 m.día⁻¹ (12,9 m.h⁻¹), el desprendimiento de las capas externas de la biomasa superficial adherida al medio de soporte se presentó al aplicar una velocidad media de 531 m.día⁻¹ y el desprendimiento completo de la biomasa del medio de soporte se registró al aplicar una velocidad media de 714 m.día⁻¹. Esta carga hidráulica fue cuatro veces mayor al valor reportado en la literatura para reactores de manto de lodos (UASB), cuyo valor ha sido reportado en 3 m.h⁻¹ (7), mostrando las ventajas de los reactores UAF sobre los UASB, al permitir retener mayor biomasa a la misma carga hidráulica aplicada.

Características del medio de soporte. El promedio del volumen del agua en un reactor piloto empacado a escala de laboratorio (Vo) fue de 166 L y sin empacar (Vc) fue de 168 L. El lecho con botellas plásticas presentó una porosidad de 98,7%, un 25% más que la porosidad de los reactores empacados con guadua (9). Una

Tabla 5. Velocidades aplicadas para iniciar el movimiento de la biopelícula superficial (MSF), el desprendimiento de la biopelícula superficial (DFS) y el desprendimiento de la biopelícula adherida al empaque (DFAP).

Ensayo	Velocidad (m.día ⁻¹)		
	MFS	DFS	DFAP
1	299	362	543
2	335	652	815
3	380	585	787
4	326	670	760
5	399	869	970
6	471	978	-
7	235	380	761
8	289	543	-
9	217	344	706
10	298	417	652
11	362	670	-
12	235	443	652
13	217	307	489
14	344	435	-
15	362	453	-
16	181	380	-
Media	309	531	714
Desv. St	78,35	194,20	138,65
C.V.(%)	25,32	36,61	19,43
Máximo	471	978	970
Mínimo	181	307	489

alta porosidad resulta beneficiosa, ya que permite una mejor distribución de flujo, lo cual disminuye los problemas de ocurrencia común en los soportes convencionales, como son el taponamiento, el flujo preferencial y la reducción del volumen útil del reactor; favoreciendo el tratamiento de aguas residuales con alta carga orgánica.

El valor medio del área superficial de contacto del medio de soporte fue de 51,67 m².m⁻³, ofreciendo un 7% más área específica de contacto que la encontrada para la guadua (48,2 m².m⁻³) (9). La baja tasa de crecimiento de los microorganismos metanogénicos

involucrados en la fermentación metánica, es la principal razón de la necesidad de la retención de la biomasa en los reactores anaerobios, con el fin de aumentar la eficiencia del proceso.

Costos. En la Tabla 6 se presentan los resultados de los análisis de costos de un SMTA, según el tipo de reactor metanogénico instalado.

La adopción de un tanque fabricado en polietileno como reactor metanogénico permite reducir los costos unitarios de inversión en un 40%. Éstos disminuyen desde USD \$ 1,16 hasta USD \$ 0,69 por 12,5 kg de cps. El costo total del SMTA fue de USD \$ 1035 para una finca con una producción anual de 18.750 kg de cps. La distribución de los costos se ilustra en la Figura 10.

Con la tecnología SMTA, remover 1,0 kg de DQO tiene un costo aproximado de USD \$ 0,12 con una vida útil para este sistema estimada en 20 años.

Puede concluirse que:

- El reactor metanogénico empacado con trozos de botellas plásticas no retornables presentó una porosidad de 98,71% y un área específica de contacto de 51,66%, superiores en un 25% y un 7%, respectivamente, a la porosidad y el área ofrecida por los trozos de guadua que se han utilizado para el empaque de los reactores.
- El reactor metanogénico empacado con trozos de botellas plásticas no retornables permite admitir una carga hidráulica de 12,9 m.h⁻¹, antes de que inicie el desprendimiento de la biomasa del material de soporte, lo que representó cuatro veces el valor reportado para reactores anaerobios de manto de lodos (UASB).

Tabla 6. Costos de inversión para la construcción de un SMTA con reactor metanogénico en fibra de vidrio y en polietileno para finca con una producción anual de 18.750 kg de cps (1.500 @) (2015).

Componente del SMTA	COP		USD (2537COP= 1USD)	
Reactor hidrolítico acidogénico				
Plastilona IKL-500	1.200.000		473,00	
Tubería y accesorios	75.000		29,50	
Mano de obra	75.000		29,50	
Recámara dosificadora				
Materiales de construcción	200.000		78,80	
Mano de obra	100.000		39,40	
Reactor metanogénico				
	Fibra	Polietileno	Fibra	Polietileno
Tanque	2.200.000	450.000	867,20	177,40
Tubería y accesorios	135.000	125.000	53,20	49,30
Soporte (botellas)	150.000	150.000	59,10	59,10
Mano de obra	100.000	75.000	39,40	29,50
Manguera polietileno reciclado 1½”	175.000	175.000	69,00	69,00
Total SMTA	COP \$4.410.000	\$ 2.625.000	US\$1738	US\$ 1035

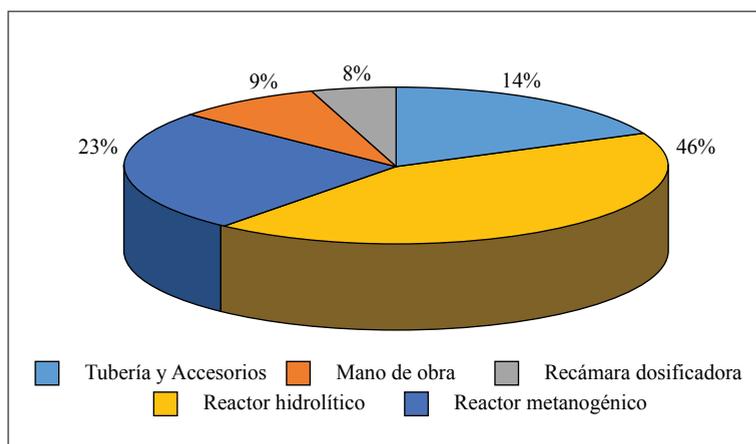


Figura 10. Distribución de costos SMTA.

- La temperatura promedio en el interior del reactor metanogénico construido en polietileno, en el transcurso del día fue de 26°C. A pesar de no alcanzar el rango de temperatura mesófilo (entre 30 y 40°C) dentro del cual las bacterias metanogénicas logran un óptimo crecimiento, el valor obtenido permitió un buen desempeño del reactor sin incremento de los costos, teniendo en cuenta que la ganancia de temperatura en el reactor dependió únicamente de las condiciones climáticas.
- Los promedios de las eficiencias de remoción para el estado estable del reactor metanogénico fueron del 80,0%, 83,4%, 45,9% y 72,3%, para DQO, DBO₅, ST y SST, respectivamente.

- El reactor metanogénico construido en polietileno y empacado con botellas plásticas no retornables alcanzó cargas orgánicas de DQO hasta de 8,75 kg.m⁻³. día⁻¹, con una eficiencia de remoción del 77,0% en términos de la DQO.
 - Teóricamente, la eficiencia de remoción alcanzada por el SMTA con el reactor metanogénico construido en polietileno y empacado con botellas plásticas no retornables (reactor tipo UAF), considerando un promedio de concentración de 27.400 ppm de DQO en las aguas de lavado, fue de 86,6% en términos de la DQO, y 87,8% en términos de la DBO, acordes con lo exigido en el decreto 1594 de 1984, del Ministerio de Agricultura.
 - La depuración de las aguas residuales del lavado del café por medio del SMTA (con una eficiencia del 86,6%), permite evitar el 96,5% de la contaminación potencial generada durante el beneficio húmedo del café.
 - La adopción de un tanque fabricado en polietileno como reactor metanogénico en el SMTA, permite reducir los costos de inversión en un 40%, disminuyendo de USD \$ 1,16 a USD \$ 0,69 por 12,5 kg de cps.
3. ARÉVALOU., D.; LOZANO A., J.G.; SABOGAL M., J. Estudio nacional de huella hídrica Colombia: Sector agrícola. Revista internacional de sostenibilidad, tecnología y humanismo 7:101-126. 2011.
 4. FIELD, J. Parámetros operativos del manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente: Manual del curso. Santiago de Cali : Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos : UASP, 1987. p. B1-B35.
 5. ISAZA H., J.D. Manual de laboratorio de biodigestión anaeróbica y caracterización de aguas residuales. Chinchiná : Cenicafé, 1996.
 6. OROZCO R., P.A. Arranque y puesta en marcha de un reactor metanogénico tipo UAF para el tratamiento de las aguas residuales del lavado del café. Manizales : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería y arquitectura, 2003. 90 p. Tesis: Ingeniera química.
 7. REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ministerio de agricultura. Decreto número 1594 de 1984. Bogotá : Ministerio de agricultura, 1984. 48 p.
 8. UNIVERSIDAD DEL VALLE. Generación de energía: Criterios de diseño para sistemas de tratamiento anaerobio UASB. Santiago de Cali : CURSO Tratamiento anaerobio de las aguas residuales, 1987.
 9. ZAMBRANO F., D.A. Biodigestión anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. En: CENICAFÉ. Informe anual de actividades de la disciplina de química industrial Octubre 1988-Septiembre 1989. Chinchiná : Cenicafé, 1989.
 10. ZAMBRANO F., D.A.; ISAZA H., J.D. Lavado del café en los tanques de fermentación. Cenicafé 45(3):106-118. 1994.
 11. ZAMBRANO F., D.A.; RODRÍGUEZ V., N. Sistemas para el tratamiento de aguas mieles: Investigación aplicada en beneficio de los productores cafeteros. Chinchiná : Cenicafé, 2008. 25 p.
 12. ZULUAGAV., J.; ZAMBRANO F., D.A.; RODRÍGUEZ V., N.; DÁVILA A., M.T. Estrategias para el manejo y valorización de los subproductos del proceso de beneficio húmedo del café. Chinchiná : SEMINARIO sobre control de la contaminación en la agroindustria cafetera : Cenicafé, 1993. 82 p.

LITERATURA CITADA

1. ÁLVAREZ G., J. Despulpado del café sin agua. Chinchiná : Cenicafé, 1991. 6 p. (Avances Técnicos No. 164)
2. ARCILA O., F. Perjuicios causados por los residuos del beneficio del café. Chinchiná : Cenicafé, 1979. 2 p. (Avances Técnicos No. 96).

MANEJO DE LIXIVIADOS Y AGUAS DE LAVADO EN EL PROCESO DE BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ¹

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

RAMÍREZ G., C.A.; OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R. Manejo de lixiviados y aguas de lavado en el proceso de beneficio húmedo del café. Revista Cenicafé 66(1): 46-60. 2015

Entre los desarrollos de Cenicafé se encuentra la tecnología para el beneficio ecológico del café y el manejo de los subproductos – Becolsub, que utiliza agua entre 0,7 - 1,0 L.kg⁻¹ de cps, evitando más del 90% de la carga contaminante. Esta tecnología ha sido adoptada por más del 90% de los usuarios potenciales y en ésta se ha procesado más de 30% del café de Colombia en los últimos años; sin embargo, los lixiviados son un problema, debido a su alta carga contaminante (DQO: 110.000 ppm.kg⁻¹). En este artículo se presenta la opción para aprovechar la energía térmica que se pierde durante el secado mecánico del café, y la energía solar utilizando secadores solares parabólicos, con el fin de reducir el impacto ambiental. La primera alternativa consistió en utilizar los gases calientes que salen a través de la chimenea para evaporar los lixiviados colocados en bandejas metálicas; con este sistema se evaporó el 71,52% del agua de los lixiviados, con un tiempo de secado de 1,64 L.h⁻¹. En la segunda alternativa, se utilizaron las aguas residuales procedentes del café procesado con la tecnología Becolsub y se utilizó la energía solar para deshidratarlos. En los secadores solares se evaporó el 92% del agua, con una velocidad de evaporación de 2,74 L.día-m² y una eficiencia del 84,36%, mientras que la evaporación natural del agua en las mismas condiciones fue 3,25 L.día-m². La materia resultante puede utilizarse como abono, con el fin de lograr un control total de la contaminación del agua, en el proceso del beneficio húmedo del café.

Palabras clave: Evaporación de lixiviados, secado mecánico, secado solar, aguas residuales.

MANAGEMENT OF LEACHATES AND WASTE WATERS COMING FROM WET COFFEE PROCESSING

Among the developments of Cenicafé it is found the technology for eco-friendly wet coffee processing with byproducts management – Becolsub, which utilizes small amounts of water and avoids more than 90% of the water contamination. The technology has been such impacting that more than 90% of the potential users have adopted it and processed more than 30% of the Colombian coffee in the last years. Besides these great results, the leachates continue being a problem because they are very difficult to be treated before throwing them to water streams. In this paper we present an option to take advantage of the thermal energy that is lost during mechanical coffee drying, to reduce the environmental impact. The first alternative consists in using the hot gases that exit throughout the chimney to evaporate the leachates put in metallic trays. With the arrangement it was allowed to evaporate a mean of 71,52% of the water in the leachates and it was obtained a drying time of 1,64L/h. In the second alternative, solar dryers were used to dry waste waters coming from coffee processed with the Becolsub technology. In solar tunnels it was evaporated 92% of the water and the evaporation rate was 2,74L/day/m², while natural evaporation of water in the same conditions is 3,47L/day/m². The resulting matter can be used as a source of organic matter or nutrients in order to achieve a total control of the water contamination by wet coffee processing.

Keywords: Coffee processing, eco-friendly leachates management, mechanical drying and solar drying.

¹ Fragmento del trabajo de tesis “ Disminución del impacto ambiental en la tecnología Becolsub, mediante la evaporación de lixiviados” presentado a la Universidad de Manizales, para optar el título de Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales. 2011.

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

El mucílago del café en Colombia se retira utilizando la fermentación natural y la remoción mecánica con la tecnología Becolsub (**B**eneficio **E**cológico y manejo de **S**ubproductos).

Según resultados de estudios realizados por Cenicafé, el 72% de la carga contaminante generada por el Proceso de Beneficio Húmedo del Café (PBHC), correspondientes a un valor de DQO de 82.080 mg.kg⁻¹ de café cereza (cc), se ocasionan al despulpar y transportar la pulpa con agua, y el 28% restante de la contaminación corresponden a un valor de DQO 31.920 mg.kg⁻¹ de cc, y es ocasionada por las mieles de lavado (10, 12, 13, 17, 19). El menor consumo específico de agua en fermentación natural, de 4,17 L.kg⁻¹ de café pergamino seco (cps), se obtiene lavando el café en el tanque con cuatro enjuagues, generando efluentes con un promedio de contaminación cercana a 26.500 ppm de DQO por kilogramo de cps. (18)

Con la tecnología Becolsub aunque se reduce el consumo específico de agua hasta 0,7 L.kg⁻¹ de cps y se controla el 90% de la contaminación potencial del café, se generan lixiviados con una contaminación cercana a 110.000 ppm de DQO por kilogramo de cps. El potencial contaminante de la mezcla pulpa y mucílago presenta un valor de DQO de 115.100 mg.kg⁻¹ de cc (10, 14, 19).

Para el manejo y control de los vertimientos de las aguas residuales del Becolsub, Cenicafé ha desarrollado tecnologías que permiten remover entre el 80% y el 90% de la DQO. Sin embargo, estos efluentes presentan alta carga orgánica, que afecta a los ecosistemas, si son vertidos sin tratamiento previo. Con la mezcla de las mieles y la pulpa en la tecnología Becolsub se logra controlar el 92% de la contaminación potencial del café, estas aguas residuales o lixiviados contaminantes se ha recomendado depositarlos en un tanque

y utilizarlos mezclados con agua, con menor carga orgánica, para el riego sobre la pulpa o en los lombricultivos (1, 4, 9, 13).

Manejo de lixiviados de café. En Cenicafé se encontró que la pulpa mezclada con las mieles generadas durante el desmucilaginado mecánico, en el proceso de beneficio realizado en los módulos Becolsub, retiene aproximadamente el 65% de éstas, drenando un 35% en volumen, el cual está conformado por los lixiviados (12, 13). Los lixiviados se generan debido a que las mieles al entrar en contacto con la pulpa arrastran los fenoles presentes en éstas; los fenoles al contacto con el aire toman una coloración negra la cual es característica de los lixiviados.

En la Estación Experimental La Catalina, Zambrano y Cárdenas (16) diseñaron y evaluaron un prototipo de sistema para el tratamiento primario de los lixiviados de pulpa y mucílago, producidos en la tecnología Becolsub (STLB), utilizando los residuos producidos por un módulo Becolsub 600, que opera con un consumo de agua cercano a 1,2 L.kg⁻¹ de cps, con una DQO original para los lixiviados de 110.000 ppm y una remoción total alcanzada por el STLB de 67,04%; de esta manera se redujo la DQO de los lixiviados hasta 36.252 ppm, y puede esperarse su tratamiento secundario mediante la utilización de un Sistema Modular de Tratamiento de Aguas residuales del beneficio del café (SMTA). El sistema permitió reducir la contaminación hasta un rango entre 50,83 y 70,32 g de DQO, cuando el equipo se operó con un consumo de agua entre 0,6 y 1,0 L.kg⁻¹ de cps. De estas operaciones se produjo un lixiviado cuya DQO fue de 110.000 ppm. Respecto al beneficio convencional de café puede generarse una reducción de la carga contaminante para las aguas residuales entre el 77,5% y 83,8%, lo cual equivale a una disminución de la contaminación global para pulpa y mucílago entre 87,2% y 90,8%.

En Cenicafé, Narváez *et al.* (4) evaluaron una alternativa de evaporación mecánica para reducir el impacto ambiental generado por los lixiviados producidos por la tecnología Becolsub. La investigación se desarrolló utilizando un evaporador rústico conectado a la chimenea, por la cual son conducidos los gases de la combustión generados en una estufa campesina como energía térmica. Con el evaporador operado en las condiciones de trabajo de la estufa (15 h al día) se logró controlar el 100% de la contaminación generada por los lixiviados, en una finca con producción anual de 3.000 kg.año⁻¹ de cps (15.000 kg de cc) que utiliza la tecnología Becolsub. La eficiencia térmica del evaporador y del sistema global fue del 57,01% y 20,74%, respectivamente. El fluido concentrado presentó 295.000 ppm de DQO, 164.254 ppm de Sólidos Totales (ST) y 35% de grados brix (4).

Esta investigación tuvo como propósito buscar alternativas para el manejo de los lixiviados y aguas residuales resultantes del proceso del beneficio ecológico del café y, por ende, lograr un control de la carga contaminante generada en el proceso de beneficio húmedo del café y con la tecnología de beneficio ecológico de café Becolsub y ECOMILL®, que se podría aplicar al 42% de los medianos y grandes caficultores de diferentes producciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. Esta investigación se desarrolló en el Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé, localizado en Manizales (Caldas), a 1.310 m de altitud, con promedios de temperatura y humedad relativa de 21,5°C y 79,5%, respectivamente, y precipitación anual de 2.662 mm. Para el desarrollo de la investigación se realizaron dos fases: La primera consistió en determinar el porcentaje de

lixiviados generados con la tecnología Becolsub, utilizando un módulo para 300 kg de café cereza por hora y determinar su comportamiento de acuerdo a las recomendaciones establecidas por Cenicafé. La segunda fase consistió en la evaporación de los lixiviados resultantes del proceso en la fase anterior, utilizando los gases resultantes de la combustión del secado mecánico y la evaporación solar, utilizando secadores solares parabólicos con cubierta plástica.

Primera Fase: Descripción del equipo. Para el proceso se utilizó un equipo Separador Hidráulico de Tolva y Tornillo Sinfin (SHTS) diseñado por Oliveros *et al.* (6), el cual funciona con bajo consumo específico de agua (0,025 L.kg⁻¹ de cps), con el fin de realizar una clasificación del café por densidad y procesar únicamente los frutos maduros.

Posteriormente, el café clasificado fue transportado por medio del tornillo sinfin hasta la despulpadora de un Becolsub 300 (Figura 1), diseñado y construido en Cenicafé (5). El café despulpado fue clasificado por una zaranda circular de varillas y de allí conducido a un desmucilagimador tipo DESLIM, donde se removió el mucílago y se realizó el lavado mecánicamente, utilizando un controlador de caudal de agua (Figura 2a), diseñado por Sanz *et al.* (15), mientras que las mieles o mucílago concentrado (Figura 3a) y la pulpa resultantes se transportaron inmediatamente por medio de un tornillo sinfin al depósito para su posterior manejo y tratamiento (Figura 2b). La mezcla de pulpa y mucílago se colocó a drenar en canecas perforadas, como se muestra en la Figura 3b.

Segunda Fase: Descripción del equipo. Con el volumen de lixiviados obtenidos se procedió a realizar el cálculo y el diseño de los evaporadores de bandejas, utilizando el sistema de evaporación

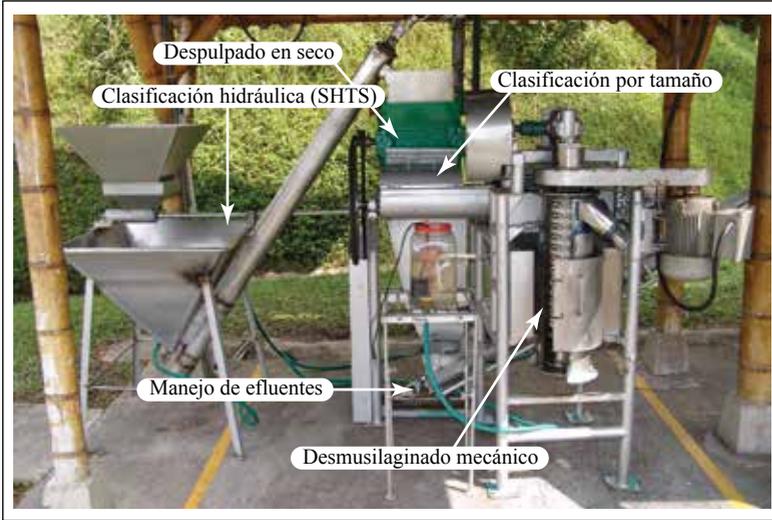


Figura 1. Partes del módulo de beneficio ecológico Becoslub 300 - Cenicafé.



Figura 2. a. Control de caudal de agua; b. Mezcla y transporte de pulpa y mucílago.

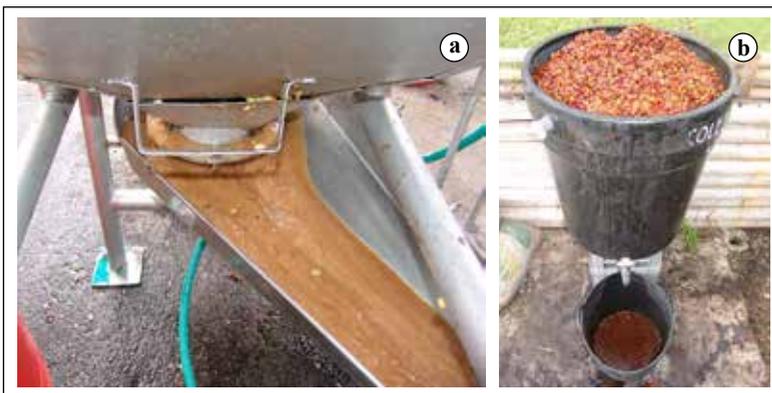


Figura 3. a. Mucílago concentrado; b. Lixiviados generados en el proceso.

mecánica, para lo cual se empleó un secador mecánico comercial, con capacidad de 56 kg de café pergamino seco (Figura 4); los gases resultantes de la combustión fueron conducidos por una chimenea donde se ubicaron los evaporadores para deshidratar los lixiviados resultantes en el proceso (Figura 5).

También se utilizó un secador parabólico (Figura 6), con cubierta plástica (7, 11), con el fin de aprovechar la energía solar y deshidratar térmicamente estos lixiviados.

Metodología. En la primera fase para el proceso de beneficio con el equipo Becolsub, la unidad experimental (u.e.) estuvo constituida por 300 kg de café Variedad Castillo®. Como variables se determinaron el volumen de mieles mezcladas (V_{mm}), la masa de las mieles mezcladas a la pulpa (M_{mm}) y el porcentaje de retención de las mieles lograda por la pulpa (R), dados por las Ecuaciones <1>, <2> y <3>.

$$V_{mm} = \frac{M_{mm}}{\rho} \quad <1>$$

Donde:

V_{mm} : Volumen de mieles mezcladas (L)

M_{mm} : Masa de mieles mezcladas (kg)

ρ : Densidad de las mieles (kg.L^{-1})

El peso de las mieles mezcladas con la pulpa se determinó a partir de la Ecuación <2>.

$$M_{mm} = M_p - 0,4M_{cc} \quad <2>$$

Donde:

La pulpa corresponde al 0,4 del peso del fruto.

M_{mm} : Masa de las mieles mezcladas a la pulpa (kg)

M_p : Masa de la pulpa + mucílago (kg)

M_{cc} : Masa del café cereza (kg)

El porcentaje de retención de mieles (R) se determinó utilizando la Ecuación <3>:

$$R = \frac{V_{mm} - V_l}{V_{mm}} = 100\% \quad <3>$$

Donde:

R : Retención (%)

V_{mm} : Volumen de mieles mezcladas (L)

V_l : Volumen de lixiviados (L)

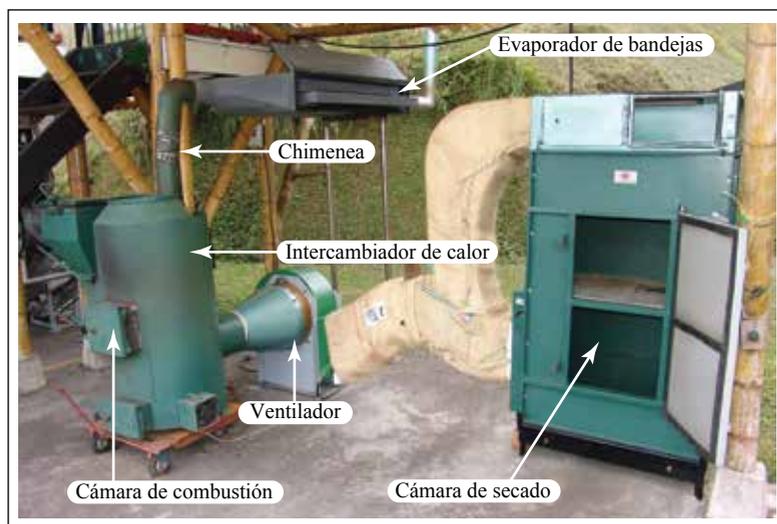


Figura 4. Partes del secador mecánico de café con intercambiador vertical de calor de combustión indirecta.



Figura 5. Dispositivo de bandejas para la evaporación de los lixiviados.



Figura 6. Secador solar parabólico.

Se realizaron 24 repeticiones y se evaluaron principalmente las variables: volumen de mieles mezcladas (V_{mm}), masa de las mieles mezcladas a la pulpa (M_{mm}) y el porcentaje de retención de las mieles lograda por la pulpa (R). Para cada variable se realizó un análisis descriptivo.

Se seleccionó el porcentaje de retención de mieles (R) obtenido en esta fase, luego de 96 h de lixiviados después de cada una de las pruebas, y se procedió a realizar los diseños de los evaporadores y su posterior evaluación como se describe en la segunda fase.

Para la segunda fase se utilizaron los dispositivos diseñados para el proceso de evaporación con el equipo de secado, los lixiviados evaporados y el porcentaje de retención de éstos, mediante las Ecuaciones <4> y <5>.

Para la fase II se realizaron 14 repeticiones para el proceso de evaporación con el equipo de secado, la unidad experimental consistió en 50 L de lixiviados y la variable de respuesta fue la cantidad de litros de lixiviados evaporados (V_{le}).

$$V_{le} = \frac{V_{li} - V_{lf}}{V_{li}} = 100\% \quad <4>$$

Donde:

- V_{le} : Lixiviados evaporados (%)
- V_{li} : Volumen inicial de lixiviados (L)
- V_{lf} : Volumen final de lixiviados evaporados (L)

La eficiencia del evaporador se halló dividiendo el tiempo necesario sobre el tiempo real de evaporación de las pruebas, utilizando la Ecuación <5>.

$$\eta = 100 \left(\frac{t}{t_r} \right) \quad <5>$$

- η : Eficiencia del evaporador (%)
- t : Tiempo calculado de secado (h)
- t_r : Tiempo real de secado (h)

Adicionalmente, se obtuvo el control de la contaminación (C_c) y la retención total de los lixiviados generados con el uso de la tecnología (R_i). El porcentaje de control de la contaminación se obtuvo mediante la Ecuación <6>.

$$C_c = [(0,28R) + 72] 100\% \quad <6>$$

Donde:

C_c : Control de la contaminación (%)

R_i : Retención (%)

Análisis de la información. Esta es una investigación exploratoria y descriptiva. Por cada prueba y con la información obtenida se realizó un balance de masa general, se realizó el análisis descriptivo con los respectivos promedios, la desviación estándar, el coeficiente de variación y los límites superiores e inferior con un nivel de confianza del 95%, para cada una de las variables mencionadas en el proceso y en cada una de las fases evaluadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desempeño operativo del Becolsub 300

Los valores principales del desempeño de la tecnología de Becolsub 300 se presentan en la Tabla 1, donde se muestra que el promedio de la masa procesada fue de 248,38 kg de café cereza, con un límite superior de 268,99 kg y un límite inferior de 227,76 kg de café cereza. De acuerdo a los resultados, el módulo Becolsub 300 presentó un desempeño operativo inferior al esperado, con un promedio de 233,86 kg de café cereza por prueba, de esta masa el 14,52% del café cereza aproximadamente 35,54 g se separó por flotación en el separador hidráulico de tornillo sinfín.

El café despulpado correspondió al 82,68% de la masa recibida, aproximadamente 206,04

kg, un 25% por debajo del rendimiento operativo del equipo (300 kg.h⁻¹), la zaranda de varillas retiró principalmente los frutos sin despulpar y parte de la pulpa, en promedio 14,52 kg (6,79%) de la masa recibida.

En la Tabla 2 se presentan los valores promedio de rendimiento del proceso operativo del Becolsub. El tiempo total del proceso fue de 52,90 min, la masa de café desmucilaginado obtenida fue de 89,79 kg, el suministro de agua en el proceso fue 0,78 L.min⁻¹. El total de agua utilizada fue de 41,03 L, el peso de la pulpa generada fue de 93,42 kg y el promedio de la masa de pulpa + mucílago fue de 165,25 kg.

En la Figura 2b se observa el transporte de la pulpa y el mucílago concentrado por intermedio del tornillo sinfín mezclado con la pulpa.

En la Tabla 3 se registran los valores para los lixiviados generados en el proceso. En las primeras 24 h se obtuvieron 44,03 L, lo que equivale al 76,46% del total de lixiviados generados, que fueron en total 57,43 L en promedio, en un tiempo total de 96 h; adicionalmente, se registró un valor mínimo de 28 L, correspondientes a la prueba con la menor cantidad de café (199 kg de cc) y un máximo de 91 L de lixiviados correspondientes a una de las pruebas con la mayor cantidad de café cereza procesado (313 kg de cc).

En la Tabla 4 se presentan los valores de los efluentes generados y el control de contaminación de la carga contaminante alcanzada en el proceso. El peso de la mezcla pulpa+mucílago fue de 165,3 kg, en promedio, y después del drenado de los fluidos (lixiviados) el peso disminuyó a 93,4 kg. El agua adicionada fue de 41,4 L.

Tabla 1. Desempeño operativo de la tecnología Becolsub.

	Masa de café cereza		Masa de café flotado		Masa clasificada en la zaranda		Masa de café cereza despulpado		Rendimiento del despulpado
	(kg)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg/h)	
Límite superior	268,99	40,69	16,57	8,22	3,42	225,61	85,11	245,50	
Límite inferior	227,76	30,40	12,47	5,36	2,18	186,47	80,26	222,22	
Promedio	248,38	35,54	14,52	6,79	2,8	206,04	82,68	233,86	
C. V. %	19,65	34,29	33,44	49,88	52,46	22,49	6,95	11,78	

Tabla 2. Rendimientos operativos del equipo Becolsub.

	Masa del café desmucilaginado	Masa pulpa + mucilago	Agua utilizada	Tiempo de despulpado	Total de agua utilizada	Peso final pulpa
	(kg)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)
Límite superior	98,04	180,81	0,79	57,26	44,67	99,11
Límite inferior	81,54	149,69	0,76	48,54	37,39	87,72
Promedio	89,79	165,25	0,78	52,90	41,03	93,42
C. V. %	21,75	22,30	5,71	19,52	21,01	14,44

Tabla 3. Lixiviados generados en el proceso con el Módulo Becolsub 300.

	Lixiviados				Porcentaje Lixiviados				Total de lixiviados
	24 h	48 h	72 h	96 h	24 h	48 h	72 h	96 h	
	(L)	(L)	(L)	(L)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Límite superior	49,72	9,49	5,47	2,27	80,15	16,18	9,18	4,29	63,84
Límite inferior	38,35	6,47	3,39	0,49	72,77	11,63	6,25	1,13	51,01
Promedio	44,03	7,98	4,43	1,38	76,46	13,90	7,72	2,71	57,43
C. V. %	37,99	53,18	65,82	85,24	12,94	45,38	51,94	97,60	32,56

Tabla 4. Efluentes generados en el proceso, control de los lixiviados y control general de la contaminación.

	Mezcla pulpa + mucilago	Pulpa después de drenado	Mezcla agua + mucilago	Lixiviados	Agua adicionada	Retención	Control contaminación
	(kg)	(kg)	(L)	(L)	(L)	(%)	(%)
Límite superior	180,81	99,11	90,53	63,84	44,98	65,81	90,43
Límite inferior	149,69	87,72	72,62	51,01	37,78	55,33	87,49
Promedio	165,25	93,42	81,58	57,43	41,38	60,57	88,96
C. V. %	22,30	14,44	26,00	26,47	20,59	16,43	5,91

Luego de 96 h de iniciadas las pruebas, en la pulpa permanecieron 24,2 L de los fluidos adicionados (mucílago+agua), con un promedio de la retención en la pulpa del 60,6%, con límites superior e inferior de 65,81% y 55,33%, respectivamente, ligeramente inferiores a los obtenidos en Cenicafé por Roa *et al.* (13), debido posiblemente dos factores. Primero, el año 2009 fue un año atípico para la caficultura colombiana, por cuenta de factores como el clima y la baja fertilización, mayores niveles de precipitación en las zonas cafeteras y el consecuente aumento en los niveles de infección por roya, explican este comportamiento, afectando la productividad y la calidad del cultivo. Así la producción cafetera colombiana del 2009 fue de 7,8 millones de sacos, como consecuencia de una caída de 32% en la producción (2); y segundo, al uso del separador hidráulico de tornillo sinfín, que podría adicionar agua a las cerezas en el proceso de clasificación de los frutos maduros.

El control de la contaminación total fue del 89%, en promedio, con límites superior e inferior de 90,43% y 87,49%, respectivamente, valores cercanos al 92%, como los obtenidos por Ramírez (9), con lo que se corroboran las bondades de la tecnología Becolsub.

En la Figura 3a se observa el mucílago concentrado adicionado a la pulpa y en la Figura 3b, los lixiviados generados en el proceso.

Resultados de las pruebas del evaporador con el secado mecánico. En la Tabla 5 se presentan los valores del desempeño del secador mecánico. En promedio el tiempo de secado fue de 33,31 h, temperatura de secado para el café de 51,85°C, y por tanda de secado se obtuvieron en promedio 40,875 kg de cps, el consumo de carbón fue de 1,56 kg.h⁻¹ y el total por tanda de secado fue de 44,33 kg en promedio.

La temperatura de los gases de combustión en la chimenea, a la entrada al evaporador, varió entre 227°C y 189°C, con promedio de 209°C, la cual es apropiada para el calentamiento de las bandejas; la temperatura de salida estuvo en un promedio en 39°C. Si se expresa el calor entregado a las bandejas como función directa de las diferencias de las temperaturas de entrada y de salida de los gases, ésta presenta poca variación, con un promedio de 192°C.

En la Figura 7 se observa una tendencia en el descenso de la temperatura inicial (208°C). En la entrada de la bandeja # 1 la temperatura fue de 58,68°C y se estabilizó a medida que los gases pasaban por las siguientes bandejas, hasta la bandeja # 6 (32,53°C); la temperatura de salida de los gases al exterior fue de 33,29°C, en promedio.

En la Tabla 6 se presentan los valores de los volúmenes para los lixiviados dispuestos inicialmente en cada bandeja para su evaporación. El promedio del porcentaje de evaporación para las pruebas fue de 71,52%, con un límite superior de 74,45% e inferior de 68,59%. En promedio, se dispusieron en el evaporador 33,62 L de lixiviados, con un límite superior de 41,72 L e inferior de 25,52 L. Las bandejas # 1 y # 2, con temperaturas más altas, 59°C y 42°C, en promedio, respectivamente, presentaron porcentajes de evaporación de 75% y 73%, respectivamente.

El total de lixiviados evaporados fue de 111,60 L para un total de 183,30 h utilizadas en el secado del café, con una relación de 1,64 L.h⁻¹ de lixiviado evaporado. Adicionalmente, el consumo de carbón fue de 1,56 kg.h⁻¹, con un rendimiento de combustible de 2,38 kg.L⁻¹ de lixiviado evaporado.

Tabla 5. Desempeño operativo del secador mecánico para café.

Pruebas	Horas de secado	Temp. del aire de secado	Temp. de los gases de entrada	Temp. de los gases de salida	Temp. ambiente	Café pergamino seco
	(h)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(kg)
Límite superior	35,45	53,60	227,64	42,13	24,27	43,875
Límite inferior	31,16	50,10	189,59	36,46	21,07	37,750
Promedio	33,31	51,85	208,62	39,29	22,67	40,875
C.V.%	11,21	5,84	15,80	12,50	4,44	12,95

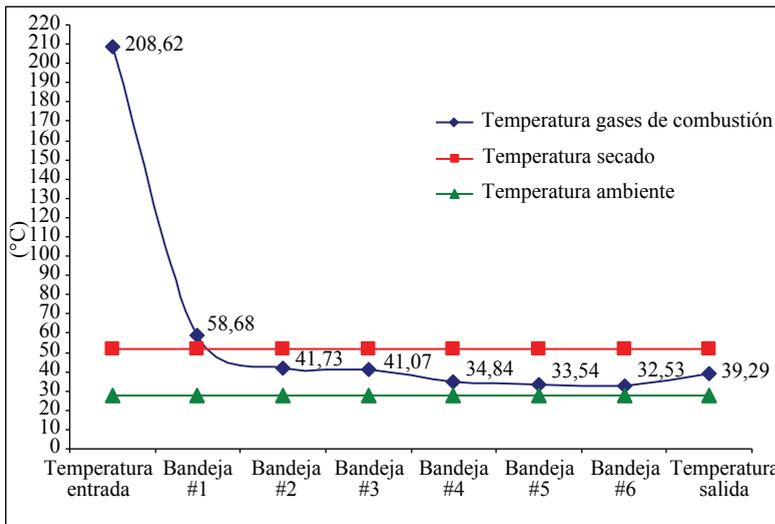


Figura 7. Temperaturas de los gases de combustión y de las bandejas del evaporador.

La eficiencia calculada fue del 64%, con una evaporación real de 71,52% de los lixiviados, lo que indica que el diseño del evaporador de bandejas es apropiado.

En general, la evaporación de líquidos alcanzada es alta (68,59% al 74,45%), por lo que se considera que el dispositivo diseñado es adecuado para evaporar los lixiviados generados en el proceso de beneficio ecológico del café, en una finca con una producción anual de 2.750 kg de cps.

Resultados de las pruebas del evaporador con el secado solar. Se realizaron pruebas

exploratorias preliminares con el fin de evaporar los lixiviados generados en el lavado mecánico del café fermentado con ECOMILL® (8), con un consumo de 0,4 L de agua por cada kilogramo de café procesado.

Con el fin de utilizar la radiación solar se utilizó un secador solar parabólico, los efluentes generados en el proceso se dispusieron en el piso del secador, previamente cubierto con plástico Agropilas N calibre # 8.

En la Tabla 7 se presentan los valores de altura de las mieles, evaporación diaria, temperatura media diaria, humedad relativa

Tabla 6. Lixiviados evaporados en cada una de las bandejas del evaporador.

			<u>Límite superior</u>	<u>Límite inferior</u>	<u>Promedio</u>	<u>S.T.D.</u>	<u>C.V. (%)</u>
Bandeja # 1	L	(l)	8,41	5,97	7,19	1,92	26,71
	L.E.	(l)	6,29	4,46	5,38	1,44	26,77
	L. N. E.	(l)	2,52	1,11	1,82	1,11	61,14
	E	(%)	84,13	67,27	75,70	13,27	17,52
Bandeja # 2	L	(l)	7,96	5,14	6,55	2,22	33,94
	L.E.	(l)	5,01	3,86	4,44	0,90	20,28
	L. N. E.	(l)	3,32	0,90	2,11	1,91	90,33
	E	(%)	85,01	60,08	72,54	19,62	27,04
Bandeja # 3	L	(l)	7,91	5,15	6,53	2,17	33,24
	L.E.	(l)	4,86	3,78	4,32	0,85	19,57
	L. N. E.	(l)	3,45	0,98	2,21	1,95	87,95
	E	(%)	84,24	57,91	71,07	20,72	29,15
Bandeja # 4	L	(l)	7,67	3,56	5,62	3,23	57,52
	L.E.	(l)	5,27	2,42	3,85	2,24	58,31
	L. N. E.	(l)	2,94	0,61	1,77	1,83	103,58
	E	(%)	83,29	60,80	72,05	17,70	24,56
Bandeja # 5	L	(l)	7,29	3,04	5,17	3,35	64,75
	L.E.	(l)	5,07	1,95	3,51	2,45	69,99
	L. N. E.	(l)	2,67	0,66	1,67	1,58	94,76
	E	(%)	82,28	58,94	70,61	18,37	26,02
Bandeja # 6	L	(l)	3,71	1,40	2,56	1,82	71,05
	L.E.	(l)	2,28	0,95	1,62	1,04	64,61
	L. N. E.	(l)	1,53	0,32	0,93	0,95	102,36
	E	(%)	75,54	58,73	67,14	14,52	21,63
E.T.		(%)	74,45	68,59	71,52	2,79	3,91

L. = Lixiviados; L.E. = Lixiviados Evaporados; L.N.E. = Lixiviados No Evaporados; E. = Evaporación; E.T. = Evaporación Total.

Tabla 7. Relaciones de evaporación de efluentes en el secador solar parabólico.

Evaporación total del día (mm)	Temperatura media día (°C)	Humedad relativa media día (%)	Brillo solar (h)
3,47	22,40	74,30	5,66

y brillo solar, de los cálculos diarios de Evaporación Tanque Clase A de la estación meteorológica Cenicafé-La Granja, aledaña a las instalaciones de Ingeniería Agrícola de Cenicafé.

Se colocaron en el piso del secador 2.761 L de efluentes, de los cuales se evaporaron 2.538 L, correspondientes al 92%; el efluente que no evaporó, correspondió a 126 L de lodos y 97 L de lixiviados drenados de los lodos, con valores del 3,51% y 4,56%, respectivamente. El promedio de la evaporación diaria en el secador fue de 3,15 mm.día⁻¹ y la evaporación media en el Tanque Clase A fue de 3,30 mm.día⁻¹, valores cercanos a la evaporación media mensual de 3,47 mm.día⁻¹ para Cenicafé (3).

En la Figura 8 se observa la tasa de evaporación, para la cual se hizo un ajuste de regresión lineal, se observa una tasa de evaporación para el Tanque Clase A de $3,25 \text{ mm.día}^{-1}$ con un coeficiente de determinación de 0,99 y una tasa de evaporación en el secador solar de $2,74 \text{ mm.día}^{-1}$ con un $R^2=0,98$, con una eficiencia de 84,36% de los efluentes colocados en el secador, valor promisorio para el tratamiento de los lixiviados, aunque menor que la evaporación en tanque, debido a que el mucílago está constituido por una capa gruesa de tejido esponjoso de 4,0 a 2,0 mm de espesor, contiene 15% de sólidos en forma de hidrogel y en su composición química el 85% es agua y un 15% de materia seca, lo cual hace que la evaporación sea más lenta.

A los efluentes deshidratados (Figura 9) se realizaron los análisis físico-químicos, los cuales muestran una humedad final de 14%, pH de 5,6, contenido de potasio de 4,24% y de nitrógeno total 2,87% (Tabla 8), valores que indican que podrían ser

utilizados como fuente de materia orgánica o nutrientes.

En la Figura 10 se observa cómo los efluentes resultantes del proceso del beneficio del café, altamente contaminantes, pueden transformarse en un subproducto con valor agregado (bioabono), y podría ser una alternativa viable para un alto número de productores de café en Colombia, protegiendo el recurso agua.

Con esta investigación se generan alternativas para el manejo de los lixiviados producidos en la tecnología Becolsub y de las mieles del lavado mecánico, utilizando la energía térmica no aprovechada en equipos para secado mecánico y con secadores solares diseñados para café, tipo parabólico o túnel.

Los aspectos más importantes generados en esta investigación desde el enfoque ambiental son los siguientes:

- Desde el punto de vista del manejo del recurso agua se evita su deterioro, ya que

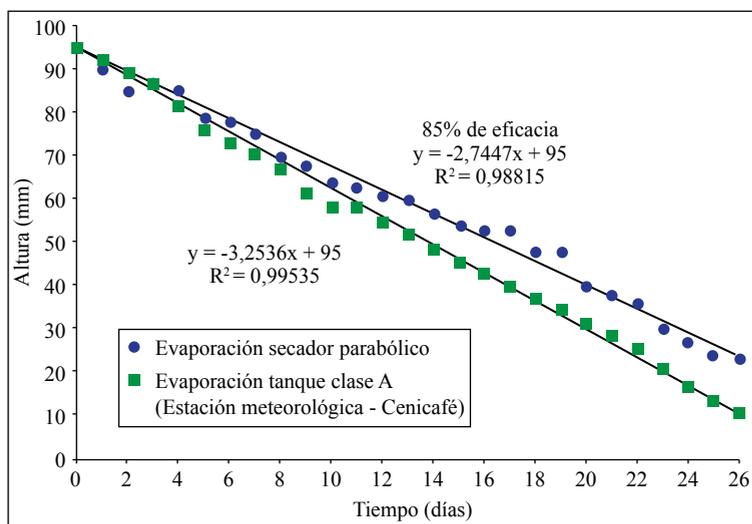


Figura 8. Regresión lineal entre la evaporación diaria de los efluentes en el secador solar parabólico y la evaporación en Tanque Clase A de la estación meteorológica Cenicafé - La Granja.



Figura 9. Efluentes deshidratados utilizando la energía solar.

Tabla 8. Caracterización físico-químico de los efluentes secos.

Referencia	Valor
Humedad (%)	14
pH	5,6
Densidad real (g.mL ⁻¹)	0,69
Conductividad Eléctrica (mS. cm ⁻¹)	8,36
Cenizas (%)	11,5
Pérdidas por volatilización (%)	88,5
Retención de agua (%)*	151
N total (%)	2,87
C.O.ox (%)	29,7
P (%)	0,27
K (%)	4,62
Ca (%)	1,03
Mg (%)	0,31
Fe (mg.kg ⁻¹)	26
Mn (mg.kg ⁻¹)	88
Zn (mg.kg ⁻¹)	83
Cu (mg.kg ⁻¹)	45

Métodos: pH: pasta saturada; Humedad: 70°C/ 24h; Nt.: Semimicrokjeldahl; K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn, Cu: Espectrofotometría de Absorción Atómica. P: Colorimétrico con molibdo vanadato de amonio. CE: Conductivimétrico. COox.: Walkley Black. Cenizas: 475°C/4h

Nota: Resultados expresados en base seca. * Retención de agua en base húmeda



Figura 10. Bioabono obtenido después de la deshidratación de los efluentes concentrados del beneficio del café, utilizando la energía solar.

se disminuye la contaminación generada por los lixiviados, principal problema de los adoptantes de la tecnología Becolsub, que aunque permite controlar el 92%, se generan lixiviados para los cuales es necesario disponer de tratamientos primarios y secundarios, con el fin de disminuir su carga orgánica a niveles aceptables antes de ser vertidos a los cuerpos de agua.

- Con el sistema propuesto de evaporación se pasa de tener un residuo líquido altamente contaminante a obtener un residuo seco, el cual no se estaría descargando en las fuentes de agua naturales, y por lo tanto, no se impactarían éstas, obteniéndose un control cercano al 100%.
- Se generó información para el manejo por evaporación de los lixiviados y mieles de lavado mecánico utilizando la energía mecánica y solar para el secado del café.
- Con estos resultados se beneficiarían más del 95% de productores de café de Colombia (aproximadamente 500.000), los cuales serían los potenciales usuarios de esta tecnología completamente amigable con el ambiente.
- Los residuos finales obtenidos con esta tecnología podrían ser utilizados, después de realizada la investigación pertinente, como fuente de abono orgánico para las mismas fincas de los productores, generando un valor agregado.
- Se podrían generar tecnologías mixtas como la evaporación solar y mecánica y/o recirculación de las aguas residuales (mucílago concentrado y lixiviados) sobre la pulpa, para controlar el 100% de la contaminación generada por la tecnología Becolsub y ECOMILL®.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS por la cofinanciación de este estudio y al Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé, por su constante apoyo al servicio todos los caficultores de Colombia.

LITERATURA CITADA

1. DÁVILAA., M.T.; RAMÍREZ G., C.A. Lombricultura en pulpa de café. Chinchiná : Cenicafe, 1996. 11 p. (Avances Técnicos No. 225)
2. FEDERACAFÉ. El mercado del café: Congreso cafetero informe gerencia general. Bogotá : FEDERACAFÉ, 2009. [En línea]. Disponible en internet: http://www.cafedecolombia.com/congresocafetero/2009/02.Informe_GG_2009_Mercado_del_Cafe.pdf. Consultado en Febrero de 2015.
3. JARAMILLOR., A. Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. *Cenicafé* 57(4):288-298. 2006.
4. NARVÁEZ M., L.H.; RAMÍREZ G., C.A.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ, F. Manejo de las mieles generadas en la tecnología BECOLSUB para eliminar el impacto ambiental ocasionado por los lixiviados del café. *Revista facultad nacional de agronomía Medellín* 56(2):1969-1981. 2003.
5. OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; ÁLVAREZ G., J.; ÁLVAREZ H., J. El BECOLSUB 300. Chinchiná : Cenicafe, 1998. 8 p. (Avances Técnicos No. 253)
6. OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; MEJÍA G., C.A. Separador hidráulico de tolva y tornillo sin fin. Chinchiná : Cenicafe, 2007. 8 p. (Avances Técnicos No. 360)
7. OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; PEÑUELA M., A.E. Secador parabólico mejorado. Chinchiná : Cenicafe, 2008. 8 p. (Avances Técnicos No. 376)
8. OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; TIBADUIZA V., C.A. Ecomill®: Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. Chinchiná : Cenicafe, 2013. 8 p. (Avances Técnicos No. 432)

9. RAMÍREZ G., C.A. Evaluación técnica y económica de módulos "BECOLSUB 600 y 1000 MÓVILES". p. 3-10. En: CENICAFÉ. Informe anual de actividades de la disciplina de Ingeniería agrícola Octubre 1997 - Septiembre 1998. Chinchiná : Cenicafé, 1998. café utilizando macrófitas acuáticas. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente, 2009. 508 p. Tesis: Doctorado.
10. RAMÍREZ G., C.A. Disminución del impacto ambiental en la tecnología BECOLSUB, mediante la evaporación de lixiviados". Manizales : Universidad de Manizales. Facultad de ciencias contables, económicas y administrativas, 2011. 105 p. Tesis: Maestría.
11. RAMÍREZ G., C.A.; OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G. Construya el secador solar parabólico. Chinchiná : Cenicafé, 2002. 8 p. (Avances Técnicos No. 305)
12. ROA M., G.; OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; ÁLVAREZ G., J.; RAMÍREZ G., C.A.; ÁLVAREZ H., J.R. Desarrollo de la tecnología BECOLSUB para el beneficio ecológico del café. Chinchiná : Cenicafé, 1997. 6 p. (Avances Técnicos No. 238)
13. ROA M., G.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ G., J.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; DÁVILA A., M.T.; ÁLVAREZ H., J.R.; ZAMBRANO F., D.A.; PUERTA Q., G.I.; RODRÍGUEZ V., N. Beneficio ecológico del café. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 273 p.
14. RODRÍGUEZ V., N. Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del
15. SANZ U., J.R.; OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; LÓPEZ P., U.; VELÁSQUEZ H., J. Controle los flujos de café y agua en el módulo BECOLSUB. Chinchiná : Cenicafé, 2011. 8 p. (Avances Técnicos No. 405)
16. ZAMBRANO F., D.A.; CÁRDENAS C., J. Manejo y tratamiento primario de lixiviados producidos en la tecnología BECOLSUB. Chinchiná : Cenicafé, 2000. 8 p. (Avances Técnicos No. 280)
17. ZAMBRANO F., D.A.; ISAZA H., J.D. Demanda química de oxígeno y nitrógeno total, de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo del café. Cenicafé 49(4):279-289. 1998.
18. ZAMBRANO F. D. A.; RODRÍGUEZ V., N. Construya su tanque tina para la fermentación y el lavado del café. Chinchiná: Cenicafé, 2011. 4p. (Avance Técnico No. 408).
19. ZULUAGAV, J.; ZAMBRANO F., D. Manejo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café para el control de la contaminación. Chinchiná : Cenicafé, 1993. 4 p. (Avances Técnicos No. 187).

PROPIEDADES DE UN INCEPTISOL DERIVADO DE GRANITO Y SUS IMPLICACIONES EN LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

Luis Fernando Salazar Gutiérrez*

SALAZAR G., L.F. Propiedades de un inceptisol derivado de granito y sus implicaciones en la susceptibilidad a deslizamientos. Revista Cenicafé 66(1): 61-75. 2015

Para los suelos de la región cafetera de Colombia cultivados en café en zonas de ladera, son escasos los estudios sobre los procesos involucrados en los movimientos en masa relacionados con sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Con el fin de contribuir a este conocimiento, se seleccionó un Inceptisol derivado de granito, ubicado en el municipio de Ibagué (Colombia), se tomaron muestras de cajón inalteradas, con cilindro de pared delgada, y suelo alterado hasta los 1,60 m de profundidad. El horizonte B presentó una cohesión efectiva de 10 kPa y un ángulo de fricción efectivo de 26°. El índice de compresión fue de 0,31. El suelo se caracterizó como un limo de baja plasticidad (ML), densidad aparente entre 1,28 a 1,54 kg.m⁻³, con gravedad específica de 2,66 kg.m⁻³. Dadas su baja cohesión, diferencias en la permeabilidad de sus horizontes, desde poco permeable hasta muy poco permeable, valor de saturación de 0,3 cm³.cm⁻³ y que según los límites de consistencia y curva característica de humedad del suelo, éste puede pasar de estado sólido a líquido, con pequeñas variaciones en el contenido de humedad, puede inferirse que se trata de un suelo propenso a la erosión hídrica y movimientos en masa superficiales.

Palabras clave: Suelo, geotecnia, laderas.

SOIL PROPERTIES OF AN INCEPTISOL DERIVATE FROM GRANITE AND ITS IMPLICATIONS IN THE LANDSLIDES SUSCEPTIBILITY

For soils of the Colombian coffee region of coffee grown in hillside areas, there are few studies on the processes involved in mass movements relating to their physical, mechanical and chemical properties. In order to contribute to this knowledge, it was selected an inceptisol derived from granite located in the city of Ibague - Colombia, box samples, unaltered with thin-walled cylinder and disturbed soil until 1,60 m depth were taken. The soil horizon B provided an effective cohesion of 10 kPa and effective angle of friction of 26°. The compression ratio was 0.31. The soil was characterized as a low plasticity silt (ML), bulk density between 1.28 to 1.54 kg.m⁻³, with specific gravity of 2.66 kg.m⁻³. Due to their low cohesion, differences in the soil permeability between horizons, the soil saturation value of 0.3 cm³.cm⁻³, the limits of consistency and soil moisture characteristic curve parameters, could be inferred that this is a soil prone to hydric erosion and shallow mass movements.

Keywords: soil, geotechnical, hillslopes.

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

El granito es una roca muy representativa en la cordillera Central de los Andes en Colombia; mineralógicamente está formado por cuarzo, feldspatos, hornblenda y micas, cuando disminuye el contenido de cuarzo se forma granodiorita y cuarzdiorita (19). Una de las unidades cartográficas más representativas de este tipo de suelo en la región Andina es la unidad San Simón, la cual es susceptible a procesos de erosión y movimientos en masa (13, 14). Esta unidad corresponde a un suelo residual, formado a partir de granito de la formación geológica denominada batolito, de Ibagué. Su fisiografía corresponde a un paisaje de vertientes erosionables y pertenece al orden taxonómico de los inceptisoles y entisoles.

La unidad San Simón, es la principal unidad cartográfica de suelos de las zonas cafeteras del centro y sur del Tolima y del Huila; se ubica en los municipios de Ibagué, Rovira y Chaparral, en el Tolima, y en los municipios de Timaná, Sicandé, Pitalito, Tarqui, San Agustín, Iquirá, Teruel y Palermo en el Huila. En el municipio de La Argentina en el Huila se encuentra en asociación con tobas volcánicas de la unidad cartográfica Salado Blanco de acuerdo con los estudios de la Federación Nacional de Cafeteros-FNC (13, 14).

En términos generales, se localiza entre los 1.000 y 2.000 m de altitud; cuando las condiciones climáticas no son favorables para la transformación total de la roca el perfil consta de arena suelta, con variaciones en el color debido a la oxidación. Generalmente se encuentra en pendientes del 70% con grandes longitudes, lo que impide el desarrollo normal del perfil debido a los procesos denudativos (13, 14).

Según Núñez (25), la meteorización del batolito desarrolla suelos residuales y roca parcial a totalmente meteorizada, que alcanza espesores entre 3 y 15 m. Se trata de materiales que varían entre arcillas limosas hasta arenas gruesas limosas, que desarrollan diferentes procesos denudativos como erosión laminar difusa, erosión en surcos y erosión en cárcavas. Asociados a las cárcavas existen deslizamientos rotacionales. El fenómeno más sentido, por los daños que puede causar, es la generación de flujos de suelo que se transforman en avenidas torrenciales que transitan a lo largo de los cauces y valles de las corrientes de agua que drenan el área donde aflora el batolito de Ibagué. Para Núñez (25) un proceso poco identificado y estudiado en este tipo de suelo es el conocido como fusión o erosión interna que, aparentemente, forma los hundimientos característicos en esta unidad cartográfica. Los procesos de erosión y remoción en masa son más frecuentes en terrenos desprotegidos de vegetación arbórea, en donde sólo hay pastos y actividad antrópica, especialmente, técnicas inadecuadas de cultivo, vías mal diseñadas y sin obras de protección y mal manejo de aguas lluvias y residuales.

Ejemplos de estos fenómenos pueden observarse en toda la zona montañosa que rodea a la ciudad de Ibagué en el departamento del Tolima (Colombia), en donde se han producido pérdidas humanas y daños materiales incalculables debido a la acción de estos eventos (5). Las zonas bajas pueden ser severamente afectadas por flujos de tierra y avenidas torrenciales originadas en la zona montañosa, así como por inundaciones.

El efecto de la actividad humana en el incremento de los deslizamientos puede estar relacionado con la degradación o

remoción de la vegetación (deforestación), prácticas agrícolas inadecuadas, sobrecargas, explanaciones, llenos artificiales, construcción de reservorios, intervención de drenajes y concentración de aguas (8). El cambio o la intervención de la cobertura vegetal, además de disminuir el refuerzo de las laderas, tiene efectos fundamentales en las relaciones hidroedafológicas, que guardan estrecha relación con la estabilidad de las laderas (18).

Actualmente, para las condiciones de la zona cafetera colombiana y para los suelos de la unidad San Simón, existe poca información sobre los factores involucrados en los deslizamientos, como las propiedades hidrofísicas, mecánicas y químicas relacionadas con la susceptibilidad a deslizamientos. Es así como, la estabilidad de una ladera depende entre muchos otros factores de los parámetros de resistencia al corte, cohesión y fricción efectivos del material (c' y ϕ'), la altura e inclinación del talud, la densidad del material, y la distribución de las presiones intersticiales en la ladera (1); mientras que la estabilidad de los suelos en condiciones no saturadas guarda relación estrecha con la curva característica de humedad del suelo (*SWCC* por sus siglas en inglés), que es la relación entre el contenido de agua (θ) y la succión (16). En esta curva puede definirse la humedad de saturación (θ_s) y el valor de entrada de aire o presión de burbujeo, donde el aire comienza a ingresar a los poros del suelo (20), parámetros de importancia en la susceptibilidad a los deslizamientos (16). Por lo anterior, se planteó un estudio de caso para determinar algunas propiedades mecánicas, hidrofísicas y químicas relacionadas con la susceptibilidad a deslizamientos de un inceptisol de importancia para la producción de café en Colombia, con el fin de generar

conocimientos sobre las propiedades de los suelos de la Unidad San Simón, relacionadas con los deslizamientos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. El muestreo de la unidad de suelo se realizó en la zona cafetera del municipio de Ibagué - Tolima, vereda Chembe, finca Cafetal del Río, ubicada entre los 04° 28' 36" N, 75° 09' 59" W, a 1.220 m de altitud y los 04° 28' 39" N, 75° 10' 17" W a 1.344 m de altitud.

Muestras de suelo. En dos lotes de la finca, con condiciones fisiográficas y de suelo similares, se realizaron dos calicatas de aproximadamente 1,60 m de profundidad, donde se obtuvieron muestras de suelo alterado a humedad de campo. En cada sitio, a 80 cm de profundidad, se obtuvieron dos muestras de suelo de cajón de 25 x 25 x 25 cm. Igualmente, por cada horizonte de suelo, se tomaron muestras con tubos de pared delgada y muestras alteradas en bolsas debidamente etiquetadas. Las muestras del suelo pertenecen a la Unidad San Simón, representativa de la zona cafetera central, y susceptible a procesos de erosión y movimientos en masa (13, 14).

Metodología. Se realizó la caracterización mecánica del horizonte B y la caracterización física y química de los horizontes A, AB y B.

Las pruebas de mecánica de suelos realizadas al horizonte B, para lo cual se tomaron muestras de cajón a 80 cm de profundidad fueron las siguientes:

- Resistencia al corte directo consolidado drenado, según la norma ASTM D3080-04 (2)
- Prueba de consolidación, según la norma

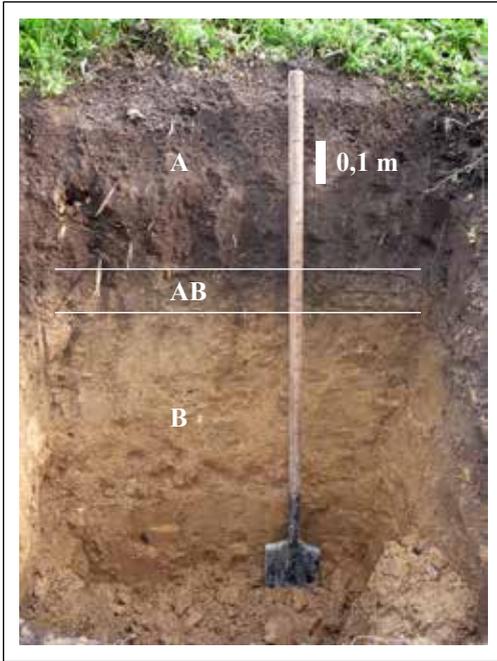


Figura 1. Perfil típico representativo del suelo muestreado de la Unidad San Simón. Clasificado taxonómicamente como Typic eutropepts según USDA (31).

ASTM D2435 – 04 (3)

Las pruebas físicas realizadas a los horizontes A, AB y B fueron:

Granulometría. Método de tamizado según norma (ASTM D 422-63) y la pipeta (dispersión con pirofosfato de sodio al 8%) adaptado de Gee y Bauder (17). Se determinó el porcentaje de limos (partículas entre 0,05 y 0,002 mm de diámetro promedio) y arcillas (partículas menores de 0,002 mm de diámetro promedio) por el método de la pipeta, para lo cual se empleó el equipo Daiki DIK-2020. Previa destrucción de materia orgánica con H_2O_2 al 30%. Se separó la fracción de arenas pasando la suspensión a través de un tamiz No.325, posteriormente la suspensión se llevó a un frasco de sedimentación de 500 cm, con el fin

de determinar la fracción de limos y arcillas mediante muestreo con pipeta, de acuerdo con el tiempo y profundidad establecido por el fabricante (Daiki Rika Kogyo Co, Ltd,) basado en la ley de Stokes. Se determinó el peso seco de arenas y de las fracciones de limos y arcillas, y con base en el peso seco de la muestra se calculó la distribución en porcentaje de arenas, limos y arcillas. Igualmente, se determinó el contenido de arcillas, limos y arenas por el método del hidrómetro de Bouyucos.

Límites de consistencia. Límite plástico, límite líquido e índice de plasticidad, de acuerdo a la norma ASTM D4318-84 descrita por USDA (30), Abramson *et al.* (1) y Das (10).

Densidad aparente. Método del cilindro (6).

Gravedad específica o densidad real. Método del picnómetro ASTM, 1958, descrito por Blake y Hartge (7).

Porosidad total. Calculada a partir de las densidades real y aparente (9).

Conductividad hidráulica. Método del permeámetro carga constante en muestras saturadas (22), calculado mediante la Ecuación <1>.

$$k_{sat} = QL/Ath \quad <1>$$

Donde:

k_{sat} = Coeficiente de conductividad hidráulica saturada

Q = Caudal

L = Longitud de la muestra

A = Área transversal de la muestra

t = Tiempo

h = Gradiente hidráulico

Se determinó el coeficiente de permeabilidad en el horizonte B mediante los coeficientes de consolidación al utilizar la Ecuación <2>.

$$k = C_v \gamma_w m_v \quad <2>$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad

C_v = Coeficiente de consolidación

m_v = Coeficiente de consolidación volumétrica

γ_w = Peso específico del agua

Curva característica de humedad. La curva característica del agua en el suelo, definida como la relación entre el contenido de agua y la succión (15), se determinó mediante una metodología que combinó la medición del contenido de agua volumétrica (%) por el método gravimétrico y la succión por medio de tensiómetros con transducción electrónica Eijkelkamp (0 a - 85 kPa). A partir de muestras de suelo alterado, se moldearon tres monolitos de suelo por cada horizonte, en cilindros de PVC de 10 cm de diámetro por 12 cm de altura. Los monolitos se moldearon hasta alcanzar la densidad aparente del campo. En el punto medio de cada cilindro se ubicó un tensiómetro de humedad de copa porosa con transducción electrónica de masa conocida.

Una vez constituidas las muestras de suelo en cada cilindro y ubicado en cada una de ellas el tensiómetro de humedad, el suelo se sometió a procesos continuos de humedecimiento (de arriba hacia abajo) y secado. Se realizaron las lecturas de tensión, con el tensiómetro de transducción electrónica, e inmediatamente se registraba la masa del cilindro + suelo húmedo + tensiómetro. Al final de las mediciones se registró la masa de suelo seco a la estufa a 105+/-5°C por 18 h. De esta forma, se conoció el contenido de agua en el suelo con su respectivo valor de tensión para los procesos de secado y humedecimiento y la humedad saturada (θ_s), que fue el máximo valor de humedad alcanzado por el suelo bajo estas condiciones. Lo anterior fue el insumo para construir la curva característica

de humedad mediante el modelo empírico de Fredlund y Xing (15) (Ecuación <3>), cuyos coeficientes (a , n , m) se obtuvieron con el programa de regresión no-lineal NLIN del paquete estadístico SAS®.

$$\theta = \theta_s \left[\frac{1}{\ln[e + (\psi/a)^n]} \right]^m \quad <3>$$

Donde:

θ = Contenido de agua en el suelo (%)

θ_s = Humedad saturada

ψ = Humedad matricial o succión

a , n , m = Coeficientes del modelo. a representa el valor de succión donde el aire comienza a entrar a los poros más grandes del suelo conocida también como presión de entrada de aire. n y m son valores implícitos en la pendiente y forma de la curva. n se relaciona con la tasa de saturación y m con las condiciones de humedad residual.

Propiedades químicas del suelo. Se realizó la caracterización de las propiedades químicas del perfil de suelo. Contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black (33), capacidad de intercambio catiónico, pH, potasio, calcio, magnesio, sodio, manganeso, hierro, aluminio (30) y azufre (fosfato de calcio 0,008 M – turbidimetría).

Análisis estadístico. Por tratarse de un estudio de caso exploratorio y no experimental, se realizó el análisis descriptivo de los datos obtenidos para las propiedades físicas de los suelos, y con el fin de valorar si existían diferencias del comportamiento de la curva de retención humedad del suelo debidas al efecto de los cambios en los horizontes del perfil, se compararon los parámetros de los modelos que describían las curvas características de humedad, para lo cual se empleó el método del modelo de regresión no-lineal

NLIN del paquete SAS®, con el fin de estimar los parámetros de ajuste de cada uno de los modelos y sus intervalos de confianza según prueba t al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados tienen un alcance limitado dado que el sitio de muestreo podría no representar el comportamiento general de la Unidad de Suelos San Simón, dada la heterogeneidad de la misma que es gobernada por los factores de formación del suelo. Las ideas que se consignan son el resultado del análisis de la información siguiendo los criterios de ingeniería y edafología que contribuyen a explicar algunos comportamientos y aplicar procedimientos en la práctica de la ingeniería geotécnica.

Parámetros de resistencia al corte

Según el ensayo de corte directo consolidado drenado, el horizonte B presentó una cohesión efectiva de 10 kPa y un ángulo de fricción efectivo de 26° (Figura 2). En términos relativos, a partir de la cohesión efectiva baja (10) se podría interpretar su alta susceptibilidad a la erosión hídrica por la desagregación de las partículas de suelo

debida al efecto de las gotas de lluvia y su susceptibilidad al movimiento en masa una vez se pierda dicha cohesión por la suma de diferentes factores como son la saturación, la pérdida de succión y la deforestación, y al tener en cuenta su ángulo de fricción relativamente bajo (10).

Prueba de compresibilidad

Esta prueba permitió formar la figura típica de un suelo compresible. El índice de compresión fue 0,31 que se asocia con una compresibilidad moderada a media, de una arcilla blanda normalmente consolidada (10) (Figura 3 y Tabla 1).

A partir de la prueba de consolidación y según el índice de colapso (I_c) de Bell y Culshaw (4), que representa la disminución relativa de la relación de vacíos de un suelo confinado cuando se le satura bajo una carga vertical determinada y que se expresa mediante la Ecuación <4>:

$$I_c = \Delta e / (1 + e) \quad <4>$$

Donde:

I_c = índice de colapso de Bell y Culshaw (4)

Δe = Gradiente de la relación de vacíos

e = Relación de vacíos

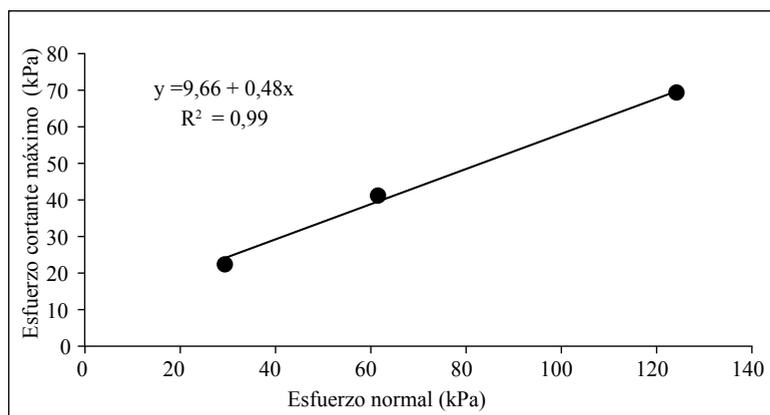


Figura 2. Representación gráfica de la prueba de corte directo por el diagrama de Mohr. La intersección de la recta con el eje Y indica la cohesión efectiva y el ángulo entre el eje de esfuerzos normales y la tangente a la envolvente de Mohr es el ángulo de fricción interna (ϕ) (29).

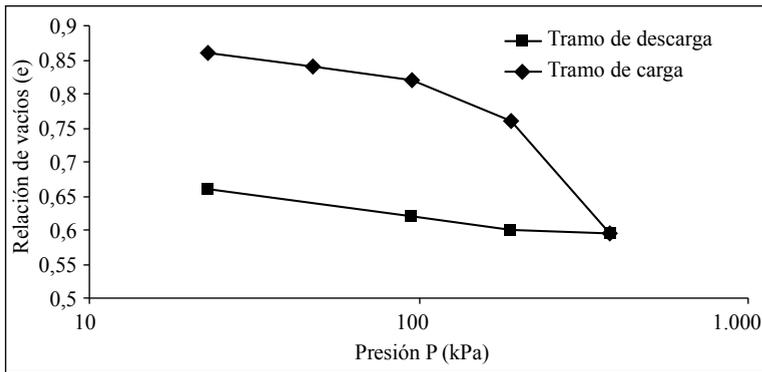


Figura 3. Curva de compresibilidad del horizonte B. Presión – relación de vacíos.

Tabla 1. Coeficientes obtenidos de la prueba de consolidación del suelo (horizonte B).

σ_v (kPa)	a_v (1/kPa)	m_v (1/kPa)	Δe	C_c
23,6 – 47,2	0,0001	0,00054	0,024	-
47,2 - 94	0,0001	0,00023	0,020	-
94,6 – 189,3	0,001	0,00029	0,050	-
189,3 – 378,8	0,001	0,00050	0,166	0,309

Puede interpretarse que el horizonte B presenta susceptibilidad al colapso, con un valor del índice de 5,9%, que lo clasifica como un material con problema de colapso. El colapso es la disminución del volumen, y por consiguiente, de la relación de vacíos de un suelo confinado, cuando se le satura bajo una carga vertical constante. Un suelo colapsable puede resistir una carga vertical relativamente grande, con pequeñas deformaciones, mientras el contenido de humedad sea bajo, pero al aumentar el contenido de humedad puede presenciarse un asentamiento súbito sin incremento de la carga (21).

Análisis de granulometría

En las Tablas 2 y 3 se presentan los datos relacionados con la granulometría de los suelos, obtenida por los métodos de la pipeta e hidrómetro, respectivamente. Al tener en cuenta los resultados de la prueba de pipeta e hidrómetro (Según la

clasificación del triángulo textural de los suelos del USDA (20), los tres horizontes (A, AB y B) se clasifican como suelos franco arenos arcillosos. Según el SUCS (Sistema unificado de clasificación de suelos, norma ASTM D2487), reportado por Das (10), el suelo se caracterizó en términos generales como un limo, que puede estar en el límite entre una arena limosa y un limo arenoso.

El comportamiento mecánico de los limos a diferencia de las arcillas y arenas no ha sido estudiado ampliamente, y en la actualidad no se ha entendido suficientemente (1). En general, los niveles superficiales (A y AB) se caracterizan por una granulometría más fina y en el nivel más profundo (B) se encuentra el suelo de naturaleza más arenosa (Figura 4 y Tabla 4). Los valores de arcilla obtenidos por las dos metodologías (pipeta e hidrómetro) y las diferencias en los contenidos de arenas y limos, posiblemente se deben al método de dispersión.

Tabla 2. Promedio de la distribución granulométrica según el método de la pipeta.

Horizonte	Profundidad (m)	Arenas	Desv.	Limos (%)	Desv.	Arcillas	Desv.
A	0 -0,35	51,8	0,5	27,6	0,5	20,6	0,3
AB	0,35 - 0,45	50,4	0,9	26,8	1,2	22,8	0,9
B	0,45 m - >1,60	58,0	1,1	22,1	1,0	19,9	1,1

Tabla 3. Promedio de la distribución según el método del hidrómetro.

Horizonte	Profundidad (m)	Arenas	Desv.	Limos (%)	Desv.	Arcillas	Desv.
A	0 -0,35	56,0	5,7	23,0	5,7	21,0	0,0
AB	0,35 - 0,45	60,0	n.d.	18,0	n.d.	22,0	n.d.
B	0,45 m - >1,60	60,5	0,7	20,0	1,4	19,5	0,7

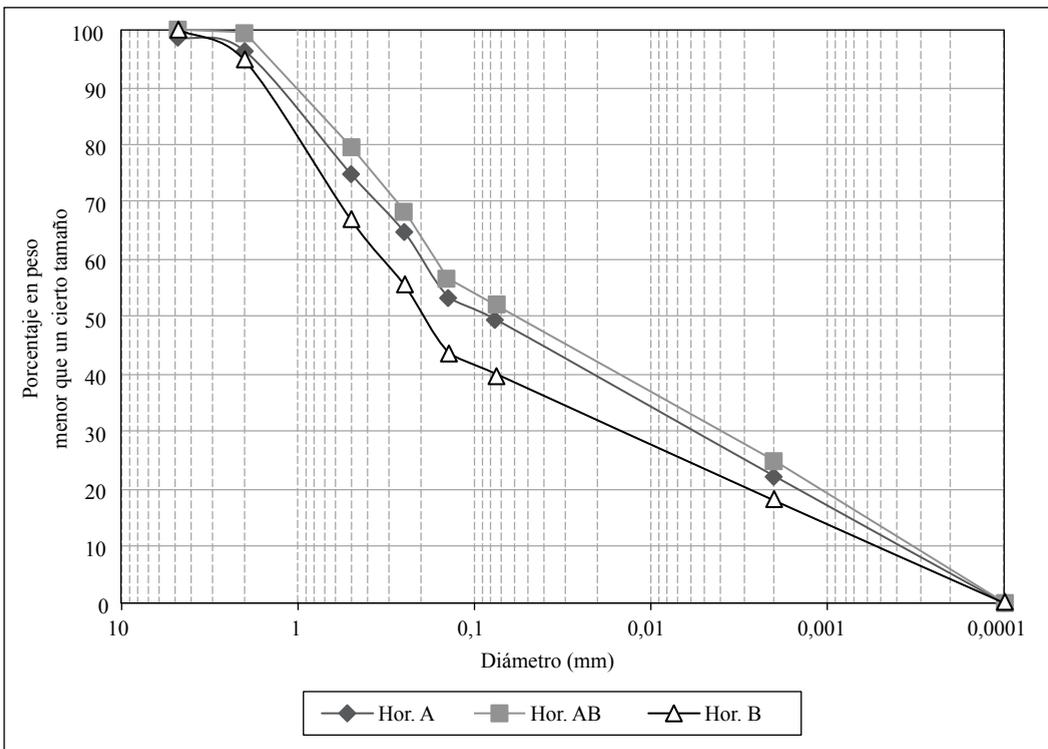


Figura 4. Curva granulométrica por el método combinado (tamizado y pipeta).

Límites de consistencia

El suelo se caracterizó cualitativamente como un limo de baja plasticidad (ML) según la

carta de plasticidad de Casagrande (Tabla 5); sin embargo, en conjunto, el suelo corresponde a una arena limosa (SM). En la carta de plasticidad se observó que los suelos de los

Tabla 4. Clasificación del suelo según la SUCS a partir de la curva granulométrica.

Horizonte	Profundidad (m)	D ₆₀	D ₁₀ (mm)	D ₃₀	Clasificación SUCS
A	0-0,35 m	0,2	0,0003	0,0051	SM (arena limosa)
AB	0,35 - 0,45 m	0,18	0,0002	0,004	ML (limo)
B	0,45 m - >1,60m	0,33	0,0004	0,015	SM (arena limosa)

D₁₀ Diámetro efectivo del grano.

Tabla 5. Límites de consistencia del suelo.

Horizonte	Profundidad (m)	w _L (%)	w _p (%)	I _p (%)	A
A	0-0,35 m	44,7	30,1	14,6	0,71
AB	0,35 - 0,45 m	45,8	33,6	12,2	0,53
B	0,45 m - >1,60m	45,9	27,6	18,3	0,92

w_L = Límite líquido, w_p = Límite plástico, I_p = Índice de plasticidad, ML = Limo de baja plasticidad. * Según carta de plasticidad de Casagrande (10). A=I_p/fracción de arcilla (actividad de las arcillas de Skempton, 1953, Reportado por Das (10)).

perfiles están localizados ligeramente debajo de la Línea A. Los limos presentan un rango amplio de comportamiento que comprende desde las arenas finas hasta las arcillas. Estos limos de la unidad San Simón, por ser de baja plasticidad podrían comportarse geotécnicamente más como arenas finas que como arcillas. Cabe anotar que estos suelos tienen como propiedad distintiva su baja permeabilidad, que influye en su comportamiento y merece consideración especial. Sin embargo, pueden ser sensibles al humedecimiento y a la compactación al igual que las arcillas.

De acuerdo los valores de límite líquido entre 44,7 % y 45,9 % se trata de un suelo de compresibilidad baja a media. El índice de plasticidad por debajo de 25 se califica como bajo y los valores encontrados fueron de 14,6 a 18,3 lo que indica que el suelo puede cambiar de estado sólido a líquido con un poco contenido de humedad, lo que lo hace propenso a los movimientos en masa.

Propiedades volumétricas del suelo

En la Tabla 6 se presenta la caracterización de las propiedades volumétricas del perfil.

La densidad aparente se incrementó con la profundidad del perfil. Se observa como el horizonte A fue menos denso y, por ende, más poroso, debido posiblemente a su mayor contenido de materia orgánica (5%). El horizonte AB fue más denso y con menor porosidad que el horizonte A, lo cual puede tener implicaciones en el movimiento del agua y en la saturación rápida del horizonte orgánico (A). La densidad aparente y específica del horizonte B es la mayor, con la porosidad total más baja, lo anterior puede tener implicaciones en su estabilidad, debido a que su alta densidad favorece el incremento de los esfuerzos efectivos y totales. El horizonte B presentó la menor relación de vacíos (0,72), lo cual muestra que se trata de un suelo compacto, que tiende a saturarse más rápidamente y comprometer la estabilidad de los horizontes (A y AB), por tratarse de un suelo poco permeable. La gravedad específica se incrementó levemente con la profundidad del perfil, como se reporta para los suelos residuales, con valores del orden de 2,63 a 2,66 kg.m³, que pueden relacionarse con la presencia de minerales de cuarzo (12) y corresponden a los valores de 2,65 kg.m³ para el batolito de Ibagué (32).

Tabla 6. Propiedades volumétricas del suelo.

Horizonte	Profundidad (m)	G_s (kg.m ⁻³)	Desv.	ρ_b (kg.m ⁻³)	Desv.	n (%)	e_0
A	0-0,35	2,63	0,008707	1,28	0,111241	51,28	1,05
AB	0,35-0,45	2,64	0,009561	1,46	0,0663	44,72	0,81
B	0,45 m - >1,60	2,66	0,014828	1,54	0,067089	41,98	0,72

G_s = gravedad específica de los sólidos o densidad de los sólidos, ρ_b = Peso específico seco o densidad aparente, n = porosidad total, e_0 = relación de vacíos, Desv.= Desviación estándar.

Permeabilidad

El ensayo de permeabilidad en medio saturado mostró que se trató de un perfil de suelo calificado cualitativamente como poco permeable a muy poco permeable (29) (Tabla 7); su comportamiento probablemente se deba al contenido de arenas finas y limos. Debido a la gran proporción de partículas finas presentes en el suelo (Tablas 2 y 3) es posible que el método empleado de cabeza constante no sea el mejor para explicar la permeabilidad del mismo, de allí los valores altos de desviación estándar; sin embargo, la determinación de la permeabilidad del horizonte B por el método de consolidación, según la norma ASTM D2435-04 (3) (Tabla 7), mostró valores más bajos de permeabilidad para el horizonte B. Es posible que la escasa permeabilidad del horizonte B pueda afectar la estabilidad de los horizontes superiores (A y AB), por convertirse en un plano de falla potencial (23).

Características químicas del suelo

Los valores de pH y sodio (Na) del suelo se incrementaron con la profundidad del horizonte, caso contrario a lo ocurrido con el contenido de materia orgánica (MO), magnesio (Mg), capacidad de intercambio catiónico (CIC), fósforo (P), manganeso (Mn), cobre (Cu) y cinc (Zn) que decrecieron con la profundidad del perfil (Tabla 8). Se consideró un suelo muy pobre en bases (K, Na y Mg), fósforo y materia orgánica, con contenidos moderadamente altos de Ca. Su

capacidad de intercambio catiónica es baja (< 8 cmol₍₊₎.kg⁻¹), que puede relacionarse con la moderada actividad de las arcillas (Tabla 5).

Suzuki *et al.* (27), Omar *et al.* (26) y Medina y Salazar (24) indican que los suelos ácidos poseen una resistencia al corte mayor que los suelos básicos, debido a que la estructura del suelo tiende a ser más floculada que dispersiva por los bajos valores de pH. En este sentido, el horizonte A podría presentar una estabilidad mayor debido a sus contenidos superiores de materia orgánica frente a los demás horizontes evaluados. La materia orgánica presenta interacción con otros componentes del suelo como iones metálicos y arcillas, y debido a su efecto cementante crea estructuras muy estables, lo cual favorece el incremento de la cohesión del suelo, aun en condiciones saturadas (11, 28).

Curva característica de humedad

Al tener en cuenta la interpretación teórica donde el suelo se encuentra en estado de saturación cuando el potencial matricial alcanza el valor de cero, las curvas características de humedad obtenidas de los tres horizontes de suelo (Figuras 5, 6 y 7) permiten inferir que el perfil de suelo tiende a saturarse rápidamente, con valores bajos de humedad cercanos a 0,3 cm³.cm⁻³. Lo anterior se debe posiblemente a las características granulométricas del suelo, que le confieren una porosidad total promedio igual o inferior al 50% (Tabla 6). Este comportamiento

puede tener implicaciones en la estabilidad del suelo y la susceptibilidad a la erosión, dado que los espacios porosos se llenan rápidamente de agua y se incrementa así la presión intersticial y la escorrentía.

La observación general de las curvas características de humedad obtenidas permite interpretar que se trata del comportamiento de un suelo de partículas finas, otorgado por la fracción de limos y arcillas, ya que no se evidencia un cambio abrupto en el comportamiento de la humedad. Este comportamiento puede obedecer a la oclusión de poros, la densidad aparente alta y permeabilidad muy lenta, de acuerdo con los datos obtenidos para estas propiedades.

Al comparar los coeficientes de las curvas características de humedad (Tabla 9) en el proceso de humedecimiento (adsorción) de los tres horizontes de suelo, se observa como para los tres coeficientes (*a*, *n*, y *m*) los horizontes AB y B son similares, lo que muestra que no hay una clara diferenciación entre estos dos horizontes en cuanto a la retención de

humedad y, por ende, puede afirmarse que las curvas características de humedad son iguales para estos dos horizontes; pero sí hubo una clara diferencia entre el horizonte A y los horizontes AB y B, al comparar el coeficiente *a* (Tabla 8). También se ve reflejada la diferencia del horizonte A con el horizonte AB al comparar los coeficientes *n* y *m* del modelo. Al comparar las curvas en el proceso de secado (desorción) (Figuras 5, 6 y 7), se observa que los horizontes A y B presentan curvas disímiles dadas las diferencias entre el coeficiente *m* (Tabla 8).

Lo anterior permitiría interpretar que el horizonte A presenta una salida más tardía del aire atrapado en los poros durante el proceso de adsorción que los horizontes AB y B, y ser el horizonte A quien gana más rápidamente la entrada de aire en el proceso de desorción. Lo anterior tiene implicaciones en la estabilidad, dado que este horizonte es el que mayor resistencia opondría en perder la succión durante el proceso de adsorción y quien más rápido encontraría la entrada de aire en el proceso de desorción.

Tabla 7. Permeabilidad del suelo.

Horizonte	Profundidad (m)	k_{sat}	Desv. (cm.s ⁻¹)	<i>K</i>	Permeabilidad relativa*
A	0–0,35	1,0 x10 ⁻⁴	1,06 *10 ⁻⁴	n.d.	Poco permeable
AB	0,35 – 0,45	2,4 x 10 ⁻⁵	4,57*10 ⁻⁵	n.d.	Muy poco permeable
B	0,45 - >1,60	8,2 * 10 ⁻⁶	1,02*10 ⁻⁵	2,3*10 ⁻⁶ a 3,4*10 ⁻⁷	Muy poco permeable

K_{sat} = coeficiente de permeabilidad saturado obtenido por el método del permeámetro de cabeza constante. *k* = coeficiente de permeabilidad obtenido con los coeficientes de consolidación (ASTM, 2004b). Con valores de coeficiente de consolidación (*C_v*) de 4,3*10⁻² y 1,5*10⁻² cm².kgf y de compresión volumétrica (*m_v*) de 0,053 y 0,023 cm².kgf, respectivamente. n.d. = sin dato. *Terzagui et al. (29).de Casagrande (10). A= Ip/fracción de arcilla (actividad de las arcillas de Skempton, 1953, Reportado por Das (10)).

Tabla 8. Características químicas del suelo.

Horizonte	pH		MO	K	Ca	Mg	Na	Al	CIC	P	Fe	Mn	Zn	Cu	B	S
	%															
													cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹			
													mg.kg ⁻¹			
A	5,2	5,0	0,2	2,9	0,7	0,02	0,9	8,0	3,0	251,0	27,0	0,6	1,4	0,4	7,2	
AB	5,3	1,8	0,0	1,5	0,1	0,06	1,7	8,0	2,0	163,0	18,0	0,3	0,0	0,0	8,6	
B	5,8	0,3	0,1	2,4	0,3	0,07	1,0	4,5	1,5	54,5	11,5	0,2	0,2	0,3	2,9	

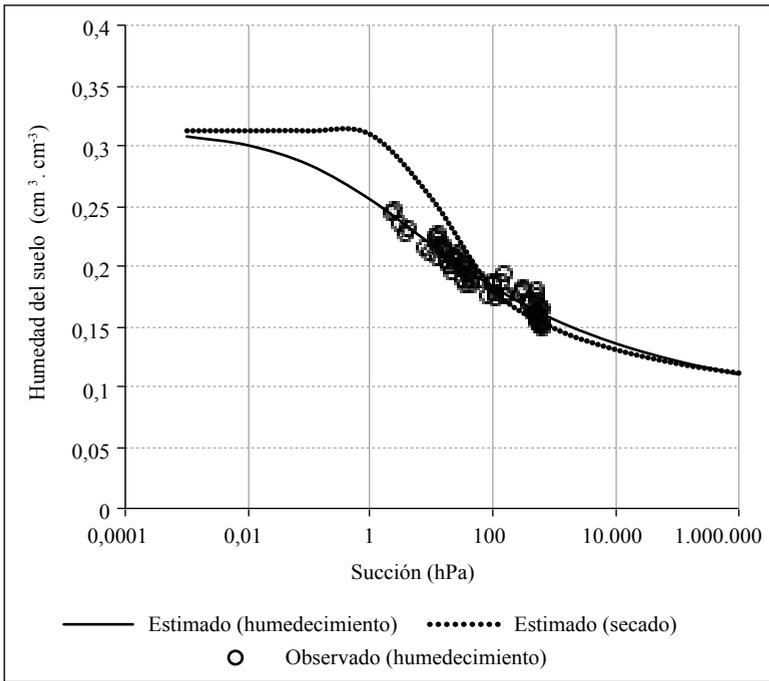


Figura 5. Curva característica de humedad del horizonte A, suelo alterado.

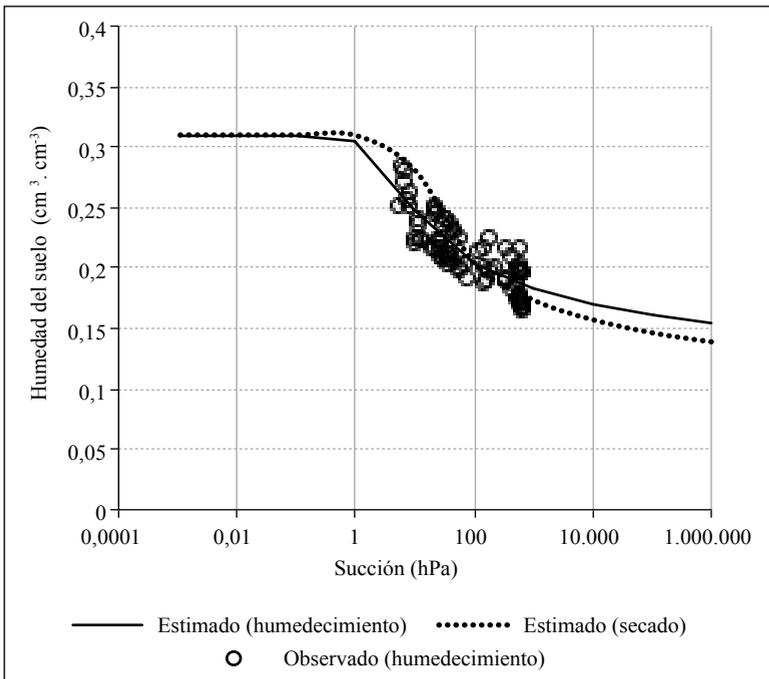


Figura 6. Curva característica de humedad del horizonte AB, suelo alterado.

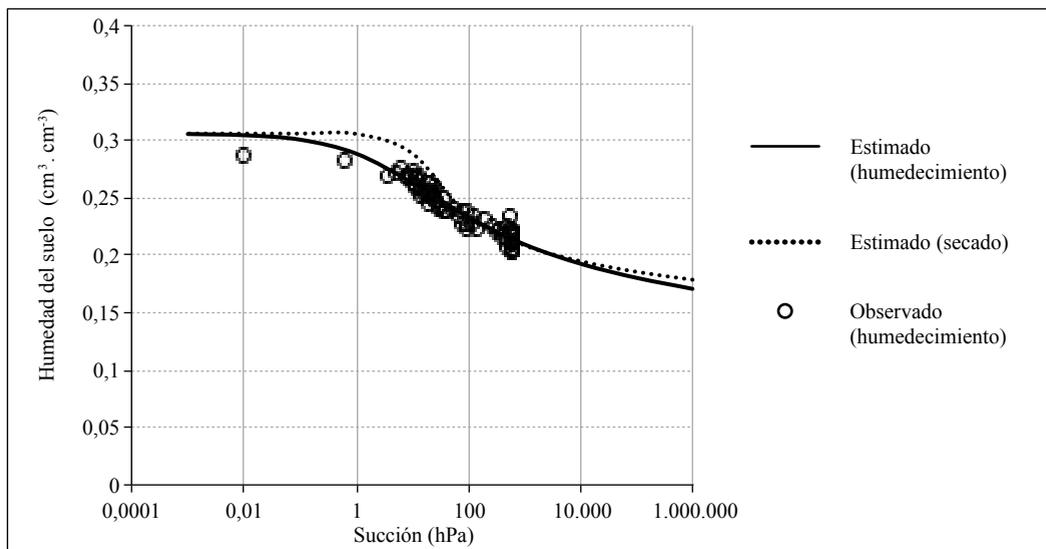


Figura 7. Curva característica de humedad del horizonte B, suelo alterado.

Tabla 9. Coeficientes obtenidos de la curva característica de humedad según el modelo de Fredlund y Xing (15).

Horizonte	Proceso	Coficiente	Valor coeficiente	Error estándar	Límite inferior*	Límite superior*
A	Humedecimiento	<i>a1</i> (hPa)	0,407	0,115	0,177	0,637
		<i>n1</i>	0,428	0,107	0,215	0,642
		<i>m1</i>	0,563	0,118	0,327	0,798
		Θ_s	0,3126			
AB	Humedecimiento	<i>a2</i> (hPa)	2,214	0,803	0,615	3,813
		<i>n2</i>	1,686	0,788	0,116	3,256
		<i>m2</i>	0,227	0,045	0,137	0,317
B	Humedecimiento	Θ_s	0,3100			
		<i>a3</i> (hPa)	1,767	0,355	1,059	2,474
		<i>n3</i>	0,597	0,137	0,324	0,870
		<i>m3</i>	0,282	0,052	0,178	0,386
A	Secado	<i>a1</i>	4,8089	0,3667	4,0578	5,5601
		<i>n1</i>	1,5756	0,2558	1,0516	2,0997
		<i>m1</i>	0,3486	0,0311	0,2848	0,4123
AB	Secado	<i>a2</i>	7,72 n.s	8	-8,5255	23,9831
		<i>n2</i>	2,02 n.s	3	-3,7242	7,7659
		<i>m2</i>	0,25 n.s	0,1409	-0,0346	0,5435
B	Secado	<i>a3</i>	8,5102	2	3,8793	13
		<i>n3</i>	1,9312	0,859	0,1687	3,6938
		<i>m3</i>	0,1729	0,0342	0,1027	0,2432

Intervalos de confianza según prueba t al 5%. n.s = Valor sin significancia estadística.

Se observa una menor pendiente en el horizonte A, representada en el coeficiente n , lo cual implicaría una mayor capacidad para conservar la humedad durante los procesos de secado y humedecimiento.

El mayor valor de entrada de aire para el horizonte A indica que éste puede retener más agua por unidad de volumen que los horizontes AB y B. Por otro lado se observó con claridad el fenómeno de histéresis, en donde para valores de succión iguales se obtienen valores de humedad mayores durante el proceso de drenaje.

Como conclusión y de acuerdo las propiedades mecánicas e hidrofísicas podría inferirse que este suelo es susceptible a la erosión hídrica y movimiento en masa, debido a su baja cohesión (10 kPa); así mismo, que se trata de un suelo de moderada compresibilidad y alta susceptibilidad de colapso. Las diferencias en permeabilidad entre los horizontes A, AB y B pueden crear superficies de falla de los primeros horizontes de suelo sobre el horizonte B de menor permeabilidad, los índices de consistencia y la curva de característica de humedad del suelo indican que el suelo puede pasar de estado sólido a líquido, con pequeñas variaciones en el contenido de humedad, lo cual lo hace propenso a los deslizamientos y flujos superficiales.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por su apoyo en la realización de análisis de suelos. Al Servicio de Extensión del Comité Departamental de Cafeteros del Tolima en especial a los ingenieros Olga Girón y Luis Alberto Olaya por su esmerada colaboración en la toma de las muestras de suelo. A Fabián Hoyos Patiño, ingeniero

geólogo M.Sc., Óscar Echeverri Ramírez, ingeniero civil M.Sc., Edgar Hincapié Gómez, ingeniero agrónomo Ph.D por su asesoría. Al señor Arturo Gómez por su colaboración.

LITERATURA CITADA

1. ABRAMSON, L.W.; LEE, T.S.; SHARMA, S.; BOYCE, G.M. Slope stability and stabilization method. 2a. ed. New York : John Wiley & Sons, 2002. 712 p.
2. ASTM. Standard D3080-04. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. [En línea]. West Conshohocken : ASTM International, 2004a. Disponible en internet: <http://www.astm.org>. Consultado en Agosto de 2011.
3. ASTM. D2435 - 04. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. [En línea]. West Conshohocken : ASTM International, 2004b. Disponible en internet: <http://www.astm.org>. Consultado en Agosto de 2011.
4. BELL, F.G.; CULSHAW, M.G. Problem soils: A review from a British perspective. En: JEFFERSON, I.; MURRAY, E.J.; FARANGHER, E.; FLEMING, P.R. Problematic soils. Nottingham : Thomas Telford, 2001. 130 p.
5. BELTRAN, J.; CASTIBLANCO, W.; ALFARO, A. Evaluación de zonas con posible amplificación topográfica y susceptibles a deslizamientos debido a un sismo en Ibagué - Colombia. IMME 44(3):9-16. 2006.
6. BLAKE, G.R.; HARTAGE, K.H. Bulk density. p. 363-375. En: KLUTE, A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2a. ed. Madison : American society of agronomy, 1986a.
7. BLAKE, G.R.; HARTAGE, K.H. Particle density. p. 377-382. En: KLUTE A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2a. ed. Madison : American society of agronomy, 1986b.
8. CROZIER, M.J. Deciphering the effect of climate on landslide activity: A review. Geomorphology 124(3/4):260-267. 2010.
9. DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. p. 443-461. Porosity. En: KLUTE A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2a. ed. Madison : American society of agronomy, 1986.

10. DAS, B.M. Principles of geotechnical engineering. 5a. ed. Toronto : Thomson Learning, 2002. 589 p.
11. DAVIES, P. Influence of organic matter content, moisture status and time after reworking on soil shear strength. The journal of soil science 36(2):299-306. 1985.
12. ECHEVERRI R., O. Efecto de la microestructura en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de algunos suelos provenientes de rocas ígneas presentes en Medellín. Medellín : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas, 2005. 104 p. Tesis: Magister en Ingeniería geotecnica.
13. FNC. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento del Tolima: Programa de desarrollo y diversificación de zonas cafeteras. Bogotá : FNC, 1973. 93 p.
14. FNC. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento del Huila: Programa de desarrollo y diversificación de zonas cafeteras. Bogotá : FNC, 1985. 235 p.
15. FREDLUND, D.G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian geotechnical journal 31(3):521-532. 1994
16. FREDLUND, D.G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering 132(3):286-321. 2006.
17. GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle size analysis. p. 383-411. En: KLUTE A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2a. ed. Madison : American society of agronomy, 1986.
18. GRAY, D.H.; SOTIR, R.B. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control. Nueva York : John Wiley and Sons, 1996. 378 p
19. GRISALES G., A. Suelos de la zona cafetera: Clasificación y uso. Medellín : Fondo Cultural Cafetero, 1977. 155 p.
20. HILLEL, D. Environmental soil physics. San Diego : Academic Press, 1998. 413 p.
21. HOYOS P., F. Geotecnia: Diccionario básico. Medellín : Hombre nuevo, 2001. 182 p.
22. KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. p. 687-734. En: KLUTE, A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2a. ed. Madison : American society of agronomy, 1986.
23. LOURENCO, S.; SASSA, K.; FUKUOKA, H. Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: Implications for rainfall-induced landslides. Geomorphology 73(1/2): 115-130. 2006
24. MEDINA L., S.B.; SALAZAR G., L.F. Relación entre la resistencia al corte directo y propiedades físicas y químicas en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. Cenicafé (60)3:253-268. 2009.
25. NUÑEZ, A. Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia Jurásico: Batolito de Ibagué. Bogotá : Ministerio de minas y energía, 1998. 22 p.
26. OMAR, M.; SHANABLEH, A.; TAHMAZ, A. Shear strength of compacted green clay physic-chemical factors. Lowland technology international 6(1):9-20. 2004.
27. SUZUKI, M.; TSUZUKI, S.; YAMAMOTO, T. Physical and chemical index properties of residual strength of various soils. Memoirs of the engineering faculty of Yamaguchi University 56(1):1-11. 2005.
28. TERLIEN M., T.J. Modeling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides: The integration of hydrologic model, slope stability models and geographic information systems for the hazard zonation of rainfall-triggered landslides with examples from Manizales (Colombia). Enschede [Holanda] : International institute for aerospace survey and earth sciences, 1998. 254 p.
29. TERZAGHI, K.; PECK R., B.; MESRI, G. Soil mechanics in engineering practice. New York : John Wiley & Sons, 1996. 529 p.
30. USDA. Soil survey laboratory methods manual: Soil survey investigations report No. 42 Version 3.0. Washington : USDA, 1996. 693 p.
31. USDA. Claves para la taxonomía de suelos. Washington : NRCS, 2006. 339 p.
32. VARGAS, C.A.; KAMMER, A.; VALDES, M.; RODRÍGUEZ, C.E.; CANEVA, A.; SÁNCHEZ, J.J.; ARIAS, E.; CORTES, C.A.; MORA, H. New geological and geophysical contributions in the section Ibagué – Armenia, Central Cordillera – Colombia. Earth sciences research journal 9(2):99-109. 2005
33. WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil science 37:29-38. 1934

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 Rivera, 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 Yepes, Ing. Química **
Sergio Gómez Rios, Aprendiz Universitario
Daniela Guzmán Cortés, 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 Arredondo, Ing. Agrónomo M.Sc.
Claudia Marcela Mora Agudelo **
Mario Franco A.
Braian Alejandro López O.
Claudia Patricia Valencia V.
José Robín García C.
Rocío del Pilar Pineda Sandoval, 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 Angarita, Ing. Agrónomo Esp.
Arturo Gómez V.

Fitotecnia

Francisco Fernando Farfán V., Ing. Agrónomo M.Sc.
José Raúl Rendón Sáenz, Ing. Agrónomo M.Sc.
Carlos Augusto Ramírez C., Tec. Técnicas Forestales
Leidy Tatiana Bermúdez F., Ing. Agrónomo
Nathalia Díaz Mejía, 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 Vásquez, 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 Ramírez, 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., Admr 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 Agudelo, 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 Duque, 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.
Alexander Erazo S. Técnico Electricista
Cristian Andrés Chica Gómez, 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**

Oscar 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⁻¹, y no 5 g de peso seco.día⁻¹
 - _ Se aplicaron 25 g.ha⁻¹ del ingrediente activo, y no 25 g i.a./ha
 - _ Cada planta recibió 20 g.ha⁻¹ de agua, y no 20 g H₂O/ha por planta
- Use la línea oblicua o *slash* (/) para conectar unidades del SI con unidades que no son del SI (por ejemplo: 10 °C/h ó 10 L/materia)
- Nunca use el punto elevado (.) y el *slash* en la misma expresión. Si se hallan mezcladas unidades del SI con unidades que no son del SI, use primero el slash y luego la palabra 'por' en segundo término.
- Nunca utilice dos o más líneas oblicuas o *slashes* (/) o la palabra 'por' más que una vez en la misma frase, pues estos dos términos son equivalentes; por ejemplo en cepilladas/día por planta, redacte la frase así: cada planta fue cepillada dos veces al día. Para unidades totalmente verbales, use un slash, como en 3 flores/planta ó 10 frutos/rama
- Use la misma abreviatura o símbolo para las formas en singular o plural de una unidad determinada (por ejemplo, 1 kg y 25 kg). Deje un espacio entre el valor numérico y el símbolo (por ejemplo, 35 g y no 35g). En una serie de medidas ponga la unidad al final (excepto para el signo de porcentaje) así: entre 14 y 20°C o hileras a 3, 6 y 9 m, pero 14%, 16% y 18%
- En las publicaciones se emplea la coma (,) para separar decimales y el punto (.), para separar miles y millones

BIBLIOGRAFÍA

Antes de enviar las propuestas de publicaciones tenga en cuenta los siguientes modelos para citar las bibliografías, de acuerdo con los criterios determinados por el Comité Editorial de Cenicafé.

Libros, folletos y monografías

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

Partes o capítulo de un libro

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

Ponencias

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

Trabajos de grado

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

Congresos, Seminarios, Simposios

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

Artículos de revistas

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

Separatas y reimpresos

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

Boletines y Publicaciones en serie

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

Normas

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

Documentos electrónicos

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

ESTRUCTURA DEL ARTÍCULO CIENTÍFICO

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

Título – Máximo 16 palabras

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

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