

# TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL LAVADO DEL CAFÉ

Por:

Diego A. Zambrano-Franco,  
Juan D. Isaza-Hinestroza,  
Nelson Rodríguez-Valencia,  
Uriel López-Posada.

GERENCIA TÉCNICA  
PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ  
"Pedro Uribe Mejía"

**Cenicafé**

Chinchiná - Caldas - Colombia

Boletín Técnico

Nº 20

1999



## FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA

### COMITÉ NACIONAL DE CAFETEROS

Ministro de Hacienda y Crédito Público  
Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural  
Ministro de Comercio Exterior  
Director del Departamento de Planeación Nacional

Miembros elegidos para el período 1999-2001

#### PRINCIPALES

Luis Ignacio Múnera Cambas  
Mario Gómez Estrada  
Alfonso Jaramillo Salazar  
Rodrigo Múnera Zuloaga  
Julio Ernesto Marulanda Buitrago  
Diego Arango Mora  
Floresmiro Azuero Ramírez  
Carlos Alberto Martínez Martínez

#### SUPLENTES

Jorge Alberto Uribe Echavarría  
Jorge Cala Robayo  
Ramón Campo González  
Rodolfo Campo Soto  
Edgar Dávila Muñoz  
Alfredo Yañez Carvajal  
Luis Ardila Casamitjana  
Ernesto Sayer Martínez

Gerente General  
JORGE CÁRDENAS GUTIÉRREZ

Subgerente General  
HERNÁN URIBE ARANGO

Gerente Técnico  
ANTONIO HERRÓN ORTIZ

Director Programa de Investigación Científica  
Director Centro Nacional de Investigaciones de Café  
GABRIEL CADENA GOMEZ

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.

## UNA PUBLICACIÓN DE CENICAFÉ

Editor: Héctor Fabio Ospina Ospina I.A., MSc.  
Diseño y  
Diagramación: Gonzalo Gallego González  
Fotografía: Química Industrial - Biodigestión  
CENICAFÉ

---

Primera edición: Julio de 1999  
3500 ejemplares



FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA

GERENCIA TÉCNICA  
PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ  
"Pedro Uribe Mejía"

**Cenicafé**

# TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL LAVADO DEL CAFÉ

Por:

*Diego A. Zambrano-Franco,  
Juan D. Isaza-Hinestroza,  
Nelson Rodríguez-Valencia,  
Uriel López-Posada.*

Chinchiná - Caldas - Colombia

# CONTENIDO

Página

INTRODUCCIÓN .....	1
SISTEMA MODULAR DE TRATAMIENTO ANAEROBIO (SMTA).....	3
Reactor Hidrolítico/Acidogénico.....	4
Recámara de Dosificación .....	6
Reactor Metanogénico .....	8
INOCULACION DEL REACTOR METANOGENICO (5 semanas).....	10
ACLIMATACIÓN DEL REACTOR METANOGENICO (3 semanas) .....	12
ARRANQUE DEL REACTOR METANOGENICO (12 semanas) .....	12
OPERACIÓN DEL SMTA .....	13
ACIDIFICACIÓN DEL REACTOR METANOGENICO .....	15
POSTRATAMIENTO .....	17
COSTOS .....	19
Tabla 1. Costos de la inversión para construcción de un SMTA y de su FOP .....	20
RECONOCIMIENTOS.....	22
AGRADECIMIENTOS .....	22
LITERATURA CITADA .....	23

# INTRODUCCIÓN

Desde 1984 en Cenicafé se han efectuado investigaciones relacionadas con el tratamiento anaerobio de las aguas residuales producidas durante el proceso convencional de beneficio húmedo del café, tendientes a encontrar la solución más económica para descontaminarlas. En laboratorio se han estudiado diferentes tecnologías: filtros anaerobios de flujo ascendente UAF, empacados con anillos de bambú y también

con anillos de polietileno de baja densidad reciclado, manto anaerobio de lodo de flujo ascendente UASB (8).

Toda la información producida en estos estudios, condujo a que se propusieran los primeros prototipos de plantas de tratamiento de aguas residuales en fincas cafeteras (Figura 1), los cuales se instalaron y fueron evaluados durante cuatro años en la sede principal de Cenicafé, en tres fincas cafeteras en Chinchiná-Caldas, y en la concentración Heracleio Uribe del municipio de Sevilla-Valle (35, 36). A raíz de los resultados obtenidos, se realizaron ajustes en el diseño, se seleccionaron materiales de construcción más adecuados, se plantearon estrategias de operación y dimensionamiento de cada una de las unidades que conforman el sistema, para llegar a proponer el Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) (37).

Esta nueva tecnología ha sido operada y evaluada durante tres años en Cenicafé y ha mostrado eficiencias de remoción de la carga orgánica superiores al 80% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno  $DBO_5$ , en



**Figura 1.** Prototipo inicial de planta de tratamiento de aguas residuales para fincas cafeteras, construido con tanques esféricos de asbesto cemento. Finca La Magnolia, municipio de Chinchiná.

promedio, acordes con lo exigido por la Legislación Colombiana en el Decreto 1594 de 1984 sobre usos del Agua y Residuos Líquidos (17). De esta manera es posible reducir el pago de Tasas Retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, consignado en el Decreto

901 del Ministerio del medio ambiente 1997 (18).

Con la utilización del SMTA se remueve la contaminación presente en las aguas residuales producida por el mucílago fermentado del café, en el lavado de café en los tanques de fermentación (30, 33, 40), tecnología denominada como TANQUE

TINA, en la cual, el consumo de agua es de 4,1L/kg café pergamino seco (39). El pH de estos residuos oscila entre 4,0 y 4,5 unidades y la Demanda Química de Oxígeno, DQO, la cual expresa el déficit de oxígeno ocasionado por la contaminación presente en el agua (21), tiene un valor cercano a 27400mg/L (33).

# SISTEMA MODULAR DE TRATAMIENTO ANAEROBIO (SMTA)

Este fue desarrollado en Cenicafé para el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del lavado que se generan en una finca cuya producción anual es de 1500 arrobas de café pergamino seco (@ de cps), y posibilita el escalamiento de cada una de las unidades que lo componen, para fincas con producciones mayores de café. Además de la adopción del despulpado y el transporte de la pulpa sin agua (2), que evita el 73,7% de la contaminación que producen los subproductos del proceso convencional (28, 34), para su diseño se tuvo en cuenta la distribución anual de la cosecha de café registrada por Uribe y Laverde (24) para la zona rural de Chinchiná. Ellos evaluaron durante cinco años, el día y la semana de máxima producción, que resultaron equivalentes al 1,9% y 8,3% de la cosecha anual, respectivamente. En sitios donde se presenta una cosecha con características de distribución diferentes, tal como producción de café durante gran parte de los meses del año, las dimensiones de la primera unidad deben ser menores.

El SMTA está compuesto por dos unidades que permiten la separación de fases de la digestión anaerobia (1, 9, 22, 25, 27): el reactor Hidrolítico/Acidogénico (RHA) y el reactor Metanogénico (RM). En estudios realizados en los laboratorios de Cenicafé, mediante la separación de fases fue posible incrementar la carga orgánica por día desde 1,5 hasta 10kg de DQO por metro cúbico de reactor metanogénico, manteniendo una remoción de contaminación superior al 80%, expresada como DQO (8, 29).

La Figura 2 presenta un esquema del SMTA donde se pueden observar los desniveles que se deben tener en cuenta al seleccionar el terreno para su instalación y poder garantizar flujo libre del líquido por gravedad. Las unidades están conectadas con mangueras de polietileno reciclado de 1½ pulg., de baja densidad ( $0,925\text{g/cm}^3$ ), de bajo costo y de fácil consecución en el mercado. A la salida del tanque de lavado en el beneficiadero se debe construir una recámara en mampostería



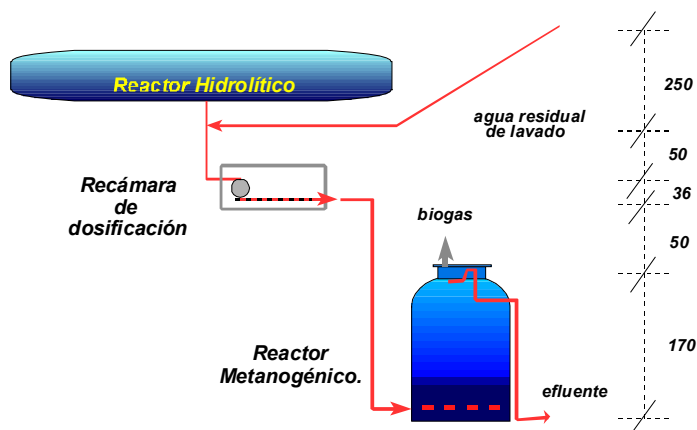


Figura 2. Esquema de un Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio SMTA, para el tratamiento de aguas residuales de lavado de café. Cotas mínimas en el terreno (medidas en centímetros)

de 40cm de altura y de lados de 50x50cm, la cual permita recibir las aguas residuales del lavado. Esta recámara contiene en su interior un codo de PVC, provisto de un tapón con orificios de 1/4 pulg., que evita el ingreso de granos y pulpa al interior de la primera unidad o reactor hidrolítico/acidogénico

(Figura 3). La inclusión de válvulas antes de la recámara y del reactor metanogénico, permite suspender el flujo en caso de que sea necesario atender cualquier eventualidad que pueda presentarse durante la operación del SMTA, tal como la obstrucción de la tubería por la pulpa del café, palos y piedras, entre otros.



Figura 3. Recámara fabricada en mampostería para la retención de granos y pulpa presentes en las ARL que se conducen hacia el SMTA (a); codo suelto para manejo interno de desague y tapón de PVC perforado con orificios de 1/4 pulg. (b)



## REACTOR HIDROLÍTICO/ACIDOGÉNICO

La primera unidad del SMTA es el reactor Hidrolítico/ Acidogénico (RHA) (Figura 4), el cual está constituido por una bolsa negra de Plastilona 500, "tipo salchicha" de 10 metros de longitud y 1 metro de diámetro, fabricada por Carpas IKL de Medellín, Colombia, con una capacidad de 8000 litros; similar a la que se utiliza para la instalación de biodigestores convencionales (13, 23). Para su instalación se hace una excavación trapezoidal del terreno de 10m de largo, 70cm de profundidad, base de 67cm de ancho y 90cm de base mayor (Figura 5). En los extremos de esta excavación se debe rellenar el primer metro con tierra, a manera de rampa para que soporte la bolsa y ésta resista el peso de líquido sin romperse.

Si se simula un corte transversal de este componente (Figura 6), se nota que las aguas residuales procedentes del lavado del café (39), entran y salen por la parte inferior de la bolsa, a través de una T de PVC de 1 1/2 pulg. y un tubo que comunica con el interior, el cual no está soldado a la T y permite almacenar estos



**Figura 4.** Biodigestor convencional fabricado en plastilona 500 y utilizado como infraestructura de Reactor Hidrolítico/ Acidogénico (a); Excavación del terreno para su instalación (b).

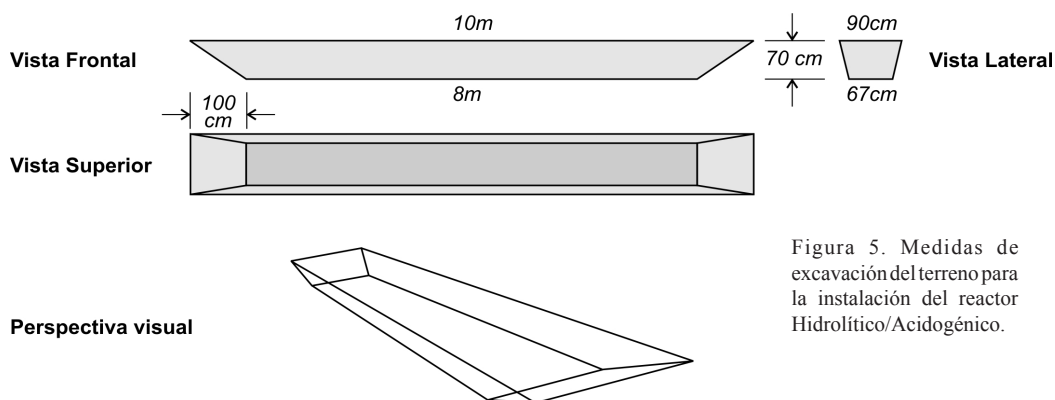
es decir, que permite almacenar las aguas residuales del lavado que se producen en forma discontinua durante el período de cosecha, creando de esta manera un “efecto pulmón” o sea que difiere el tratamiento. Además de lo anterior, en esta unidad se llevan a cabo una serie de reacciones bioquímicas que conducen a la hidrólisis de compuestos de alto peso molecular, tales como la pectina y la protopectina y a su vez, acidificar los compuestos que han sido hidrolizados, o que se encuentran en forma soluble como los azúcares, que hacen también parte de la composición química del mucílago (4, 10, 12, 16). Luego las aguas del lavado salen hacia la recámara de dosificación con un máximo de acidificación (110-120mg NaOH/gDQO, pH final 7,5 unidades).

líquidos por un tiempo mínimo de dos días, con la ayuda de un orificio practicado en forma de media luna, a una altura de 20cm del fondo. Este tubo interior permite además soportar la

bolsa de plastilona desde su parte superior, para evitar los derrames que pueden ocurrir cuando la unidad se encuentra llena de líquido.

El RHA opera como un silo,

Las reacciones de hidrólisis y



**Figura 5.** Medidas de excavación del terreno para la instalación del reactor Hidrolítico/Acidogénico.



**Figura 6.** Corte transversal al centro de la bolsa de plastilona 500 utilizada como reactor hidrolítico/acidogénico (a), empalme en tubos sueltos parte interna superior (b), acople parte interna inferior (c).

acidogénesis que ocurren al interior del RHA, son causa de la actividad de los microorganismos presentes en el mucílago y que son responsables de la fermentación en los tanques. En investigaciones realizadas en Cenicafé se han hecho recuentos de microorganismos en el mucílago fresco, del orden de  $6,9 \times 10^6$  Unidades Formadoras de Colonias por gramo (UFC/g) para aeróbicos mesófilos y  $1,8 \times 10^6$  UFC/g para levaduras (3). Por tal razón, las reacciones bioquímicas se dan en forma inmediata y el

RHA no requiere de inoculación.

## RECÁMARA DE DOSIFICACIÓN

En medio de los dos reactores del SMTA se encuentra la recámara de dosificación (Figura 7), que se constituye en parte fundamental del buen desempeño del sistema. Este elemento permite utilizar los mismos principios de la filtración lenta, reteniendo materia orgánica insoluble como las sustancias pépticas que no fueron hidrolizadas en el

RHA, y dosificar por gravedad las ARL acidificadas entre 500 y 600ml por minuto de caudal. Lo anterior, equivale a aplicar una carga diaria entre 9,8 y 11,8kg de DQO/m<sup>3</sup> de reactor metanogénico. A esta recámara debe agregársele una tapa en lámina u otro material para eliminar el acceso de corrientes de aire que se traducen en presencia de malos olores en los alrededores, y evitar además la caída de objetos extraños en su interior.

La Recámara de dosificación está fabricada en mampostería (ladrillo, cemento y arena) y un flotador de 1½ pulg. que puede construirse en PVC (Figura 8). Las dimensiones internas son: 120cm de largo, 90cm de ancho y 50cm de altura. Al fondo se instala un marco colector de 50x36cm, fabricado en tubería de PVC de 1/2 pulg., el cual va acoplado al tubo de salida de la recámara. Este tubo de salida está provisto de un tapón de PVC con un orificio de 7/64 pulg., que permite la salida del líquido por gravedad con un caudal cercano a 550ml/min (Figura 9a). En ambos lados del marco recolector se hacen orificios laterales de 5/32 pulg., espaciados a una distancia de 1cm, lo que equivale a realizar alrededor





**Figura 7. Recámara Dosificadora fabricada en ladrillos, cemento y arena (a); cubierta para reducción de malos olores (b).**

**Figura 8. Flotador fabricado en PVC y utilizado para mantener el nivel de líquido dentro de la recámara dosificadora.**

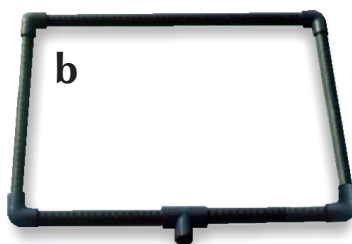


de 124 agujeros que permiten la salida del líquido por el fondo de la recámara (Figura 9b).

Para facilitar una eventual limpieza del marco recolector, se deben ensamblar sus componentes sin utilizar pegante de PVC en las uniones; esto incluye el tapón que tiene el orificio de salida del líquido, ubicado en la parte externa de la recámara. Del marco recolector sólo se fija el tubo que comunica con el exterior, utilizando una mezcla de arena y cemento.

Después de construir la recámara de dosificación se debe establecer el lecho filtrante, ubicando piedras de unos 10cm de diámetro cerca a los orificios de salida, para impedir el contacto entre el material

del lecho y los orificios del marco. Luego se termina de llenar el interior con gravilla de río o con piedra caliza (diámetro: 2,5cm) hasta una altura de 20cm del fondo. Sobre la parte superior del lecho se ubica una malla mosquitera (anjeo en fibra de vidrio, con 1mm de



**Figura 9. Componentes esenciales de la Recámara Dosificadora: a. Tapón de salida perforado; b. Colector de salida; c. Flotador y malla mosquitera.**

distancia entre fibras) cuyos extremos se pisan contra la pared de la recámara con piedras o también bolsas plásticas alargadas llenas de arena (Figura 9c).

## REACTOR METANOGENICO

El reactor metanogénico, RM, está constituido por un tanque cilíndrico negro, referencia Fibratore serie 100027, fabricado en Medellín, Colombia. Está provisto de una tapa sujeta con tornillos y un tubo para la salida del biogás producido en su interior. Tiene 2000 litros de capacidad, una altura de 145cm y diámetro de 140cm (Figura 10). Está fabricado en fibra de vidrio, lo que le da una alta resistencia química a los ácidos presentes en las aguas residuales del lavado acidificadas, alta resistencia a los rayos ultravioleta del sol y resistencia mecánica que lo protege de los impactos. En Cenicafé, Chinchiná, el brillo solar en 1996 fue de 1526,1 horas (7). Durante este período y merced a la coloración negra del RM, se logró durante el día una ganancia térmica entre 7 y 9Kcal/litro, lo que se tradujo en un incremento de la temperatura en el interior del reactor de 23°C (temperatura ambiente) hasta un intervalo

entre 30 y 32°C (temperatura en el interior del reactor). Lo anterior se explica no sólo por la radiación solar, sino por los bajos caudales con que opera el sistema, que favorecen la digestión anaeróbica de este tipo de residuos al aproximarse a su temperatura óptima mesofílica de 36,5°C (15, 25).

En la Figura 11 se pueden observar las tuberías que comunican el reactor metanogénico con el exterior. En la Figura 11a se presenta la tubería de entrada del agua residual, que está provista de una T con tramo de tubería y tapón roscado de PVC de 1½ pulg., el cual se retira para limpiar la tubería en

caso de una obstrucción. En tal caso, se requiere cerrar la válvula ubicada inmediatamente antes de la entrada al reactor. La válvula de paso permite, además, un eventual desalojo del contenido del tanque. La salida del líquido se realiza desde el centro y se canaliza lateralmente a través de una tubería de PVC de 1½ pulg., (Figura 11b). La tapa del reactor está provista de un tubo de PVC de 1/2 pulg., Figura 11c, que permite la salida del biogás producido durante la fase metanogénica de la digestión anaeróbica. Esta tapa tiene un diámetro de 50cm, la cual permite el acceso al interior del tanque.



**Figura 10.**  
Tanque fabricado en fibra de vidrio, utilizado como reactor matanogénico.

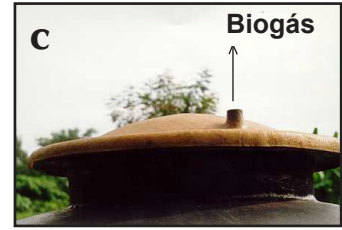


Figura 11. Entrada de agua residual (a); salida de agua tratada (b); salida del biogás (c).

La Figura 12 muestra la estructura interna del reactor metanogénico. La entrada del agua residual se controla por medio de una válvula de paso ubicada en la parte externa, figura 13a, y utilizando en el fondo un marco cuadrado de 65cm de lado, construido en tubería de PVC de 1 pulg., perforado lateralmente con orificios de 5/32 pulg., espaciados a 5cm (figura 13b) y cuñado al fondo con cuatro trozos de guadua que lo aseguran y evitan moverlo durante el llenado del tanque (Figura 13c). La salida del efluente se realiza en forma axial y 7,5cm por debajo del nivel del líquido, utilizando un dispositivo tipo sifón invertido construido en tubería y codos de PVC de 1½ pulg., lo que permite retener los sobrenadantes en el interior del tanque (Figura 14).

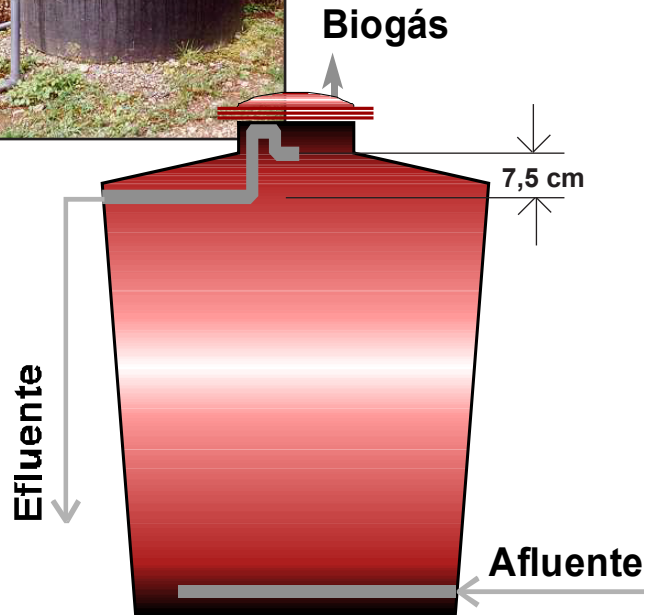


Figura 12. Esquema interior del Reactor Metanogénico.

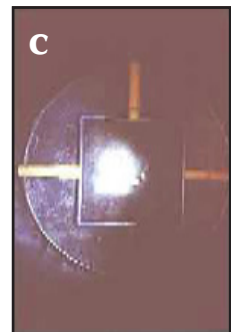


Figura 13. Válvula de paso de agua residual (a); Marco distribuidor de líquido afluente construido en PVC (b); Instalación dentro del reactor metanogénico (c).





**Figura 14.** Dispositivo construido en tubería de PVC para la salida del agua residual tratada (a); ubicación dentro del Reactor Metanogénico (b); tubería de salida (c).

## INOCULACION DEL REACTOR METANOGÉNICO (5 SEMANAS)

A diferencia del Reactor Hidrolítico/Acidogénico, es necesario inocular el reactor metanogénico con bacterias metanogénicas que se obtienen del estiércol de ganado vacuno. Para llevar a cabo la inoculación de esta unidad y durante las primeras tres semanas se realizan los siguientes pasos:

- Prepare 350 litros de inóculo metanogénico así: Mezcle estiércol de ganado vacuno y agua corriente en proporción 1:1 (V/V). La mezcla se almacena en canecas plásticas y se deja reposar durante tres semanas (Figura 15). Filtre luego,

utilizando un costal de fibra plástica (o de fertilizante) o un cedazo de malla mosquitera, similar al utilizado en la recámara dosificadora, con el fin de retirar la mayor cantidad de material grueso e insoluble. Así se deja pasar sólo la fase líquida que se desprende del estiércol y que constituye el inóculo metanogénico.

- Simultáneamente con lo anterior, adicione al reactor metanogénico, 1100 litros de aguas residuales procedentes del tercero y cuarto enjuague del lavado del café en el tanque de fermentación y

1,5kg de soda cáustica. Mezcle bien y espere tres semanas.



**Figura 15.** Preparación del inóculo metanogénico a partir de estiércol de ganado vacuno.

- Adicione al reactor metanogénico 250g de úrea, previamente disuelta en 1 litro de agua limpia, y 300 litros del inóculo. De esta forma el reactor queda inoculado con una proporción aproximada de 3,1kg de sólidos suspendidos volátiles por m<sup>3</sup> de reactor, y una relación cercana a 1,33g DQO/g de sólidos suspendidos volátiles.
- Establezca el medio de soporte para las bacterias metanogénicas, llenando el reactor metanogénico con trozos de guadua de una longitud de 15cm y perforando los nudos que quedan en algunos de los anillos que tiene la guadua, con el fin de permitir el paso del agua residual a través de ellos (Figura 16). Para el SMTA

instalado en Cenicafé, se necesitó un total de 1128 anillos de 9,7cm de diámetro, en promedio, para llenar los 2m<sup>3</sup>. El área específica de contacto calculada fue de 48,2m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> de reactor, con 77,8% de porosidad en el medio empacado (37).

- Adicione agua corriente hasta cubrir totalmente los trozos de guadua.

Terminados los pasos anteriores, el reactor queda inoculado y dos semanas

después se procede a la aclimatación, arranque y operación del SMTA.

Durante las primeras semanas del período de inoculación, al reactor hidrolítico/acidogénico se deben adicionar 7m<sup>3</sup>. de agua corriente mezclados con 250g de úrea y 1m<sup>3</sup>. de aguas residuales procedentes del lavado del café en los tanques de fermentación. Tenga en cuenta que la llave de paso a RD debe estar cerrada hasta la iniciación de la fase de aclimatación.



**Figura 16.** Trozos de guadua para el llenado del Reactor Metanogénico (a); perforación de los nudos de guadua (b); llenado del reactor metanogénico (c).



## ACLIMATACIÓN DEL REACTOR METANOGENICO (3 SEMANAS)

Para iniciar este proceso, se debe abrir la llave de paso instalada a la entrada de la recámara dosificadora e inundarla con el líquido que sale por la válvula de flotador, hasta que alcance su nivel máximo.

- Verifique el asentamiento de la malla mosquitera sobre el lecho de la recámara.
- Calibre el flujo a la salida

del líquido, hasta un valor comprendido entre 500 y 600ml/min y permita el paso del líquido 8 horas diarias durante las siguientes tres semanas. Para hacer la calibración, se hace un orificio en el tapón ubicado en el tubo de salida de la recámara de dosificación con una broca de 7/64 pulg. ó con una lima redonda, que permite ir ampliando el agujero.

- Acople la recámara dosificadora y el reactor metanogénico introduciendo libremente la manguera de polietileno en el tubo de PVC que sale de la recámara (Figura 9a). En este punto la presión es igual a la presión atmosférica. No olvide que el tapón perforado no debe soldarse con pegante de PVC, para que facilite la limpieza, utilizando el mismo líquido que sale de la recámara.

## ARRANQUE DEL REACTOR METANOGENICO (12 SEMANAS)

A partir de este momento se deja permanentemente abierta la llave de paso ubicada antes de la recámara. Se dejan entonces llegar a la unidad RHA todas las aguas que se producen en los cuatro enjuagues del lavado del café y se termina de llenar con agua corriente. Además, se mezclan y adicionan semanalmente 200g de úrea en 1 litro de agua corriente (primer mes), 300g de úrea (segundo mes) y 400g (tercer mes), que se agregan a través de la recámara ubicada a la salida del tanque de fermentación del beneficiadero (Figura 3).

En la adición diaria de agua corriente para llenar el RHA, se debe tener en cuenta que no se debe sobrepasar su capacidad total de almacenamiento. Lo anterior equivale a decir que la adición de agua corriente se realiza sólo durante el arranque y hasta que el volumen total de agua residual que se produce en un día, resulte ligeramente menor o igual a 800 litros, es decir, que equivalen a la cantidad resultante del beneficio de cerca de 900kg de café en cereza.

Hay que tener en cuenta que al lavar el café en el TANQUE TINA, los cuatro enjuagues producen cerca de 0,9 litros de aguas residuales, por cada kilogramo de café en cereza.

El arranque del SMTA se debe realizar durante el período de travesía de café. Durante éste, se recomienda el uso de pHmetro o de cintas para medir el pH con el fin de verificar que a la salida de RM, este parámetro se encuentre con un valor superior a 6 unidades en el líquido efluente.

## OPERACIÓN DEL SMTA

El buen desempeño del reactor metanogénico se manifiesta, de manera práctica, por un olor característico a estiércol vacuno en el líquido que emana de esta unidad, lo cual puede ser una guía para aquellos productores que no disponen de las cintas medidoras de pH. Las siguientes son recomendaciones que se deben tener en cuenta para lograr una alta eficiencia durante la operación de un SMTA:

- Evite acumulación de pulpa y granos dentro de la primera recámara, lo cual podría ocasionar obstrucciones, derrames y olores muy desagradables en los alrededores.
- Revise diariamente el interior y el tapón de salida de la recámara de dosificación durante la cosecha de café, con el fin de garantizar flujo libre y continuo.
- Retire del fondo el tubo interno que sostiene la plastilona del reactor hidrolítico, con el fin de permitir la descarga completa de su contenido y evitar la acumulación de materiales insolubles en su interior. Esto debe realizarse después que pasa la cosecha.

- Acompañe la operación anterior adicionando 2m<sup>3</sup> de agua corriente, para favorecer la salida de insolubles y el enjuague interno de esta unidad.
- Inspeccione y retire los insolubles que quedan retenidos en la malla

mosquitera que se encuentra dentro de la recámara y que impiden el paso de líquido hacia el reactor metanogénico (Figura 17).

- Suspenda el paso del líquido mediante el cierre de la válvula que precede

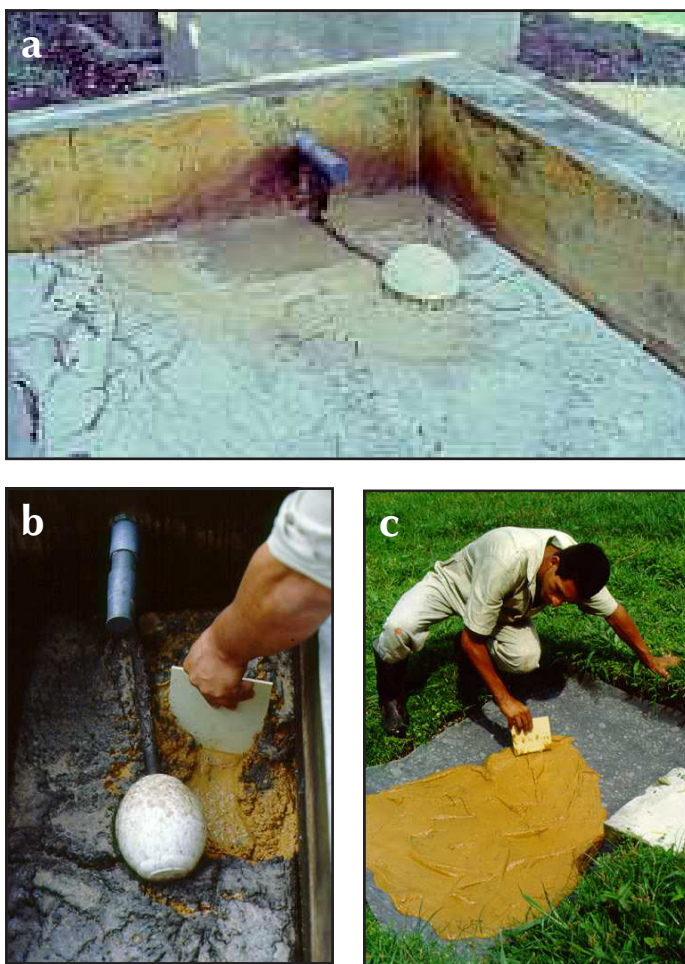


Figura 17. Retención de insolubles dentro de la recámara (a); evacuación del material (b); insolubles retirados previo a la mezcla con pulpa (c).

a la recámara. Espere que descienda el nivel del líquido y que baje el contenido de humedad, lo cual permite retirar la “torta de insolubles” de la malla.

- Mezcle el material insoluble retirado con la pulpa que se encuentra en las fosas de manejo, y utilice esta mezcla en los lombricultivos.
- Retire la malla mosquitera para que se seque y coloque otra malla. La malla seca facilita el desprendimiento por si mismo, del material insoluble adherido.

Después de que el SMTA se estabiliza, no se requiere de ningún producto químico para balancear o neutralizar las aguas residuales. Con sólo observar el aspecto de la corriente líquida que emana del reactor metanogénico, se tendrá

certeza del buen desempeño y eficiencia del sistema (Figura 18). Todos los prototipos de plantas de tratamiento y los SMTA desarrollados en Cenicafé, han permitido remover mas del 80% de la contaminación orgánica presente en las aguas residuales del lavado del café, en términos de la DQO y de la  $DBO_5$  (32, 35, 36, 37, 38).



**Figura 18.** Aspectos del agua residual durante su recorrido por SMTA: a) Reactor Hidrolítico; b) Recámara dosificadora y c) Reactor Metanogénico.

## ACIDIFICACIÓN DEL REACTOR METANOGENICO

Durante la operación del SMTA se pueden presentar períodos de funcionamiento deficiente o “acidificación” del reactor, caracterizados porque el líquido de salida alcanza un valor de pH menor que 5, y desprende un olor a «cebolla picante» o a queso rancio. Entre las causas conocidas más comunes que lo pueden acidificar están:

- Que al RHA esté llegando otro tipo de residuos, tales como detergentes, jabones, insecticidas procedentes del lavado de las máquinas fumigadoras dentro del tanque de fermentación del café. No hay que olvidar que en los tanques de fermentación sólo se debe lavar café.
- Que el flujo de agua residual esté por encima del valor establecido, lo que hace necesario cambiar el tapón por otro con un orificio de diámetro menor que permita ajustar el flujo al caudal de operación de 500 a 600ml/min
- Que se estén adicionando sólo los dos o tres primeros enjuagues del lavado del café y esto ocasiona un incremento en la

concentración de las aguas residuales, lo que se traduce en una sobrecarga orgánica en RM. Hay que tener en cuenta que la tecnología de lavado en los tanques de fermentación se efectúa utilizando cuatro enjuagues que permiten tener una concentración global de 27400 ppm de DQO (concentración de diseño).

- Que se esté beneficiando diariamente una cantidad superior a 1700kg de café en cereza, que corresponden a un día pico del 1,9% de la cosecha anual. Para efectos de cálculo, antes de determinar las características de la construcción de un SMTA, es necesario tener en cuenta si se beneficia café de fincas vecinas con el fin de dimensionar adecuadamente las unidades del sistema.

Cuando la acidificación de RM es leve (pH entre 5 y 5,9 y moderado mal olor), su recuperación se consigue con sólo suspender el paso de las aguas residuales durante 24 horas o también, dejando pasar agua limpia durante este mismo tiempo.

Cuando la acidificación de

RM es crítica (pH entre 4 y 4,9 y un olor picante y rancio fuerte, mal olor), es necesario suspender el flujo del líquido cerrando la válvula de paso instalada antes de RD y luego «lavar los ácidos» pasando lentamente 1m<sup>3</sup> de solución de úrea al 0,1% (disolver 1kg de úrea en 1m<sup>3</sup> de agua corriente), a través de la manguera que comunica la recámara y el reactor metanogénico. Después de esta operación se debe interrumpir el paso de aguas hasta el día siguiente, cuando se verifique que el pH del líquido presenta valores por encima de 6 unidades, momento en el cual se debe restablecer el flujo. Si esto no ocurre, es necesario esperar más tiempo para su recuperación.

Al hacer una estimación teórica a partir de los resultados de las investigaciones realizadas a escala de laboratorio en Cenicafé, se calcula que respecto al SMTA, en un beneficiadero tradicional, donde se consumen entre 40 y 50 litros de agua/kg cps para despulpar, transportar la pulpa, lavar y clasificar el café, se necesitaría aumentar 34 veces más la capacidad de tratamiento. En un beneficiadero con despulpado y transporte de pulpa sin agua y con un

consumo de agua de lavado, entre 20 y 25 litros de agua/kg cps, se necesitaría aumentar 13 veces más la capacidad de tratamiento (29).

Durante la biodigestión anaerobia se presenta una mineralización del nitrógeno y fósforo orgánico, elementos que esta forma son asimilados directamente por las plantas y que hacen posible la utilización de los lodos anaerobios como fertilizantes (14).

En investigaciones realizadas en Cenicafé se ha encontrado en los efluentes del SMTA, una relación N/DQO y  $\text{PO}_4/\text{DQO}$  de 0,18 y 0,013, respectivamente (19) y se observó un excelente desarrollo en plantas cuando el efluente de los SMTA fue utilizado como única fuente de nutrición vegetal, en especies tales como el jacinto acuático o buchón de agua (*Eichhornia crassipes*), el repollito de agua (*Pistia stratiotes*), la enea (*Typha angustifolia*), la

salvinia (*Salvinia auriculata*) y la azolla (*Azolla filiculoides*). De acuerdo con lo anterior, si los efluentes tratados anualmente en un SMTA, se utilizaran dentro del cafetal a manera de un fertilizante fluido, su aplicación sería equivalente a usar 83kg de urea y 4kg de DAP (20).

Las características más importantes de los SMTA desarrollados por Cenicafé son:

- No requieren la adición de reactivos químicos para neutralizar ni para balancear la composición química de las aguas residuales
- El flujo del líquido ocurre por gravedad y no se requieren sistemas de bombeo
- Las aguas residuales a ser tratadas no requieren calentamiento adicional, ya que la coloración negra de sus unidades y la alta concentración de las aguas residuales que originan bajos caudales, permiten que la energía solar incremente la

temperatura desde 23°C hasta 30-32°C

- No consumen energía eléctrica
- Las unidades que conforman el sistema son cerradas lo que permite reducir drásticamente los malos olores
- Su operación se limita a inspección y eventual limpieza de las recámaras. (37).

El efecto erosivo de las aguas efluentes del SMTA, a causa de la descarga del caudal en un sitio específico, equivaldría a la aplicación de una precipitación lluviosa diaria de 0,015mm sobre 5ha de cafetal. Para el cálculo se tomaron para el día pico 750 litros de efluente tratado por día en el SMTA. Dicha “precipitación” resultaría equivalente entre 130 y 325 veces menor que la tasa de evapotranspiración dentro del cafetal, que para las condiciones de Chinchiná, se estima entre 2 y 5mm en días sombreados y soleados, respectivamente.



## POSTRATAMIENTO

Se ha previsto la posibilidad de adicionar un pequeño Filtro Opcional de Postratamiento FOP, como complemento, compuesto por lecho de gravilla y piedra caliza, sembrado con especies vegetales. La función principal de esta unidad adicional, es la de prevenir el impacto ecológico que ocasionarían episodios eventuales de acidificación del RM y la de remover gran parte de la DQO aún remanente en el líquido efluente, presente principalmente en forma de nitrógeno y fósforo mineralizado. El acople del FOP al SMTA, incrementa la eficiencia global del sistema de remoción de contaminación expresada en términos de DQO y equivalente en términos de DBO<sub>5</sub>, desde el 90% (37, 38) hasta 99,6% (32).

Esta unidad se construye realizando una excavación de 5m de longitud, 1m de ancho y 0,5m de profundidad (Figura 19a). El piso del lecho se recubre con plástico para invernadero AGROLENE calibre 5 (Figura 19b), y la salida del líquido se establece a un nivel de 45cm del fondo, lo cual hace que el filtro permanezca inundado hasta 5cm por debajo de la superficie (38).

**Figura 19. Filtro opcional de postratamiento:**  
a) Excavación de tierra;  
b) impermeabilización del fondo con plástico Agrolene calibre 5;  
c) Llenado final del lecho;  
d) salida del



El primer metro del lecho a la entrada del líquido se llena con piedra caliza de 2,5cm de diámetro y los cuatro metros restantes con gravilla de río de 3cm de diámetro (Figura 19c). El líquido sale por el fondo del filtro mediante un codo y un tubo ascendente de PVC de

1 pulg.. Estos no deben estar soldados, para facilitar la inclinación del tubo de salida para controlar el nivel del líquido dentro del lecho (Figura 19d).

En el lecho se siembran plantas de *Typha angustifolia*, en cuadro, a una distancia

de 30cm entre plantas (Figura 20). Este material vegetal se conoce como “Enea” y ha sido utilizado en sistemas GBH (gravel bed hydroponics) para el tratamiento de aguas residuales domésticas tal como el instalado en la Fundación Manuel Mejía ubicada en la zona rural del municipio de Chinchiná (11).

Las evaluaciones realizadas sobre esta unidad durante el segundo semestre de 1998 (32), mostraron en promedio una remoción neta de la DQO del 80,4%, equivalente en términos de la  $DBO_5$ . Al final, el líquido presentó valores de DQO de 110ppm, 90ppm de  $DBO_5$  y pH de 7,70 unidades. Durante este mismo período se evaluó la remoción de coliformes presentes en el líquido que entra al FOP, encontrándose valores del 99,4% y del 99% para coliformes totales y fecales, respectivamente. A pesar de las altas eficiencias alcanzadas integrando el SMTA y el FOP, el agua que sale finalmente de tratamiento no es apta para consumo humano.



Figura 20. *Typha Angustifolia* sembrada en el lecho del filtro a) Raíces y parte del tallo; b) Distancia de siembra, 30cm entre plantas; c) Filtro opcional de postratamiento ya establecido.

## COSTOS

En 1984 cuando se iniciaron en Cenicafé las investigaciones relacionadas con el tratamiento anaerobio de las aguas residuales de beneficio húmedo de café, remover un kilogramo de DQO costaba entre US\$ 0,50 y 0,60 dólares americanos y se calculaba un costo de la inversión, cercano a los US\$ 13,70/@ de cps, para tratar la contaminación generada por las aguas residuales producidas en el beneficio húmedo convencional (8): aguas residuales del despulpado y transporte de pulpa (53,1%) y aguas residuales de lavado del café

(46,9%) (28, 34, 41). Para tratar la contaminación producida por las aguas residuales del lavado del café utilizando el SMTA, se calculó en US\$ 0,019 costo de remover un kilogramo de DQO (32).

En la Tabla 1 se presentan los costos a febrero de 1999, de cada uno de los componentes del SMTA y del FOP, calculados para un cambio de \$ 1550 pesos colombianos, por US\$ 1,00. A partir de esta tabla se puede calcular para el SMTA un costo de la inversión de US\$ 0,73/@ cps.



**Tabla 1.** Costos de la inversión para construcción de un Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio SMTA y de su Filtro Opcional de Postratamiento FOP, para una finca con una producción anual de 1500@ cps. Febrero de 1999. US\$ 1,00 = col \$ 1550,00.

	\$ Col	US\$
<b>REACTOR HIDROLÍTICO/ACIDOGENICO</b>		
Plastilona IKL-500 (incluye 16% IVA)	508.327	328
Tubería y accesorios	46.810	30
Mano de Obra (2 jornales)	20.000	13
<b>Subtotal</b>	<b>575.137</b>	<b>371</b>
<b>RECÁMARA DOSIFICADORA</b>		
Materiales de construcción	128.228	83
Mano de Obra (3 jornales)	30.000	19
<b>Subtotal</b>	<b>158.228</b>	<b>102</b>
<b>REACTOR METANOGENICO</b>		
Tanque Fibratore		
Serie 100027 (incluye 16% IVA)	845.640	546
Tubería y Accesorios	82.950	53
Mano de Obra (3 jornales)	30.000	19
<b>Subtotal</b>	<b>958.590</b>	<b>618</b>
<b>COSTO TOTAL SMTA</b>	<b>1'691.955</b>	<b>1.091</b>
<b>FOP</b>		
Materiales de construcción	73.570	48
Mano de obra	50.000	32
<b>Subtotal</b>	<b>123.570</b>	<b>80</b>
<b>COSTO TOTAL SMTA + FOP</b>	<b>col \$ 1'815.525</b>	<b>US\$ 1.171</b>

La diferencia entre los costos de instalación de RM y RHA se ha originado en los materiales de construcción más resistentes que requiere RM (unidad más sensible) y que permiten brindar más	protección de su componente interior, donde se hace necesario establecer el medio de soporte de los microorganismos y fomentar el crecimiento y desarrollo de bacterias metanogénicas,	responsables de la última etapa de la biodegradación anaerobia.  Se ha calculado que el costo del RHA instalado en Cenicafé ha variado durante
--	--	--

tres años así: US\$ 28/m<sup>3</sup> en 1996, US\$ 38/m<sup>3</sup> en 1998 y US\$ 46/m<sup>3</sup> en 1999. En SMTA instalados en fincas con producciones anuales superiores a las 1500@ de cps, se espera tener una reducción en el costo del RHA, dado que su costo unitario desciende a medida que se aumenta la capacidad instalada, estimada en US\$ 19/m<sup>3</sup> para un RHA de 31m<sup>3</sup> y US\$ 13/m<sup>3</sup> para un RHA de 100m<sup>3</sup>.

En 1998 el costo de la inversión del FOP de Cenicafé, se calculó en US\$ 60,00 y representaba un incremento de solo 8% sobre el costo de la inversión del SMTA. Como se observa en la Tabla 1, a febrero de 1999 el costo del FOP se estima en US\$ 80 lo que representa un incremento respecto al dólar del 33% en solo un año. El costo de remover un kilogramo de DQO en esta unidad oscilaba alrededor de US\$ 0,028 (32).

De la Tabla 1 se puede concluir que el costo de la inversión para instalar un SMTA más un FOP, corresponde a un total de US\$ 0,78/@ cps, esperando una vida útil de 20 años, estimada a partir de las características de fabricación dadas para el RHA y el RM.

Se han registrado sistemas de tratamiento de aguas residuales en centrales de beneficio que procesan 150000 @ cps/año, donde se puede calcular un costo de la inversión de US\$ 0,71/@ cps, similares a los estimados para un SMTA durante 1999, y costos operativos (energía eléctrica, soda para neutralizar los residuos) de US\$ 0,16/@ cps (26, 31). En los SMTA los costos operativos se asumen despreciables, porque sólo requieren de inspección y retiro de insolubles de la RD con el fin de garantizar el flujo libre. La sola posibilidad que brindan los SMTA de operar sin neutralizar las aguas residuales del lavado, permite calcular una economía en NaOH tipo industrial de US\$ 5,6 millones, por cada 10 millones de sacos de 60 kilogramos de café verde que se produzcan en Colombia. Si se asume para cualquier país esa misma producción anual cafetera y se consideraran sistemas de tratamiento que contemplen costos operativos y de inversión iguales a los mencionados anteriormente, se podría calcular para los próximos 20 años un costo total del tratamiento de las aguas residuales de café en 229 millones de dólares, donde el 82% corresponde-

rían a los costos de operación y solo el 18% a los costos de la inversión.

Teóricamente el SMTA permite el tratamiento de los lixiviados que se desprenden de la mezcla pulpa-mucílago, subproducto de los módulos BECOLSUB. Actualmente Cenicafé estudia la realización de ajustes correspondientes al diseño y operación de las fosas de descomposición de pulpa (5, 6, 32), y ajustes en el diseño y operación de los SMTA, originados en la alta concentración (DQO:100000-120000 ppm) y nuevas características fisicoquímicas de estos residuos.

A partir de lo anterior, se espera que el SMTA descrito en esta publicación, permita el tratamiento de los lixiviados que se producen en fincas, con producciones anuales muy superiores a 1500 arrobas de café pergamino seco, aumentando sustancialmente su cobertura y reduciendo significativamente el costo de la inversión (32). A esto debe sumarse que si se requiere un SMTA con componentes de mayor capacidad, la economía a escala jugaría otro papel importante en la reducción de costos.

# RECONOCIMIENTOS

Las siguientes personas colaboraron en Cenicafé con las investigaciones realizadas en los laboratorios, relacionadas con el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del beneficio húmedo del café, y con el diseño y puesta en marcha de los primeros prototipos de plantas de tratamiento que se propusieron para fincas cafeteras, las cuales fueron base fundamental para el desarrollo de la tecnología SMTA.

Jaime Zuluaga Vasco (Químico, PhD), Mario Antonio Franco Jiménez (Ingeniero Industrial), Rubén Elías Castellanos (Ingeniero Químico), Luz Patricia Quevedo (Química), Germán Castro (Ingeniero Químico), Héctor Fernando Franco (Tecnólogo Químico), Claudia Marcela Pérez (Bacterióloga), Gloria Inés Puerta Quintero (Ingeniera Química)

L. Cassell and C. I. Winstanley (UMIST), Andrew D. Wheatley (Cranfield Institute of Technology) G. P. Cookman (Terry L.Wiles and Associates Ltd).

# AGRADECIMIENTOS

A Juanita Cárdenas C. estudiante de ingeniería de producción Agroindustrial de la Universidad de la Sabana, por la actualización de los costos de la inversión para construcción de un SMTA.

A los ex-auxiliares Francisco Javier Cardona Marín y Carlos Mario Parra Londoño, a los auxiliares Eliécer de Jesús Restrepo, Héctor Gerardo Jiménez Cruz y Huberney Grajales Salazar.

# LITERATURA CITADA

1. AIVASIDIS, A.; HILLA, E.; WANDREY. Single- and separated-phase anaerobic treatment of distillery slops in fixed bed loop reactors. *In: International Symposium on Anaerobic Digestion*, 5. Bologna, May 1988. Poster-Paper. p. 437.
2. ÁLVAREZ G., J. Despulpado de café sin agua. *Avances Técnicos Cenicafé* No 164: 1-6. 1991.
3. BLANDÓN C., G. Caracterización microbiológica cualitativa de la flora presente en el lombricompost. Manizales, Universidad Católica, 1996. 142p (Tesis: Bacteriólogo y Laboratorista Clínico).
4. CALLE V., H. Subproductos del café. Chinchiná, Cenicafé, 1977. 84 p. (Boletín Técnico N° 6).
5. CÁRDENAS C., J.. Evaluación preliminar de una estrategia para la reducción de los lixiviados del BECOLSUB. Santafé de Bogotá, Universidad de la Sabana. Facultad de Ingeniería, 1998. 76p. (Práctica: Ingeniería Producción Agroindustrial).
6. CÁRDENAS C., J. Estrategias para reducir o eliminar la contaminación y costos de tratamiento de los lixiviados producidos por la tecnología BECOLSUB. Santafé de Bogotá, Universidad de la Sabana. Facultad de Ingeniería, 1999. (Tesis en ejecución: Ingeniería Producción Agroindustrial).
7. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ.  
Cenicafé. Anuario meteorológico cafetero 1996. Chinchiná. Cenicafé, 1997. 480 p.
8. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ.  
Cenicafé. DISCIPLINA QUÍMICA INDUSTRIAL.  
Biodigestión anaerobia de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café. Chinchiná, Cenicafé. 1984-1992. (Proyecto QI-01).
9. CHAVADEJ, S. Two stage anaerobic process for biogas production and organic removal. *In: International Symposium on Anaerobic Digestion*, 5. Bologna. May 1988. Poster-Paper. p. 485.
10. ELÍAS, L. G. Composición química de la pulpa de café y otros subproductos. *In: Braham, J. E. and Bressani, R. Pulpa de café. Composición, Tecnología y Utilización.* Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá. CIID. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo. 1978. 152 p.
11. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA.  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ,  
Cenicafé, Disciplina Química Industrial. Contrato 082 de Cooperación Institucional Consejo Británico-FEDERACAFÉ. Chinchiná. 1994.

12. GONZALEZ F., R.; PALMA R., M. I. Algunos cambios químicos que sufren las aguas residuales del beneficio del café por almacenamiento. Santafé de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Farmacia, 1989. 134 p. (Tesis: Químico Farmacéutico).
13. GTZ. Biogas – Digester types. INTERNET. 1996.( [http://gate.gtz.de/isat/at\\_info/biogas/appldev/appldev.html](http://gate.gtz.de/isat/at_info/biogas/appldev/appldev.html) )
14. KIM H., L.. Integrated systems for treating and utilizing plantation effluents: palm oil mill effluent as a specific example. *In: International Symposium on Anaerobic Digestion*, 5. Bologna. May 1988. Conferences. p. 303.
15. LEQUERICA, J.L.; FLORS, A.; MANDARRO, A.; VALLÉS, S. Producción de metano por fermentación anaerobia. II. Cinética del proceso. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos* 20(3):327-346. 1980.
16. LONDOÑO S., R. J. DEL P.; HERNÁNDEZ R., H. Análisis químico de algunos de los principales componentes de las aguas residuales del beneficio del café. Santafé de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Farmacia, 1988. 152 p. (Tesis: Químico Farmacéutico).
17. MINISTERIO DE SALUD SANTAFE DE BOGOTA. Decreto número 1594 de 1984. Santafé de Bogotá, Ministerio, 1984. 48p.
18. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE SANTAFE DE BOGOTA. Decreto número 901 de 1997. Santafé de Bogotá. Ministerio, 1997. 9p.
19. RODRÍGUEZ V., N. Estudios de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales de café. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial, Octubre 1995 - Septiembre 1996, Chinchiná, Cenicafé, 1996. 145 p.*
20. RODRÍGUEZ V., N. Estudios de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales de café. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial, Octubre 1996 - Septiembre 1997, Chinchiná, Cenicafé, 1997. 95 p.*
21. RODRÍGUEZ V., N. La medida de la contaminación del agua. *In: Curso Taller sobre el Pago de Tasas Retributivas por Contaminación Producida en los Beneficiaderos de Café. CENICAFE, Chinchiná. 1997. p 1-13.*
22. SCHWITZGUEBEL, J. P.; PERINGER. Biogas production from cheese whey in a two-stage plant. *In: International Symposium on Anaerobic Digestion*, 5. Bologna. May 1988. Poster-Paper. p. 579.
23. STAFFORD, D.A.; HAWKES, D.L.; HORTON, R. Methane Production from Waste Organic Matter. 2. ed. Boca Ratón, CRC Press, 1980. 285 p.

24. URIBE, A.; LAVERDE, B. Distribución anual de la cosecha de café. Avances Técnicos Cenicafé No 16:1-4.1972.
25. VALLÉS, S.; FLORS, A.; LEQUERICA, J.L.; MANDARRO, A. Producción de metano por fermentación anaerobia. I. Descripción del proceso. Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos 20(2):189-208. 1980.
26. VAZQUEZ M., R.. El beneficiado ecológico del café. In: Simposio Latinoamericano de Caficultura, 18, San José, Septiembre 16 - 18, 1997. Memorias. San José, CICAFAE / ICAFE. p. 51-64.
27. VITURTIA, A. MTZ; MATA A., J.; CECCHI, F.; TRAVERSO, P. G.. Description of a two phase fermentation system for the anaerobic digestion of municipal organic wastes. In: International Symposium on Anaerobic Digestion. Bologna, May 1988. Poster-Paper. p. 809.
28. ZAMBRANO F., D. A. Estudios de laboratorio: caracterización de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial, Octubre 1988 - Septiembre 1989, Chinchiná, Cenicafé, 1989. 22 p.
29. ZAMBRANO F., D. A. Estudios de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales de café. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial, Octubre 1989 - Septiembre 1990, Chinchiná, Cenicafé, 1990. 51 p.
30. ZAMBRANO F., D. A. Estudios de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales de café. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial, Octubre 1991 - Septiembre 1992, Chinchiná, Cenicafé, 1992. 62 p.
31. ZAMBRANO F., D. A.. Manejo de subproductos en centrales de beneficio de café en Costa Rica: impresiones de una visita técnica. Chinchiná, CENICAFE, 1996. (Seminario científico presentado el 23 de febrero de 1996).
32. ZAMBRANO F., D. A.. Prototipos de plantas de tratamiento de aguas residuales del lavado del café. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial, Octubre 1997 - Septiembre 1998, Chinchiná, Cenicafé, 1998. 41 p.
33. ZAMBRANO F., D. A., ISAZA H, J. D.. Lavado de café en los tanques de fermentación. Cenicafé 45(3): 106-118. 1994.
34. ZAMBRANO F., D. A., ZULUAGA V., J.. Contribución al estudio de los residuos del proceso de beneficio húmedo de café. In: Reunión del Grupo de Proceso y Control de Calidad de Café, 6. Bucaramanga, FEDERACAFE 1989.

35. ZAMBRANO F., D. A.. Diseño y evaluación de un sistema prototipo utilizable a nivel de finca para el tratamiento de aguas residuales del lavado del café por biodigestión anaerobia. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial, Octubre 1994 - Septiembre 1995, Chinchiná, Cenicafé, 1995. 83 p.
36. ZAMBRANO F., D. A.. Prototipos de plantas de tratamiento de aguas residuales del lavado del café. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial, Octubre 1993 - Septiembre 1994, Chinchiná, Cenicafé, 1994. 71 p.
37. ZAMBRANO F., D. A.. Prototipos de plantas de tratamiento de aguas residuales del lavado del café. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial, Octubre 1995 - Septiembre 1996, Chinchiná, Cenicafé, 1996. 54 p.
38. ZAMBRANO F., D. A.. Prototipos de plantas de tratamiento de aguas residuales del lavado del café. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial, Octubre 1996 - Septiembre 1997, Chinchiná, Cenicafé, 1997. 19 p.
39. ZAMBRANO F., D.A. Fermente y lave su café en el tanque tina. Avances Técnicos Cenicafé No 197: 1-8, 1993.
40. ZAMBRANO F., D.A.; ISAZA H., J.D.; FRANCO J.,M.; ZULUAGA V., J. Lavado de café en un tanque fermentador piloto. *In*: Seminario Internacional sobre Biotecnología en la industria cafetera, 2. Manizales, 4-7 de Noviembre 1991. Poster.
41. ZAMBRANO F., D.A.; ZULUAGA V., J.; FRANCO J.,M.. Balance de los residuos en un proceso de beneficio húmedo de café. *In*: Seminario Internacional sobre Biotecnología en la Agroindustria Cafetera, 2. Manizales, 4-7 de Noviembre 1991. Poster.