

Manejo y disposición de los subproductos y de las aguas residuales del beneficio del café

Nelson Rodríguez Valencia; Diego Antonio Zambrano Franco;
César Augusto Ramírez Gómez

En el proceso del café se estima que menos del 5% de la materia vegetal generada se aprovecha en la elaboración de la bebida, el resto queda en forma residual, representado en materiales fibrosos como hojas, ramas y tallos, generados en el proceso de renovación de los cafetales; frutos verdes que se caen durante la recolección o que se retiran de la masa de café recolectado; pulpa y mucílago producidos en el proceso de beneficio del fruto; la cascarilla generada en la etapa de trilla, y la borra o ripio que se genera en las fábricas de producción de café soluble y cuando se prepara la bebida a partir del grano tostado y molido.

Todo este material vegetal, si no se maneja y dispone de forma apropiada, se convierte en fuente de contaminación de los recursos naturales presentes en la zona cafetera.

Cenicafé, ha investigado diferentes prácticas y procesos para el manejo, tratamiento y valorización de estos residuos, de forma que se logre evitar impactos ambientales adversos en el ecosistema cafetero, y que se puedan generar, a partir de estos residuos, procesos de producción limpia que le permiten a los productores alcanzar la certificación de sus fincas y comercializar su café con un valor agregado.



Cómo Citar:

Rodríguez-Valencia, N., Zambrano Franco, D. A., & Ramírez, C. A. (2013). Manejo y disposición de los subproductos y de las aguas residuales del beneficio del café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 3, pp. 111–136). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_31

Generalidades

La oferta hídrica *per cápita* accesible, en nuestro país, se está viendo influenciada por el fenómeno del calentamiento global, por el crecimiento en la demanda en zonas con déficit hídrico y por acciones antropogénicas como la deforestación, el cambio en el uso del suelo y los vertidos de contaminantes a las fuentes de agua, lo que hace que se presenten dificultades en la disponibilidad espacial y temporal del agua superficial a nivel regional y local. La actividad agrícola contribuye a cambiar directamente la oferta hídrica de una zona, cuando vierte directamente las aguas residuales del proceso productivo a las fuentes de agua, o indirectamente a través de las emisiones de gases con efecto invernadero (Básicamente óxidos de carbono, nitrógeno y metano), provenientes de la descomposición aeróbica o anaeróbica de la materia orgánica constitutiva de los residuos de la cosecha.

La caficultura, hasta hace menos de 20 años, no estuvo exenta de generar estos impactos negativos al medio ambiente. En el proceso del beneficio del café se utilizaban más de 40 L de agua para producir 1,0 kg de café pergamino seco, y el agua residual generada era vertida sobre las fuentes de agua, afectando su disponibilidad para el uso posterior del recurso y acabando con la vida acuática presente en los cuerpos de agua.

De igual manera, la pulpa de café era arrojada a las quebradas o dispuesta a campo abierto para que sufriera los procesos naturales de descomposición, generando un cambio en el pH del suelo y una descompensación de nutrimentos en el mismo, a la vez que se convertía en potencial contaminante de las aguas superficiales, cuando las lluvias lixiviaban parte de sus componentes, ante lo cual se determinó la necesidad de la valorización de los subproductos del café (Figura 1), como materias primas para la elaboración de nuevos productos.

En las décadas de 1950 a 1970, en Cenicafé se realizaron investigaciones tendientes a valorizar los subproductos del café, entre las que se encuentran la utilización de la pulpa y el mucílago de café para: La producción de levaduras alimenticias (Calle, 1951), alcohol (Calle, 1951), colorantes (Calle, 1955), biogás (Calle, 1955; Calle, 1974), abono orgánico (López y Calle, 1956; Parra y Calle, 1967), aceites (Calle, 1960), pectinas (Calle, 1962), miel de café (Valencia y Calle, 1968), alimentos para animales (Buitrago *et al.*, 1970) y baterías eléctricas (Calle, 1973; Calle 1977).

Sin embargo, aspectos como el tipo de beneficio utilizado en la época, uso de agua en el proceso de despulpado y fermentación natural del mucílago, la alta dispersión en la generación de los subproductos y las bajas cantidades de subproductos por hectárea, no favorecieron la adopción de los resultados de las investigaciones.



Figura 1.

Subproductos del café.

A partir de 1984 y hasta la fecha, las investigaciones de Cenicafé se intensificaron en el manejo integral del agua utilizada en el proceso de beneficio, lo que involucró el diagnóstico de la contaminación generada en el proceso (Zambrano y Zuluaga, 1993; Zuluaga y Zambrano, 1993), el balance de materia en términos de contaminación orgánica, en el proceso de beneficio húmedo del café, la racionalización del agua limpia utilizada en el proceso (Álvarez, 1991; Zambrano, 1993, Roa *et al.*, 1999), el tratamiento primario, secundario (Zambrano *et al.*, 1999; 2006; 2010) y postratamiento de las aguas residuales generadas (Rodríguez, 2009) y la utilización integral de los subproductos para generar productos de valor agregado (Dávila y Ramírez, 1996; Rodríguez y Jaramillo, 2005).

Modelo integral de manejo del agua en el beneficio del café

El café colombiano lleva implícita una característica de calidad, que se asocia al proceso húmedo de los frutos, donde inevitablemente se requiere de la utilización de agua, que lo enmarca dentro de la categoría conocida como “**café suaves lavados**”.



Bajo este aspecto es indudable pensar que, si se requiere del agua para beneficiar el fruto de café y transformarlo en café pergamino seco, el uso de la misma se debe asumir con responsabilidad ambiental, lo cual se logra adoptando tecnologías que enmarquen el producto dentro de un sistema productivo amigable con la naturaleza.

En este orden de ideas:

- **El despulpado y transporte de la pulpa sin agua a fosas techadas, indudablemente se constituye en la acción ambiental preventiva más importante**, ya que esta sola práctica evita que el 72% de la contaminación potencial de los subproductos del beneficio húmedo del café llegue a las fuentes hídricas a través de la pulpa, perdiéndose la posibilidad de transformarla y darle valor agregado.
- **El 28% restante de la contaminación la genera el mucílago, y su disposición se orienta hacia el tratamiento utilizando Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (SMTA)**, en pequeñas y medianas fincas cafeteras, que remueven el mucílago por fermentación natural y utilizan el tanque tina para lavar el grano, con consumos de agua entre 4 y 5 L.kg⁻¹ de c.p.s (Zambrano et al., 2010); **esta práctica deberá acompañarse con un postratamiento**, que permita atenuar el impacto ambiental sobre los organismos acuáticos e incrementar las eficiencias de remoción de la contaminación orgánica del agua residual (Rodríguez, 2009), desde 80% con sólo SMTA, hasta cerca del 95% utilizando humedales artificiales con macrófitas acuáticas.
- **Para productores cafeteros grandes que utilizan el desmucilaginado mecánico y la mezcla del mucílago con la pulpa, se hace necesaria la utilización de los Sistemas de Tratamiento Primario para Lixiviados provenientes del Becolsub (STLB)** (Zambrano y Cárdenas, 2000), que permiten disminuir la carga orgánica de las aguas residuales hasta valores que permitan su tratamiento posterior, utilizando el SMTA como tratamiento secundario (Zambrano, 2006), y un postratamiento en serie con macrófitas acuáticas en humedales artificiales (Rodríguez, 2009).

Modelo integral de manejo de los subproductos

Este modelo involucra la utilización de la pulpa de café para la producción de etanol, la utilización de la pulpa residual para el cultivo de hongos comestibles y la utilización de la pulpa residual del cultivo de los hongos para la producción de abono orgánico. Las vinazas generadas en el proceso de obtención de etanol se tratan por digestión anaerobia para producir biogás.

De esta forma, a partir de los subproductos del café se puede generar energía renovable (Bioetanol y biogás), alimentos para consumo humano (Hongos), alimento para consumo animal (Lombrices) y abono orgánico, en forma secuencial y en armonía con el ecosistema cafetero.

Subproductos del proceso de la trilla, como es el caso del cisco de café, tiene su utilización como combustible directo en el secado mecánico del café, al igual que los

tallos del café provenientes del proceso de renovación de los cafetales. De igual forma, estos materiales pueden utilizarse para la producción de hongos comestibles y medicinales, y sus subproductos siguen manteniendo el valor energético como combustible.

Consideraciones prácticas

La producción de café con un mínimo de residuos es una práctica que puede ser utilizada por las más de 560.000 familias productoras del grano. Dependiendo del tamaño de sus fincas, algunos productores podrán hacer un aprovechamiento más integral de los subproductos, pero en todos los casos, la meta de minimizar los residuos puede ser alcanzada. En términos generales, los pequeños productores cafeteros con menos de media hectárea en café, que representan el 64% de los caficultores colombianos, pueden utilizar la pulpa de café para la producción de abono orgánico, los productores medianos la pueden utilizar para la producción de hongos comestibles y el residuo de este proceso, lo pueden emplear para la producción de abono orgánico, y finalmente los grandes productores pueden obtener bioetanol, biogás, hongos comestibles y abonos orgánicos, de manera secuencial.

De igual manera sucede con el manejo de las aguas residuales que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del fruto del café, que son biodegradables, pero poseen características fisicoquímicas particularmente agresivas con el medio ambiente: pH bajo, acidez alta, concentración de materia orgánica alta, que corresponde a poderes contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas. **Los pequeños productores pueden tratar sus aguas en un SMTA, los medianos requieren de un SMTA y un lecho de postratamiento, y en las fincas grandes cafeteras que mezclen la pulpa con el mucílago, se pueden instalar sistemas STLB, seguidos de un SMTA y de un lecho de postratamiento.**

Contaminación generada en el proceso convencional de beneficio húmedo de café

El beneficio convencional es el proceso que tradicionalmente se ha utilizado en Colombia para transformar el fruto en café pergamino, en el cual se utiliza agua en las etapas de despulpado y de lavado, con un consumo global cercano a los 40 L de agua por cada kilogramo de café pergamino seco obtenido.

En los esquemas convencionales de los procesos agrícolas e industriales, es común encontrar en algunos casos, un uso irracional y desmedido del agua, lo que ocasiona problemas ambientales que se llegan a tornar graves, como es el caso del beneficio convencional de café. En todos los procesos en los que se hace necesario utilizar agua para obtener los productos que se van a comercializar, es preciso generar estrategias para el uso eficiente de la misma y para el manejo apropiado de las aguas residuales que se generan, de forma que los efluentes o aguas de salida del proceso no impacten negativamente el ecosistema.

En 1984, en Cenicafé, se inició con la búsqueda del desarrollo o adaptación de una tecnología a nivel de finca cafetera, para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de beneficio, que cumpliera con la legislación ambiental vigente en el decreto 1594 de 1984.

Una de las primeras etapas fue **la elaboración de un diagnóstico de contaminación en el proceso de beneficio del café**, con el fin de generar el planteamiento de soluciones racionales, considerando la utilización de agua en el proceso, la calidad del café obtenido, el costo de la infraestructura física, el uso o disposición de subproductos y el control de la contaminación generada.

Diagnóstico de contaminación del proceso de beneficio húmedo del café

En el proceso convencional de beneficio se utilizan entre 40 y 50 L de agua por kilogramo de café pergamino seco, cantidades de agua limpia que terminan siendo contaminadas en los beneficiaderos.

- **En estudios de Cenicafé se encontró que la pulpa de café representa el 73,7% de la contaminación potencial de los subproductos del beneficio, y llega a perder cerca de la mitad de su equivalente en peso seco, durante el despulpado de los frutos con agua y el transporte hidráulico hasta las fosas de**

descomposición, generando graves problemas de contaminación hídrica (Zambrano e Isaza, 1998).

- **El 26,3% restante de la contaminación la constituye el mucílago fermentado**, cuya fracción soluble representa el 80% de la misma, por lo cual es necesario disponer adecuadamente o tratar este residuo con sistemas de tratamiento biológico (Zambrano y Zuluaga, 1993).
- En un día normal, un recolector de café puede cosechar 100 kg de café en cereza, de los cuales se desprenden pulpa y mucílago durante su beneficio húmedo, con un potencial contaminante 115 veces superior a la excretas y la orina producidas por un ser humano, en ese mismo día.
- **Las aguas residuales** que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del fruto del café son todas biodegradables, pero **poseen una acidez alta, concentraciones de materia orgánica alta, sólidos suspendidos conformados particularmente por pectina y protopectinas, demandas biológicas y químicas de oxígeno muy altas**, del orden de 15.000 a 30.000 ppm en las aguas mieles, y entre 60.000 y 120.000 ppm en los lixiviados generados en la mezcla pulpa-mucílago, lo que corresponde a poderes contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas (Zambrano y Rodríguez, 2008).

La demanda química de oxígeno, conocida como DQO, es una medida indirecta de la contaminación orgánica presente en el agua. Con esta determinación se mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica (tanto biodegradable como no biodegradable). Entre mayor sea el valor de la DQO y DBO, mayor es la contaminación orgánica presente en el agua.

La demanda biológica de oxígeno, conocida como DBO, es una medida indirecta de la contaminación orgánica presente en el agua. Con esta determinación se mide la cantidad de oxígeno necesario que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica, lo que permite evaluar la MO biodegradable presente en el agua.

Racionalización del agua en el proceso de beneficio húmedo del café

La factibilidad técnico económica para la implementación de sistemas de tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café, depende en gran medida de la simplicidad y confiabilidad del sistema, así como del volumen y carga orgánica del residuo a tratar. En consecuencia, la no utilización de agua para transportar pulpa y la racionalización del consumo de agua en la operación de lavado, permiten reducir la contaminación y el volumen de agua que es necesario tratar.

Para beneficiar el café en Colombia por métodos convencionales, se requieren entre 40 y 50 L.kg⁻¹ de c.p.s, de los cuales la mitad se utiliza en el despulpado, el transporte hidráulico de la pulpa a las fosas y el transporte de café en baba a los tanques de fermentación. Los canalones de correteo típicos en Colombia para la clasificación y el lavado del café tienen consumos de agua entre 20 y 25 L.kg⁻¹ c.p.s.

Consideraciones prácticas

Despulsar en seco el fruto de café elimina de raíz el consumo del agua en esta etapa y conserva la materia orgánica aprovechable de la pulpa.



Figura 2.

Tanque tina para el lavado del café.

Cuando la eliminación del mucílago se realiza por fermentación natural del café en baba, transportado al tanque de fermentación, sin agua, el uso eficiente y racional del agua durante el lavado del café permite reducir el 80% del consumo de la misma frente al lavado convencional (Zambrano e Isaza, 1994).

Para efectuar dicho control se implementó la práctica de realizar cuatro enjuagues para lavar el café dentro de los tanques de fermentación, a los cuales se les

redondearon las aristas, con el fin de optimizar el método y la infraestructura (Figura 2), denominada por los usuarios cafeteros **tanque tina** (Zambrano, 1993). Con ella, el consumo de agua promedio en esta etapa se reduce a 4,13 L.kg⁻¹ de c.p.s. (Zambrano e Isaza, 1994).

Una vez retirado el mucílago fermentado del café con este lavado, se obtienen **las mieles o aguas residuales del lavado del café, las cuales por su característica de alta concentración de contaminación orgánica soluble (25 g.L⁻¹) se hace necesario tratarlas mediante la digestión anaerobia**, la cual consiste en una fermentación en ausencia de oxígeno, realizada por varios tipos de microorganismos, entre los que se destacan las bacterias metanogénicas, que utilizan los ácidos como sustrato para producir el gas metano.

El potencial de usuarios de la tecnología tanque tina sobrepasa el medio millón de UPAs (Unidades Productoras Agrícolas), que corresponden en más del 90% a pequeños productores de café. En el año 2004, Cenicafe apoyó la transferencia de la tecnología del lavado en tanque tina a 574 productores de café orgánico de la Sierra Nevada de Santa Marta, zona que tiene una producción anual cafetera estimada de 2.821.641 kg de c.p.s. (0,38% de la cosecha nacional), lo que representa una economía de agua por el uso de tanque tina para estas pequeñas fincas cafeteras, del orden de 56,4 millones de litros de agua limpia, que permiten suplir las necesidades diarias de agua en una ciudad de 378 mil habitantes, o para las necesidades anuales de una población de 1.000 habitantes.

De la misma necesidad de reducir la contaminación en el proceso de beneficio y el consumo de agua para lavar el café, nació **la tecnología Becolsub (Beneficio Ecológico del café y aprovechamiento de Subproductos)**, la cual utiliza menos de 1 L de agua para obtener un kilogramo de c.p.s. (Roa et al., 1999).

Esta tecnología involucra la utilización de una máquina desmucilagadora y lavadora mecánica, que mezcla en una de sus salidas la pulpa y el mucílago concentrado que se desprende del café en baba, mezcla que en las siguientes horas drena un lixiviado, cuya contaminación global equivale a la mitad de la contaminación que produce el mucílago fermentado y que requiere de un tratamiento anaerobio.

En la Figura 3 se muestra una comparación entre el beneficio convencional de café, que utiliza consumos superiores a 40 L de agua para obtener 1,0 kg de café pergamino seco, que genera una contaminación cercana a 115 g DQO por kilogramo de fruto y el beneficio ecológico con Becolsub y tanque tina, que utiliza entre 0,4 y 5,0 L.kg⁻¹ de c.p.s., respectivamente, y genera una contaminación entre 10,6 y 30,0 g DQO por kilogramo de fruto.

Tratamiento de aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café

Las investigaciones en Cenicafé involucraron estudios a escala de laboratorio, planta piloto y campo.

En los estudios de laboratorio y planta piloto se ensayaron filtros anaeróbicos de flujo ascendente (UAF), manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente (UASB) y una combinación de los dos anteriores UASB/UAF, siendo la última tecnología la más eficiente y prometedora. Con ella, se lograron operar los reactores con cargas de 10 kg DQO/m³-día, removiendo el 81% de la carga contaminante (Cumpliendo con las exigencias en la normativa ambiental para vertimientos), con tiempos de retención hidráulica de 24 horas, temperatura de 37 °C, sin neutralizar la acidez de las aguas residuales.

En los estudios a escala de planta piloto, en promedio se aplicaron cargas orgánicas entre 2,28 kg DQO/m³-día y 3,94 kg DQO/m³-día, y el efluente cumplió con lo exigido por la normativa ambiental vigente, operando con sustrato ácido a temperatura ambiente.

Para los estudios de campo se desarrollaron sistemas que trataran sólo las aguas mieles. De acuerdo con los estudios de laboratorio y planta piloto, se buscó desarrollar un sistema que utilizara los mismos principios anaerobios para la depuración: La Hidrólisis/Acidogénesis

y la Metanogénesis, pero realizadas en unidades independientes, lo que se conoce como separación de fases, así surgieron los **Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (SMTA)**, que son las plantas de tratamiento de aguas residuales de lavado del café, desarrolladas para el sector cafetero.



Los Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio han sido desarrollados en Cenicafé para reducir más del 80% de la contaminación presente en las aguas residuales de lavado o “mieles del café”, las cuales se originan en beneficiaderos que retiran el mucílago o baba del café por el método de fermentación natural, alcanzando remociones de carga orgánica que permiten cumplir con lo exigido por la legislación colombiana en el Decreto 1594 de 1984 y en el Decreto 3930 del 2010. Además, 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, consignados en los Decretos 901 de 1997 (MinAmbiente, 1997) y 2667 de 2012 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

La tecnología SMTA representa una contribución ambiental, económica y social a la caficultura colombiana, dado que permite minimizar el impacto ambiental que sobre el ecosistema cafetero tienen las aguas mieles.

Los SMTA involucran una tecnología de tratamiento biológico con separación de fases hidrolítica-acidogénica de la metanogénica, apta para alcanzar altas eficiencias en la remoción de carga orgánica; no utiliza energía eléctrica para bombeo del agua residual, el flujo se hace por gravedad, aprovechando la topografía de la zona cafetera colombiana; utiliza unidades prefabricadas de

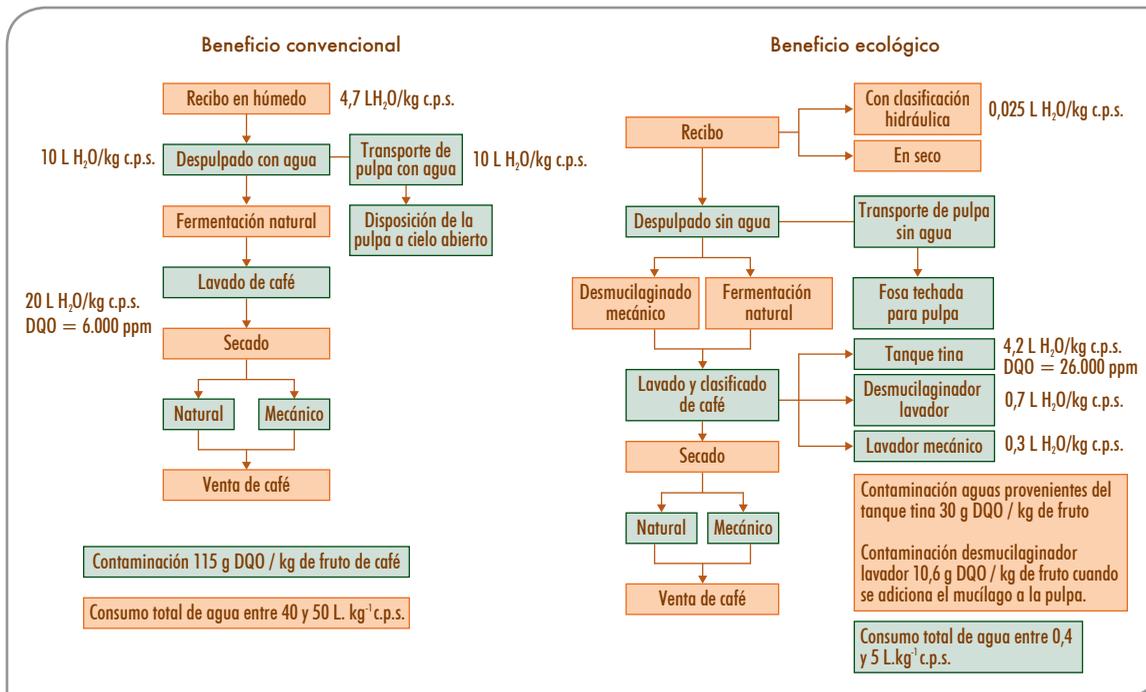


Figura 3.

Comparación entre el beneficio convencional y el beneficio ecológico del café.

polietileno negro y con tapa, que permiten elevar hasta 30 °C la temperatura interna de los tanques, favoreciendo los procesos biológicos y controlando la presencia de malos olores en los alrededores; utiliza microorganismos metanogénicos presentes en el estiércol vacuno o porcino, responsables de la etapa principal del tratamiento de las aguas mieles, y trozos de guadua o de botellas plásticas no retornables, que favorecen la permanencia de los microorganismos en el sistema (Orozco, 2003).

En los SMTA los costos operativos son bajos, porque sólo requieren de inspección y retiro de insolubles para garantizar el flujo libre, desde una recámara de dosificación de líquido por gravedad que el sistema posee.

Componentes de un SMTA

Un Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (Figura 4) está compuesto por:

- **Una trampa de pulpas**, que evita la entrada de material suspendido con tamaños de partícula superiores a 5 mm, y cuya acumulación puede ocasionar taponamiento de tuberías.
- **Uno o varios tanques de polietileno** (Reactores hidrolíticos acidogénicos), en los cuales ocurre la solubilización del material orgánico suspendido.
- **Una o más recámaras dosificadoras**, que permiten la retención del material orgánico particulado no solubilizado y el control del caudal en el sistema.
- **Uno o más tanques de polietileno (Reactores metanogénicos), empacados con trozos de guadua**

o de botellas no retornables, en los cuales se establecen los microorganismos metanogénicos, que transforman la contaminación orgánica soluble en biogás, permitiendo eliminar de esta forma más del 80% de la contaminación orgánica presente en las aguas mieles que llegan al sistema.

- El SMTA consta de una excavación en el suelo, la cual se llena con tallos de café, para disponer algún eventual excedente de aguas mieles.

Selección del tamaño del SMTA

El primer paso consiste en determinar la cantidad de café cereza recolectado en el día de máxima producción. El segundo paso es adoptar el despulpado y transporte de la pulpa sin agua. El tercero, medir y ajustar, si es necesario, la cantidad de agua para lavar el café proveniente de la fermentación del mucílago, de tal forma que el consumo de agua esté entre 4,0 y 5,0 L.kg⁻¹ c.p.s., para lo cual se recomienda utilizar la técnica de los cuatro enjuagues como está establecido para el tanque tina, lo que permite obtener el volumen y la concentración orgánica en las aguas mieles, apropiados para el tratamiento en los SMTA.

Volumen de aguas mieles

Para que un SMTA opere correctamente, es necesario que el café procedente del proceso de fermentación del mucílago, se lave en el tanque de fermentación o en canal de correteo, con un consumo de agua entre 4,0 y 5,0 L.kg⁻¹ c.p.s. Si este consumo es mayor, se requiere construir un SMTA de mayor

SMTA 300

Capacidad máxima
313 kg de café cereza por día

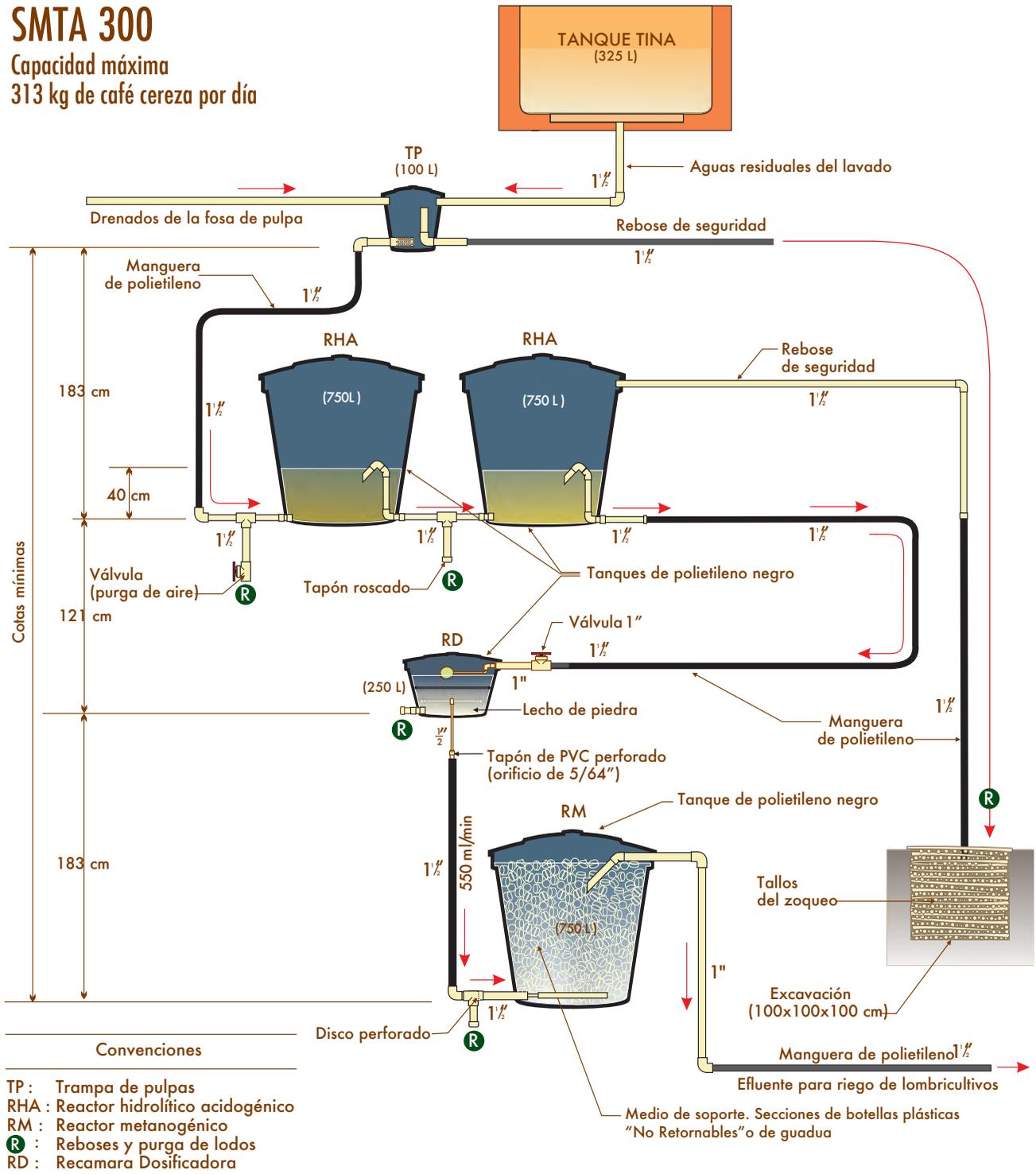


Figura 4.

Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio, referencia 300.

capacidad, lo que incrementaría los costos del tratamiento de las aguas mieles, pero si es menor, se tendría una sobrecarga orgánica que afectaría negativamente el proceso biológico del tratamiento. Lo anterior, es la causa principal y más frecuente del mal funcionamiento de un SMTA.

Instalación del SMTA

El paso previo a la instalación de un SMTA es contar con un tanque de fermentación y lavado con capacidad para procesar el café generado en el día pico, y en el cual se utilice la metodología de lavado mediante cuatro enjuagues, tal como se realiza en el tanque tina.

El agua residual generada en la etapa de lavado se debe conducir a una trampa de pulpas. La salida de aguas mieles al primer tanque o reactor hidrolítico se ubica a 10 cm del fondo de la trampa de pulpas, y el rebose de seguridad por debajo de la entrada de aguas mieles y drenados de la pulpa, en caso de que ocurra un taponamiento del dispositivo de salida a los reactores hidrolíticos, por la presencia de pulpa, de gases o aire en la tubería que conecta la trampa de pulpas con el reactor hidrolítico. La descarga del rebose de seguridad se conduce mediante manguera de polietileno de 1½", a una excavación de 1,0 x 1,0 x 1,0 m, la cual se llena completamente con tallos provenientes del zoqueo de café.

Para permitir el flujo por gravedad de las aguas mieles desde la trampa de pulpas hasta las unidades hidrolíticas,

Tabla 1.

Prototipos de SMTA y estimativo de capacidad de los tanques para fermentar y lavar, de acuerdo con la cantidad máxima de café en cereza beneficiado en un día.

SMTA	Máxima cantidad de café cereza beneficiado (kg.día ⁻¹)	Volumen estimado para lavado* (L)
SMTA 70	72	75
SMTA 120	126	131
SMTA 180	188	187
SMTA 300	313	325
SMTA 400	417	433
SMTA 600	625	649
SMTA 800	833	864
SMTA 1100	1.110	1.152
SMTA 1700	1.710	1.774

* El 70% del volumen corresponde al ocupado por el café en baba y el 30% restante al volumen libre para hacer el lavado.

recámaras dosificadoras y reactores metanogénicos, y evitar la instalación de sistemas de bombeo, es necesario cumplir con las cotas mínimas (Diferencias de nivel del terreno) que se detallan en cada uno de los prototipos (Zambrano *et al.*, 2010).

Con la producción diaria de máxima cosecha, en kilogramos de café cereza, en la Tabla 1 se selecciona el prototipo de SMTA, según el rango de cobertura, lo mismo que el tamaño del tanque de fermentación/lavado correspondiente a ese prototipo. En la Tabla 2 se presentan los materiales necesarios para la instalación de los sistemas.

Para fincas con producciones diarias de café superiores a 1.710 kg de café cereza (c.c.) se mantienen los mismos tamaños de la trampa de pulpas y la excavación con tallos de café.

Para calcular el volumen necesario para los reactores hidrolíticos se utiliza la siguiente Ecuación 1:

$$V_{RHA} = 0,000405 \times S_p \times P_a \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

V_{RHA} : Volumen total de la fase hidrolítica/acidogénica, en m³

S_p : Porcentaje de café cereza beneficiado en la semana pico respecto a la cosecha anual

P_a : Producción anual de café pergamino seco, en arrobas (@) de c.p.s.

El volumen obtenido, mediante la aplicación de la Ecuación 1, se puede dividir por dos para calcular el número de tanques de 2 m³ que se necesitan, o por cinco si se desean utilizar tanques de 5 m³ o por diez si se desean utilizar tanques de 10 m³.

Para la recámara dosificadora se siguen utilizando tanques de polietileno de 250 L de capacidad y 65 cm de altura. Para calcular el número de tanques, se debe tener presente que una recámara dosificadora permite alimentar hasta cinco reactores metanogénicos.

Inoculación y arranque del SMTA

Una vez instalado el SMTA es necesario adecuar el reactor metanogénico, el cual es la unidad más importante del sistema de tratamiento, para permitir el apropiado desempeño de los microorganismos depuradores. En este componente ocurre la etapa final de la digestión anaerobia, en donde la contaminación soluble en forma de ácidos es transformada a biogás, por la acción de microorganismos metanogénicos.

Materiales		Modelos de SMTA								
		70	120	180	300	400	600	800	1.100	1.700
Café cereza máximo beneficiado (kg.día⁻¹)		72	126	188	313	417	625	833	1.110	1.710
Tanques										
Tanque polietileno negro de 250 L con tapa (H 65cm)	Und	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tanque polietileno negro de 250 L con tapa (H 99cm)	Und	2								
Tanque polietileno negro de 100 L	Und	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tanque polietileno negro de 500 L	Und		2			3				
Tanque polietileno negro de 750 L	Und			2	3		5			
Tanque polietileno negro de 1.000 L	Und					1		3		
Tanque polietileno negro de 2.000 L	Und							1	4	5
Tuberías y accesorios										
Abrazadera de correa de 2" metálica	Und	5	5	5	5	5	6	5	6	6
Acoples machos de polietileno de 1 ½" a 1 ½"	Und	5	5	5	5	5	6	5	6	5
Adaptador macho PVC presión de ½"	Und	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Adaptador macho PVC presión de 1"	Und	2	2	2	2	2	3	1	1	1
Adaptador macho PVC presión de 1 ½"	Und	10	10	10	13	16	18	17	17	20
Adaptador hembra PVC presión de ½"	Und	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Adaptador hembra PVC presión de 1"	Und	1	1	1	1	1	2			
Adaptador hembra PVC presión de 1 ½"	Und	11	11	11	15	17	19	18	19	21
Arandelas de ½" en Neolay No 5	Und	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Arandelas de 1" en Neolay No 5	Und	4	4	4	4	4	6	2	2	2
Arandelas de 1 ½" en Neolay No 5	Und	14	14	14	20	24	26	26	26	30
Codos PVC presión de ½"	Und	4	4	4	4	4	6	4	6	6
Codos PVC presión de 1"	Und	7	7	7	7	7	13	5	9	9
Codos PVC presión de 1 ½"	Und	14	14	14	16	18	21	20	19	22
Disco en PVC de 1 ½" con 38 perforaciones de 7/32" o disco en malla Secafex 4x4.	Und	1	1	1	1	1	2	1	2	2
Limpiador PVC	1/16	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1
Malla mosquitera (150 cm de ancho)	m	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Manguera de polietileno ½"	m	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Manguera de polietileno según el terreno 1 ½" *	m	30	30	30	50	50	50	50	50	50
Pegante PVC	1/16	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1

Tabla 2.

Listado de materiales necesarios para la instalación de los diferentes prototipos. *La cantidad de este material depende del beneficiadero en particular y la ubicación del SMTA. Para el caso del SMTA de Cenicafé se utilizaron 70 m, por lo que se coloca un valor estimativo. Para todos los sistemas es opcional el uso de guadua o Botellas Plásticas No Retornables (BPNR).

Continúa...

...continuación

Materiales		Modelos de SMTA								
		70	120	180	300	400	600	800	1.100	1.700
Café cereza máximo beneficiado (kg.día⁻¹)		72	126	188	313	417	625	833	1.110	1.710
Reducciones PVC presión de 1 ½" a 1"	Und	2	2	2	2	2	3	2	3	3
Rollos de cinta teflón	Und	2	2	2	3	3	3	3	3	3
Semicodo PVC presión de 1"	Und	1	1	1	1	1	2			
Semicodo PVC presión de 1 ½"	Und	1	1	1	2	3	3	4	6	7
Tapón copa PVC presión de ½"	Und	1	1	1	1	1	2	1	2	2
Tapón roscado PVC presión de 1 ½"	Und	2	2	2	3	4	5	4	4	5
Tee PVC presión de ½"	Und	1	1	1	1	1	2	1	2	2
Tee PVC presión de 1"	Und	1	1	1	1	1	2	1	2	2
Tee PVC presión de 1 ½"	Und	2	2	2	3	4	5	4	4	5
Tubo PVC presión de ½"	m	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Tubo PVC presión de 1"	m	4	4	4	4	4	6	3	4	4
Tubos PVC sanitaria de 1 ½"	m	7	7	7	10	12	14	16	17	18
Válvula de bola en PVC de 1"	Und	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Válvula de bola en PVC de 1 ½"	Und	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Válvula flotador de 1" construida en PVC	Und	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Otros elementos										
Botellas Plásticas No Retornables (BPNR) X 2,5 L	Und	62	123	186	186	245	372	490	980	980
Cal masilla	kg	0,5	1,00	1,50	1,50	2,00	3,00	4,00	8,00	8,00
Estiércol de ganado vacuno	kg	30	60	90	90	120	180	240	480	480
Guadua	m	22	43	66	66	85	132	170	340	340
Piedra caliza o gravilla de río	m ³	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Una vez realizadas todas las conexiones en el reactor metanogénico se procede a llenar su interior con tercios de botellas no retornables o trozos de guadua, cortados en cilindros de 15 cm, de forma que sirvan de medio de soporte para las bacterias metanogénicas, para que no sean arrastradas con el agua tratada que sale del reactor, lo que haría que se perdiera eficiencia en el proceso de depuración. En la Tabla 3 se presentan las cantidades de medio de soporte que se requieren para los diferentes tamaños de las unidades metanogénicas que forman parte de los diferentes prototipos.

El siguiente paso consiste en la preparación del inóculo denominado **"Caldo microbiano metanogénico"**, el cual puede prepararse en un tanque aparte, para facilitar su

homogeneización. En la preparación del inóculo se utilizan los ingredientes y cantidades indicadas en la Tabla 3, de acuerdo con la capacidad del tanque metanogénico.

El inóculo consta de una fuente de microorganismos metanogénicos, para ello se debe utilizar estiércol fresco, vacuno o porcino, el cual se disuelve en agua (En relación 1:1), acompañado de una agitación fuerte y constante, que permita homogeneizar la mezcla, la cual se adiciona al reactor metanogénico.

Para favorecer el crecimiento de los microorganismos metanogénicos, solamente durante la instalación del SMTA, se recomienda adicionar una fuente de carbono,

Reactor metanogénico			Inoculación					Arranque	
Volumen (L)	Guadua (metros lineales)	Tercios de botella (número)	Inóculo (bacterias)	Fuente de carbono		Fuente de nitrógeno	Búfer de arranque	Día	Tiempo de alimentación diaria (Horas:min)
				Opción A	Opción B				
250	22	186	30 kg de estiércol fresco + 30 L de agua	15 L primer enjuague + 15 L segundo enjuague	2 kg de miel de purga disuelta en 60 L de agua	1,5 L orina animal ó 25 g de urea disuelta en 1 L de agua	0,5 kg de cal masilla blanca disuelta en 5 L de agua	1 a 14	00:06
								15 a 28	00:15
								29 a 42	00:35
								43 a 56	01:00
								57 a 70	01:30
71 en adelante	Continuo								
500	43	369	60 kg de estiércol fresco + 60 L de agua	30 L primer enjuague + 30 L segundo enjuague	4 kg de miel de purga disuelta en 120 L de agua	3 L orina animal ó 50 g de urea disuelta en 2 L de agua	1,0 kg de cal masilla blanca disuelta en 10 L de agua	1 a 14	00:13
								15 a 28	00:30
								29 a 42	01:10
								43 a 56	02:00
								57 a 70	03:00
71 en adelante	Continuo								
750	66	558	90 kg de estiércol fresco + 90 L de agua	45 L primer enjuague + 45 L segundo enjuague	6 kg de miel de purga disuelta en 180 L de agua	4,5 L orina animal ó 75 g de urea disuelta en 3 L de agua	1,5 kg de cal masilla blanca disuelta en 15 L de agua	1 a 14	00:20
								15 a 28	00:45
								29 a 42	01:45
								43 a 56	03:00
								57 a 70	04:30
71 en adelante	Continuo								
1.000	85	735	120 kg de estiércol fresco + 120 L de agua	60 L primer enjuague + 60 L segundo enjuague	8 kg de miel de purga disuelta en 240 L de agua	6 L orina animal ó 100 g de urea disuelta en 4 L de agua	2,0 kg de cal masilla blanca disuelta en 20 L de agua	1 a 14	00:25
								15 a 28	01:00
								29 a 42	02:20
								43 a 56	04:00
								57 a 70	06:00
71 en adelante	Continuo								
2.000	170	1.470	240 kg de estiércol fresco + 240 L de agua	120 L primer enjuague + 120 L segundo enjuague	16 kg de miel de purga disuelta en 480 L de agua	12 L orina animal ó 200 g de urea disuelta en 8 L de agua	4,0 kg de cal masilla blanca disuelta en 40 L de agua	1 a 14	00:52
								15 a 28	02:00
								29 a 42	04:40
								43 a 56	08:00
								57 a 70	12:00
71 en adelante	Continuo								

Tabla 3.

Materiales necesarios para la inoculación y arranque de los SMTA. Caudal de alimentación para cada reactor: 550ml/min.

una fuente de nitrógeno para equilibrar la relación C/N y un neutralizante que permita tener un pH cercano a 7. En la Tabla 3 se presentan los materiales y las cantidades recomendadas como fuentes de C, N y acción búfer, de acuerdo con el volumen de las unidades metanogénicas. La adición de estas fuentes se realiza una sola vez, a través de la recámara dosificadora.

Si es necesario, se adiciona agua hasta cubrir por completo el material de empaque del reactor metanogénico. Finalmente, se debe tapar el reactor metanogénico durante 3 semanas, al cabo de las cuales inicia con la etapa de arranque del sistema de tratamiento.

La etapa de arranque tiene como propósito permitir el crecimiento y la adaptación de los microorganismos metanogénicos provenientes del estiércol de cerdo o vacuno, a las aguas mieles del café sin necesidad de neutralizarlas, por lo que es imprescindible respetar las recomendaciones relacionadas con la alimentación del sistema, según el tamaño de los reactores. El proceso de arranque tiene una duración de 10 semanas. En la Tabla 3 se presentan los tiempos que debe operar la planta, con el agua residual generada durante la etapa de lavado, entre los días 1 al 70, después de este tiempo se puede mantener constante la alimentación al sistema.

Sistema de tratamiento de lixiviados generados en la tecnología Becolsub

Para los caficultores que remueven el mucílago mediante esfuerzos mecánicos, utilizando desmucilaginosos, y que adicionen el mucílago sobre la pulpa, se diseñó y evaluó un sistema de tratamiento primario de lixiviados, los cuales tienen una concentración de DQO cercana a 110.000 ppm. Este sistema de tratamiento funciona con los principios fundamentales de efecto invernadero, compostaje, lecho de secado y reactor hidrolítico/acidogénico.

El sistema de tratamiento consta de:

1. Un acondicionador de pulpa, el cual consiste en una caseta cerrada fabricada en guadua, esterilla, ladrillo y plástico en donde se deposita la mezcla pulpa-mucílago.
2. Una unidad de control de insolubles, cuyo propósito es permitir la hidrólisis/acidogénesis de los lixiviados provenientes del acondicionador de pulpa.
3. Un lecho de secado para el tratamiento de los lodos provenientes de la unidad de control de insolubles.
4. Un filtro preacidificador, el cual se empaca con piedra caliza y tiene como objetivo incrementar la alcalinidad del efluente para favorecer su tratamiento posterior en un SMTA.

En el tratamiento primario de los lixiviados se logra una remoción de la DQO cercana a las 2/3 partes, estimando una vida útil de 5 años para este sistema (Zambrano y Cárdenas, 2000).

Postratamiento de aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café



Los efluentes de los SMTA, si bien cumplen con lo dispuesto en la legislación ambiental Colombiana, aún tienen un contenido relativamente significativo de carga orgánica que ocasiona impactos ambientales adversos sobre el ecosistema. En investigaciones realizadas para determinar el impacto biológico de los efluentes generados en los sistemas de tratamiento, sobre el ecosistema acuático cafetero, utilizando diferentes bioindicadores de la cadena trófica alimentaria, se determinó que éste era significativo y por lo tanto, necesario implementar sistemas de postratamiento que minimicen o eviten este impacto (Matuk et al., 1997).

En los estudios de ecotoxicidad de los efluentes de los SMTA en el campo, se encontró en términos de DQO, una concentración efectiva de carga orgánica a la cual se muere el 50% de las algas (CE_{50}), de 890 ppm, para el alga *Chlorella vulgaris*, una concentración letal a la cual se muere el 50% de los individuos (CL_{50}), de 700 ppm, para el microcrustáceo *Daphnia pulex*, y de 490 ppm para el pez *Lebistes reticulatus*, siendo éste el indicador más sensible (Matuk et al., 1997).

En el postratamiento se busca la eliminación de materia orgánica, sólidos suspendidos y remoción de nutrientes que no se han conseguido en el sistema modular, teniendo en consideración aspectos como la versatilidad del sistema, su facilidad de operación y economía del mismo.

En Cenicafé se realizaron estudios de campo, empleando humedales de 500 L, utilizando macrófitas flotantes y emergentes, presentes en la zona cafetera, con el propósito de disminuir la concentración de carga orgánica y de N, P y K presentes en los efluentes del SMTA, y evitar impactar negativamente los recursos suelo y agua presentes en la zona cafetera (Figura 5). Los resultados mostraron que se presentó efecto de la concentración de los efluentes del SMTA sobre la variable porcentaje de remoción de la DBO en las cuatro especies acuáticas evaluadas: Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), oreja de agua (*Salvinia auriculata*) y enea (*Typha angustifolia*) (Rodríguez, 2009).

Entre las plantas flotantes, el jacinto y la lechuga de agua mostraron las mayores eficiencias de remoción de DBO₅ en el estado estable. El mayor valor de carga orgánica aplicada fue para el jacinto, con un valor de DBO₅ 72,21 kg.ha.año⁻¹ (Rodríguez, 2009).



Figura 5.

Humedales artificiales utilizados en el postratamiento de las aguas residuales del café.

En la eliminación de N, P, K no se presentaron diferencias entre las tres especies flotantes, las cuales siempre presentaron remociones mayores y diferentes a su control, y a la especie emergente, excepto en la variable K con la especie emergente.

Las ecuaciones de regresión obtenidas permiten predecir que se presenta inhibición del crecimiento de *E. crassipes* a concentraciones de DQO de 1.281 ppm; para *P. stratiotes* a una concentración de DQO de 1.222 ppm; para *S. auriculata* a concentraciones de DQO de 903 ppm y para *T. angustifolia* se presenta inhibición en el incremento del número de plantas a una concentración de DQO de 508 ppm.

Considerando el desempeño de las cuatro especies acuáticas en la remoción (medida como mg.m⁻².d⁻¹) de los parámetros DBO₅, sólidos solubles totales-SST, nitrógeno total-N_T, fósforo total-P_T y K en efluentes del SMTA, la mejor especie para el postratamiento de las aguas mieles del café es la especie flotante *E. crassipes*, seguida de la especie flotante *P. stratiotes*, de la especie emergente *T. angustifolia* y de la especie flotante *S. auriculata*.

Los humedales deben tener una relación longitud:ancho entre 2:1 a 4:1, una profundidad de 0,6 m, una pendiente del 1,0% y un tiempo de detención hidráulica entre 2 y 5 días, para remover carga orgánica. Las excavaciones se deben forrar con plástico, para evitar la infiltración de las aguas, si se utilizan plantas flotantes, éstas deben cubrir el 75% del espejo de agua y se deben cosechar cada 15 días. Si se desea sembrar plantas emergentes como juncos, platanillas o heliconias, las lagunas se deben llenar con grava de tamaño entre 13 y 38 mm y las plantas se deben sembrar a una densidad cercana a 30 plantas/m².

Para una finca que produzca 1.000 @ de c.p.s. al año, el área de humedales para el postratamiento de las aguas mieles es cercano a 30 m².

Valorización de los subproductos del café

En el proceso del café, la cantidad de material vegetal que queda en forma de residuo es muy superior al que se aprovecha directamente en la preparación de la bebida. En la Tabla 4 se presenta el peso de cada uno de los residuos generados durante cada una de las etapas del proceso de beneficio e industrialización del café.

Tabla 4.

Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1 kg de café cereza en Colombia (Fuente: Adaptado de Calle, 1977).

Proceso	Residuo obtenido	Pérdida (en gramos)
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucílago	149
Secado	Agua	171
Trilla	Pergamino	42
	Película plateada	
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación bebida	Borra	104
Pérdida acumulada		924

Los dos principales subproductos del café que se generan durante el proceso de beneficio del fruto, son la pulpa y el mucílago.

La pulpa de café. Es el primer producto que se obtiene en el método usado para el procesamiento del fruto de café y representa, en base húmeda, alrededor del 43,58% del peso del fruto fresco (Montilla, 2006). **La pulpa de café con una producción media de 2,25 toneladas frescas por hectárea al año (Rodríguez, 2009), se constituye en el principal subproducto del proceso de beneficio.** Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que nuestro país exporta, se generan 162.900 toneladas de pulpa fresca, la cual si no se utiliza adecuadamente produciría una contaminación equivalente a la generada durante un año, en excretas y orina, por una población cercana a 870.000 habitantes.

Mucílago de café. Se genera en la etapa del desmucilaginado, representa, en base húmeda, alrededor del 14,85% del peso del fruto fresco (Montilla, 2006). En términos de volumen, por cada kilogramo de café cereza se producen 91 mL de mucílago puro (Zambrano e Isaza, 1994). Su producción media es de 768 kg.ha.año⁻¹ (Rodríguez, 2007). Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que Colombia exporta, se generan aproximadamente 55.500 toneladas de mucílago fresco, el cual si no se utiliza adecuadamente produciría una contaminación equivalente a la generada durante un año, en excretas y orina, por una población de 310.000 habitantes.

A continuación se relacionan los procesos investigados en Cenicafé, en los últimos años, para el aprovechamiento de la pulpa y el mucílago de café:

Producción de abono orgánico

El sistema tradicional que se ha utilizado para el manejo de la pulpa ha sido la descomposición en fosas, construcciones en las cuales ocurre la transformación de la pulpa en compost, para lo cual se requiere de algunas operaciones de manejo, que radican fundamentalmente en volteos periódicos de la masa, que se deben efectuar cada 15 días, para lograr su transformación en aproximadamente 4 meses.

Para el manejo adecuado de la pulpa de café se evaluó la lombricultura durante el período 1990-2000, para acelerar su proceso de transformación, disminuir la mano de obra y mejorar los rendimientos, utilizando diferentes sistemas de manejo como: Lechos en guadua, esterilla, ladrillo (Figura 6) y cajas plásticas, en los cuales se encontró que la pulpa generada por una finca que produzca 1.000 @.año⁻¹ de c.p.s. (Aproximadamente 25 toneladas de pulpa fresca), se puede manejar en un área efectiva de 25 m² de lombricultivo, con una densidad de lombriz pura de 5 kg.m⁻². Es decir, que se puede manejar alrededor de una tonelada de pulpa de café por metro cuadrado de lombricultivo al año (Dávila y Ramírez, 1996).

En estos sistemas de manejo se puede utilizar pulpa de café sola, obtenida por un beneficio tradicional o mezclada con mucílago, esta última proveniente de beneficiaderos que utilicen despulpado sin agua, desmucilaginado mecánico y mezcla de los dos subproductos, por medio de un tornillo sinfín. En lombricultivos alimentados con este último sustrato, se observaron mayores incrementos en peso de lombrices, mayores tasas de consumo y mayores rendimientos en la conversión de pulpa en lombricompostado que en aquellos alimentados con pulpa sola (Blandón et al., 1998). En general, los rendimientos



Figura 6.

Lombricultura con pulpa de café.

en la producción de lombricomposto, se ubican en el rango de 35% a 40% en base húmeda.

Las lombrices separadas se pueden utilizar para ampliar el cultivo, como pie de cría para nuevos lombricultivos, o como fuente de proteína para alimentación de aves de corral, cerdos y peces, entre otros. **El lombricomposto obtenido, por su gran riqueza microbiológica y sus características físico-químicas, representa un buen abono orgánico (Blandón et al., 1999).** Estos abonos orgánicos proporcionan nutrimentos al cultivo, mejoran las propiedades físico-químicas y microbiológicas del suelo, incrementando su productividad y se puede utilizar como abono en huertas y viveros, entre otros.

Consideraciones prácticas

En Cenicafé se ha encontrado que la mezcla de una parte de lombricomposto con tres partes de suelo es la más adecuada para la preparación de almácigos de café (Salazar, 1992) y que la aplicación entre 0,5 y 3,0 kilogramos de lombricomposto por planta de café al año reemplaza la fertilización convencional (Sadeghian, 2002).

Producción de hongos comestibles y medicinales

Durante los años 1990 al 2003, se determinó la factibilidad técnica y económica de cultivar hongos comestibles del género *Pleurotus* spp. (conocidos popularmente como "orellanas") y los hongos medicinales *Lentinus edodes* ("Shiitake") y *Ganoderma lucidum* sobre sustratos preparados con los subproductos generados durante el proceso de cultivo e industrialización del café, con el fin de evitar la contaminación ambiental, diversificar e incrementar los ingresos al productor y mejorar su dieta alimenticia (Rodríguez, 2003).

Los hongos comestibles del género *Pleurotus* (Figura 7), por su facilidad de cultivo y por su alto contenido de proteína, pueden cultivarse en las fincas cafeteras, y utilizarse en programas de seguridad alimentaria.

La mayoría de los subproductos agrícolas generados en la zona cafetera, provenientes de los cultivos de café, plátano, maíz y fríjol, pueden emplearse para cultivar este tipo de hongos, con rendimientos medios superiores al 50%, que los hace factibles para ser explotados económicamente y con unos contenidos de proteína que oscilan entre el 28% y el 30% (Rodríguez y Jaramillo, 2005).



Figura 7.

Cultivo de *Pleurotus* spp. sobre subproductos del café.

En el caso de los hongos medicinales cultivados con aserrín de tallo de cafeto, borra de café y pulpa de café, se determinó para las cepas de Shiitake (*Lentinus edodes*) (Figura 8) que los sustratos con una relación C/N de 40 permiten obtener unos rendimientos medios, a las condiciones de la zona cafetera colombiana, entre el 52% y el 76%. Se realizaron análisis bromatológicos y de minerales a los carpóforos cosechados en los diferentes sustratos, cuyo contenido de proteína osciló entre el 15,5% y el 19,0%, contenidos de fibra entre el 10,0% y el 15,0% y contenidos de grasa entre el 1,6% y el 2,0% (Rodríguez y Jaramillo, 2005).



Figura 8.

Cultivo de *Lentinus edodes* sobre subproductos del café.

El hongo *Ganoderma lucidum* (Figura 9) se puede cultivar sobre sustratos conformados con los subproductos del cultivo e industrialización del café, con relaciones C/N en el rango 40 a 60 y en los cuales la pulpa de café no sobrepase el 15%, logrando rendimientos medios en el cultivo en el rango del 7,0% al 13,0% (Rodríguez y Jaramillo, 2005).



Figura 9.

Cultivo de *Ganoderma lucidum* sobre subproductos del café.

De esta forma, se generaron alternativas viables y atractivas para los caficultores en el cultivo del hongo medicinal, ya que las formulaciones más productivas contenían aserrín de tallo de café y pulpa de café, los dos sustratos más abundantes en la zona cafetera, lo que aseguraría la disponibilidad de los mismos para el establecimiento de los cultivos.

medicinales, para mantenerse en el tiempo, requiere una disponibilidad permanente de este subproducto durante todo el año. En Cenicafé se evaluó el proceso de ensilaje, con el fin de conservar la pulpa, de forma que pudiera ser utilizada sin problemas, como materia prima para dichos procesos durante todo el año.

*De acuerdo con los resultados obtenidos se concluyó que el ensilaje en silos fosa (Figura 10) permite disponer de materia prima en buen estado, y durante un tiempo suficiente, para mantener un cultivo permanente de hongos comestibles del género *Pleurotus* y lombriz roja, a nivel de finca cafetera. Los rendimientos medios alcanzados en el cultivo de *P. ostreatus* sobre pulpa de café ensilada fueron del 72,5% y con pulpa fresca del 69,0% (Rodríguez, 2003).*



Figura 10.

Pulpa de café ensilada en silos-fosa.

Ensilaje de la pulpa de café

La pulpa es un subproducto con un alto contenido de humedad (alrededor del 80%), que sólo es abundante en la época de cosecha. El establecimiento de sistemas de producción de abono orgánico y hongos comestibles y

Pectinas a partir de la pulpa y el mucílago de café

La pectina es un polisacárido de ácido poligalacturónico, y se comercializa en polvo, en forma de cristales o líquida. Se clasifican en pectinas de alto y bajo metoxilo, y ambas

son utilizadas en diversas aplicaciones, por la industria alimenticia, cosmética y farmacéutica por sus propiedades gelatinizantes, espesantes y estabilizantes.

En las investigaciones realizadas en Cenicafé, se determinó que se pueden obtener en promedio, 174 g de pectina de bajo metoxilo por cada 10 kg de pulpa fresca (Rodríguez, 1999), y se pueden obtener 82 g de pectina de alto metoxilo, por cada 10 kg de mucílago fresco (Rodríguez, 1999).

Alimentación animal

Se evaluó la utilización del mucílago de café en la alimentación porcina, encontrándose que al suministrar el 80% de concentrado, de acuerdo con los requerimientos del animal, según su peso, y suplementar la ración iniciando con 2 L de mucílago de café diario, en animales con pesos superiores a 40 kg, se obtienen buenas respuestas en conversión del alimento, ganancia en peso y rendimiento económico, sin afectar la calidad de la carne (Garavito y Puerta, 1998).

Producción de biocombustibles a partir de los subproductos del café

En el año 2007 se iniciaron investigaciones relacionadas con la producción de alcohol carburante a partir de la pulpa y el mucílago del café. Se realizaron los estudios de fermentación alcohólica de la pulpa de café fresca, utilizando levaduras comerciales, con promedios de rendimiento de 25,2 mL de etanol por 1,0 kg de pulpa fresca y 58,4 mL de etanol por 1,0 kg de mucílago fresco (Rodríguez y Zambrano, 2010).

Lo anterior permite estimar que se pueden obtener 1,97 L de etanol de la pulpa y el mucílago provenientes del beneficio de 100 kg de café cereza, lo que representa en términos energéticos 42 MJ (Rodríguez y Zambrano, 2010). Las vinazas del proceso de destilación se pueden tratar por biodigestión anaerobia para obtener en términos energéticos, como biogás, 33 MJ adicionales, contribuyendo a no deteriorar el medio ambiente (Rodríguez, 2007).

El biogás es una mezcla gaseosa constituida básicamente por metano en una proporción que oscila entre el 50% y el 80%, y gas carbónico, con pequeñas trazas de vapor de agua, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, amoníaco, monóxido de carbono, nitrógeno, oxígeno y trazas de compuestos orgánicos; y se origina por la degradación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. El biogás se puede utilizar como combustible directo en sistemas de combustión a gas o para la producción de energía eléctrica, mediante turbinas o plantas generadoras a gas. En los estudios realizados por Calle (1974) y Arcila (1980), se reportan rendimientos de 25 L de biogás por 1,0 kg de pulpa fresca alimentada a los digestores. En la descomposición anaerobia del mucílago, se producen 287 L de metano por 1,0 kg de DQO aplicado en el proceso de fermentación a 36 °C.

Teniendo en cuenta los programas de renovación de cafetales, promovidos por la Federación Nacional de Cafeteros, y la cantidad de tallos de café generados en esta práctica (Farfán, 1994), se puede estimar una producción media de 5 kg de tallos de café por kilogramo de café procesado (Rodríguez, 2007), con una capacidad calórica media de 19,75 MJ.kg⁻¹ (Roa, 2003), que ofrecerían por 100 kg de café cereza procesados una energía de 9.875 MJ.

Otro subproducto generado con excelentes propiedades combustibles es el endocarpio del fruto constituido por la cascarilla (Cisco) y la película plateada, que representan, en peso, el 4,2% del fruto fresco (Montilla, 2006), con una capacidad calórica de 17,90 MJ.kg⁻¹ (Roa, 2003), lo que representaría para 100 kg de café cereza procesado, una energía de 75 MJ.

Tanto los tallos de café como la cascarilla se pueden utilizar en el secado mecánico del café. Oliveros (2007), reporta para el secado mecánico del café utilizando cascarilla o tallos de café como combustible y eficiencias del 50% en los intercambiadores de calor (con superficie aletada), un consumo de 5 kg de combustible por 1,0 @ de c.p.s.

Realizando una sumatoria de la energía que se puede obtener de los subproductos relacionados con el cultivo, beneficio e industrialización de 100 kg de café cereza, se determina que es cercana a los 10 GJ. Energía que por provenir del campo es energía renovable y que tiene un gran valor económico, social y ambiental por el agotamiento paulatino de las reservas de las energías fósiles.

En la Tabla 5 se presentan los valores energéticos de los subproductos generados en el proceso de cultivo e industrialización del grano de café, cuando se utilizan como combustible directo o en los biocombustibles generados cuando los subproductos se utilizan como materia prima en la producción de éstos.

Manejo de lixiviados provenientes de la mezcla mucílago-pulpa de café

Los lixiviados son los líquidos provenientes de la fermentación de la mezcla pulpa-mucílago. La lixiviación se presenta cuando los drenados provenientes de la fermentación arrastran componentes de la pulpa, tales como carbohidratos, alcoholes, ácidos y compuestos aromáticos, entre otros.

En Cenicafé, Narváez *et al.* (2000) evaluaron como alternativa para el manejo de los lixiviados, la evaporación mecánica con el fin de disminuir el impacto ambiental generado por los lixiviados producidos en la tecnología Becolsub. La investigación se desarrolló utilizando un evaporador rústico conectado a una chimenea, por la cual son conducidos los gases de la combustión generados en una estufa campesina. Con el evaporador operando en las condiciones de trabajo de la estufa (15 horas al día) se logró controlar el 100% de la contaminación hídrica generada por los efluentes generados en una finca con una producción anual de 240 @.año⁻¹ de c.p.s. La eficiencia térmica del evaporador y del sistema global fue de 57,01% y 20,74%, respectivamente. El residuo concentrado presentó 295.000 ppm de DQO, 164.254 ppm de ST, y 35° Brix.

Evaporación de efluentes provenientes del proceso de beneficio del café

En Cenicafé, Ramírez (2010) realizó evaluaciones de campo utilizando secadores mecánicos (Figura 11) en los cuales se utilizaron los gases de combustión sobrantes del proceso de secado mecánico del grano, utilizando un evaporador de bandejas para lixiviados provenientes de la tecnología Becolsub, con un porcentaje de evaporación promedio del 71,42%. La cantidad de lixiviados colocados en el evaporador fue, en promedio, de 31,86 L. El total de lixiviados evaporados fue de 277 L en 467 horas, con una relación de 0,59 L evaporados por 1,0 hora de secado.

En pruebas para la evaporación de los efluentes provenientes del lavado mecánico del café con el equipo

Subproducto	Poder calorífico	Producción
Pulpa	15,88 MJ.kg ⁻¹ pulpa seca. Combustible sólido (Pulpa seca)	2.258 kg.ha-año ⁻¹
	0,54 MJ.kg ⁻¹ pulpa fresca. Combustible gaseoso (Biogás)	
	0,53 MJ.kg ⁻¹ pulpa fresca. Combustible líquido (Bioetanol)	
Mucílago	2,00 MJ.kg ⁻¹ mucílago fresco. Combustible gaseoso (Biogás)	768 kg.ha-año ⁻¹
	1,23 MJ.kg ⁻¹ mucílago fresco. Combustible líquido (Bioetanol)	
Cisco	17,90 MJ.kg ⁻¹ Combustible sólido	227 kg.ha-año ⁻¹
Borra	29,01 MJ.kg ⁻¹ borra seca. Combustible sólido	22.300 t.año ⁻¹
	5,90 MJ.kg ⁻¹ borra seca. Combustible gaseoso (Biogás)	
	4,38 MJ.kg ⁻¹ borra seca. Combustible líquido (Bioetanol)	
Ripios	5,76 MJ.kg ⁻¹ borra seca. Combustible líquido (Biodiésel)	Sin datos
	15,60 MJ.kg ⁻¹ ripio. Combustible sólido	
Tallos	3,46 MJ.kg ⁻¹ ripio. Combustible líquido (Biodiésel)	3.200 kg.ha-año ⁻¹
	19,75 MJ.kg ⁻¹ tallo seco. Combustible sólido	

Tabla 5.

Capacidad calorífica de los principales subproductos del café (Fuente: Rodríguez y Zambrano, 2010).



Figura 11.

Secador mecánico de los lixiviados del café.

ECOMILL®, utilizando un secador solar parabólico con cubierta de plástico (PQA, 2009) para el secado del café (Ramírez et al., 2002; Oliveros et al., 2006 y 2008), en piso de cemento y plástico (Figura 12), se colocaron 2.761 L de efluentes, de los cuales 2.538 L fueron evaporados en un período de 26 días, para una eficiencia del 92%. La altura inicial de los efluentes en el secador solar fue de 100 mm, de los cuales se evaporaron 85 mm. El promedio de la tasa de evaporación diaria en el secador fue de 2,74 mm, valores cercanos a la evaporación media para Cenicafé (3,47 mm.día⁻¹ reportada por la Estación Meteorológica de La Granja, Chinchiná). En el secador, con un área de 27 m², se lograron evaporar 98 L de efluente por día, por lo que la tasa de evaporación en este sistema estuvo alrededor de 3,5 L.m².día⁻¹.

En el año 2012 se realizaron pruebas de evaporación de los efluentes resultantes del lavado del café con la tecnología ECOMILL® (En la cual se utilizan consumos específicos de agua entre 0,4 y 0,5 L.kg⁻¹) utilizando secadores solares (Figura 13). Se evaluaron los secadores parabólicos, tres de ellos con extractores y tres sin extractores y en su interior se colocaron bandejas de 1,0 m², conteniendo cada una 10, 15 y 20 kg de mieles provenientes del ECOMILL®. El promedio de la tasa de evaporación para los seis secadores fue de 1,57 kg.día⁻¹, con un mínimo de 1,29 kg.día⁻¹ para el secador sin extractor y 10 kg de mieles, y un máximo de 1,97 kg.día⁻¹, correspondiente al secador dotado de extractor y que contenía la bandeja con 20 kg de mieles.

El valor promedio obtenido por cada 15 kg de mieles frescas, fue de 0,87 kg de material deshidratado (humedad final promedio de 17,7%) y el promedio del tiempo de evaporación fue de 16,5 días, con máximo de 21 días y mínimo de 12 días.

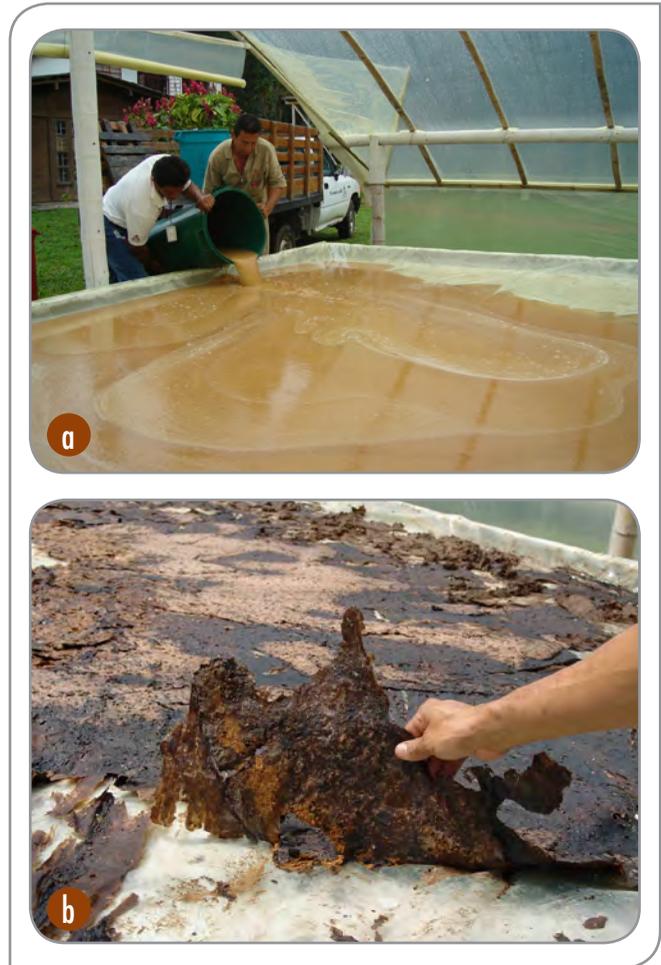


Figura 12.

a. Secador solar parabólico; b. Mieles deshidratadas.



Ramírez (2012) reporta que los residuos secos tienen un potencial uso como biofertilizantes, alimentos para consumo animal, aglomerantes para la construcción y producción de plásticos biodegradables, además de generar un valor agregado y lograr un manejo ambiental integral de la tecnología ECOMILL® (Figura 14).



Figura 13.

Evaluación de la deshidratación de mieles en secadores solares.



Figura 14.

Subproductos resultantes de la tecnología ECOMILL®.

Recomendaciones prácticas

Para realizar un manejo inteligente del agua y de los subproductos del café en el proceso de beneficio húmedo, de forma que no ocasionen impactos ambientales adversos en el ecosistema cafetero y que le permitan contribuir a la rentabilidad del negocio cafetero, realice las siguientes prácticas:

Práctica 1. Adopte el despulpado en seco y el transporte de la pulpa sin agua.

La adopción del despulpado de los frutos sin agua y su transporte por gravedad a las fosas se constituye en la acción ambiental más importante en el beneficio húmedo del café, dado que el agua en esta etapa genera el mayor impacto ambiental negativo sobre los ecosistemas, por la cantidad de compuestos orgánicos de baja biodegradabilidad que se solubilizan en el agua, cuando entra en contacto con la pulpa, la cual es responsable de las tres cuartas partes de la contaminación potencial que se puede producir en los beneficiaderos de café.

Práctica 2. Construya una fosa techada para almacenar la pulpa.

La pulpa y el mucílago representan el 100% de los residuos que se generan durante el proceso de beneficio húmedo de café. La construcción de una fosa techada para la descomposición de la pulpa permite evitar el 75% de la contaminación hídrica, si el transporte de la pulpa se realiza por gravedad o mecánicamente, sin la utilización de agua.

Práctica 3. Transforme la pulpa en abono orgánico mediante un compostaje o lombricompostaje techado.

El lombricompostaje de la pulpa de café se considera la práctica más sencilla para el aprovechamiento eficiente de este subproducto, dado que acelera su proceso de transformación, disminuye la mano de obra y mejora los rendimientos del abono orgánico obtenido. Los lombricultivos se pueden construir utilizando diferentes sistemas de manejo como: Lechos en guadua, esterilla, ladrillo y cajas plásticas, en los cuales se encontró que la pulpa generada por una finca que produzca 1.000 @.año⁻¹ de c.p.s. (Aproximadamente 25 t de pulpa fresca), se puede manejar en un área efectiva de 25 m² de lombricultivo, con una densidad de lombriz pura de 5 kg.m²; es decir, que se puede manejar alrededor de 1 t de pulpa de café por 1 m² de lombricultivo al año.

Si no se dispone de lombrices se puede realizar la transformación de la pulpa mediante volteos periódicos bajo techo, para evitar que las aguas lluvias lixivien los componentes de la pulpa y ocasionen impactos negativos en el ecosistema.

Práctica 4. Racionalice el consumo de agua en las etapas de desmucilaginado, lavado y clasificación del café.

El uso racional del agua en el desmucilaginado natural o mecánico y en el lavado del café, permite reducir el volumen y aumentar la concentración de la contaminación orgánica en los residuos líquidos producidos, lo que hace más económico su tratamiento.

Cuando la eliminación del mucílago se realiza por fermentación natural, el uso eficiente y racional del agua durante el lavado del café, permite reducir el 80% del consumo de la misma. Para efectuar dicho control utilice la práctica de realizar cuatro enjuagues para lavar el café, dentro de los tanques de fermentación, con la tecnología del tanque tina. El consumo de agua promedio en esta etapa es de 4 a 5 L.kg⁻¹ de c.p.s.

Cuando la eliminación del mucílago se realiza por desmucilaginado mecánico, un sencillo sistema de control de caudal, desarrollado en Cenicafé, permite tener un flujo cercano a 0,8 L.kg-1 de c.p.s.

Práctica 5. Implemente sistemas de tratamiento para las aguas residuales

La factibilidad técnico económica para la implementación de sistemas de tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café depende en gran medida de la simplicidad y confiabilidad del sistema, así como del volumen y carga orgánica del residuo a tratar. En consecuencia, no utilizar agua para transportar pulpa y la racionalización del consumo de agua en la operación de lavado, permiten reducir la contaminación y el volumen de agua que es necesario tratar.

Las aguas residuales que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del café, son biodegradables y su concentración de materia orgánica es alta, correspondiente a poderes contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas.

Para el tratamiento de las aguas mieles provenientes del lavado del grano utilice los Sistemas Modulares para el Tratamiento Anaerobio, SMTA, los cuales permiten el tratamiento del mucílago fermentado, que corresponde al 28% de la contaminación total que generan los subproductos del café.

Para el caso del uso del desmucilaginado mecánico y la mezcla del mucílago con la pulpa de café, implemente antes de los SMTA, sistemas de tratamiento primario para los lixiviados que se generan, como el desarrollado por Cenicafé, denominado STLB, Sistema de Tratamiento de Lixiviados generados en la Tecnología Becolsub.

El sistema se puede construir por etapas, con el fin de facilitar la consecución de los recursos. En una primera etapa se construye la fase hidrolítica y en una segunda etapa se construye la fase metanogénica.

Literatura citada

- ÁLVAREZ, J. *Despulpado de café sin agua*. Chinchiná : CENICAFÉ, 1991. 6 p. (Avances Técnicos No. 164).
- ARCILA O., F. *Producción de biogás a base de pulpa de café*. Guatemala : Reunión internacional sobre la utilización integral de los subproductos de café, 1979. 17 p.
- BLANDÓN C., G.; DÁVILA A., M.T.; RODRÍGUEZ V., N. *Caracterización microbiológica y físico-química de la pulpa de café sola y con mucílago, en proceso de lombricompostaje*. *Cenicafé* 50(1):5-23. 1999.
- BUITRAGO A., J.; CALLE V., H.; GALLO C., J.T.; CORSO M., M.A. *Evaluación de la melaza de café en dietas para cerdos en crecimiento y acabado*. *ICA* 5(4):407-410. 1970.
- CALLE V., H. *Subproductos del café*. Chinchiná : CENICAFÉ, 1977. 84 p. (Boletín Técnico No. 6).
- CALLE V., H. *Cómo producir gas combustible con pulpa de café*. Chinchiná : CENICAFÉ, 1974. 11 p. (Boletín Técnico No. 3).
- CALLE V., H. *Baterías eléctricas con pulpa y mucílago de café*. Chinchiná : CENICAFÉ, 1973. 4 p. (Avances Técnicos No. 25).
- CALLE V., H. *Métodos de extracción de las pectinas del café*. *Cenicafé* 13(2):69-74. 1962.
- CALLE V., H. *Aceites del café*. *Cenicafé* 11(9):251-258. 1960.
- CALLE V., H. *Producción de gas combustible por fermentación mecánica de la pulpa de café*. *Cenicafé* 6(66):198-205. 1955.
- CALLE V., H. *Perspectivas para el empleo de la pulpa y ripios del café como materiales curtientes*. *Cenicafé* 6(62):69-71. 1955.
- CALLE V., H. *Propagación de levaduras alimenticias en la pulpa y mucílago del café*. *Revista cafetera de Colombia* 10(122):3730-3732. 1951.
- CALLE V., H. *Producción de alcohol con los desperdicios del café*. *Cenicafé* 2(22):33-34. 1951.
- COLOMBIA. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Decreto 3930 del 2010. Bogotá : El Ministerio, 2010. 29 p.
- COLOMBIA. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Decreto número 3440. Bogotá : El Ministerio, 2004. 4 p.
- COLOMBIA. Ministerio del medio ambiente. Resolución 0273 de 1997. Santafé de Bogotá : El Ministerio, 1997. 2 p.
- COLOMBIA. Ministerio del medio ambiente. Decreto número 901 de 1997. Bogotá : El Ministerio, 1997. 9 p.
- COLOMBIA. Ministerio de salud. Decreto número 1594 de 1984. Bogotá : El Ministerio, 1984. 48 p.
- DÁVILA A., M.T.; RAMÍREZ G., C.A. *Lombricultura en pulpa de café*. Chinchiná : CENICAFÉ, 1996. 11 p. (Avances Técnicos No. 225).
- FARFÁN V., F. *El zoqueo del café conserva el bosque nativo*. Chinchiná : CENICAFÉ, 1994. 4 p. (Avances Técnicos No. 209).
- GARAVITO R., A.; PUERTA Q., G.I. *Utilización del mucílago del café en la alimentación de cerdos*. *Cenicafé* 49(3):231-256. 1998.
- LÓPEZ A., M.; CALLE V., H. *Valor comparativo de la pulpa de café descompuesta como abono*. *Cenicafé* 7(81):285-297. 1956.
- MATUK V., V.; PUERTA Q., G.I.; RODRÍGUEZ V., N. *El impacto biológico de los efluentes del beneficio húmedo de café*. *Cenicafé* 48(4):234-252. 1997.
- MONTILLA P., J. *Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café*. Manizales : Universidad de Caldas. Facultad de ciencias agropecuarias, 2006. 107 p. Tesis: Ingeniera agrónoma.
- NARVÁEZ M., L.H. *Manejo de las mieles generadas en la tecnología Becolsub para la disminución del impacto ambiental generado por los lixiviados*. Pasto : Universidad de Nariño. Facultad de ciencias agrícolas, 2000. 104 p. Tesis: Ingeniero agrónomo.

- OLIVEROS T., C.E. Secado de café con empleo de energía solar y en silo. Chinchiná : CENICAFÉ, 2007. 5 p.
- OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; PEÑUELA M., A.E. Secador solar de túnel para café pergamino. Chinchiná : CENICAFÉ, 2006. 8 p. (Avances Técnicos No. 353).
- OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; PEÑUELA M., A.E. Secador parabólico mejorado. Chinchiná : CENICAFÉ, 2008. 8 p. (Avances Técnicos No. 376).
- PRODUCTOS QUÍMICOS ANDINOS. Secadores solares para café: Producto agroplas N PQA Esp. 7 a 8 milésimas de pulgada. [En Línea]. Chinchiná : CENICAFE, 2009. Disponible en internet: <http://www.pqa.com.co/Secadores/index.html>. Consultado en abril de 2009.
- 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).
- 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.
- PARRA H., J.; CALLE V., H. Conversión de los ripios de café en compost. *Cenicafé* 18(4):103-115. 1967.
- RAMÍREZ G., C.A. Disminución del impacto ambiental en la tecnología Becolsub mediante la evaporación de lixiviados: Informe anual de actividades Octubre 2009 – Septiembre 2010. Chinchiná : CENICAFÉ, 2010. 7 p.
- RAMÍREZ G., C.A. Evaluación de la deshidratación de las mieles resultantes del lavado del café con ECOMILL®: Informe anual de actividades Octubre 2011 – Septiembre 2012. Chinchiná : CENICAFÉ, 2012. 24 p.
- ROA M., G. Potencialidad del café y sus residuos rurales como cultivo energético en Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ, 2003. 2 p.
- 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).
- 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.
- RODRÍGUEZ V., N. Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente, 2009. 508 p. Tesis: Doctor en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- RODRÍGUEZ V., N. Balance energético en la producción de etanol a partir de la pulpa y el mucílago de café y poder calorífico de los subproductos del proceso del cultivo de café. Chinchiná : CENICAFÉ, 2007. 7 p.
- RODRÍGUEZ V., N. Ensilaje de pulpa de café. Chinchiná : CENICAFÉ, 2003. 8 p. (Avances Técnicos No. 313).
- RODRÍGUEZ V., N. Aprovechamiento de los residuos sólidos generados en el cultivo e industrialización del café para la producción de hongos comestibles y medicinales. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, 2003. 140 p.
- RODRÍGUEZ V., N. Obtención de pectinas a partir de la pulpa y el mucílago del café: Informe anual de actividades 1998 1999. Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 90 p.
- RODRÍGUEZ V., N.; JARAMILLO L., C. Cultivo de hongos medicinales sobre residuos agrícolas de la zona cafetera. Chinchiná : CENICAFÉ, 2005. 72 p. (Boletín Técnico No. 28).
- RODRÍGUEZ V. N.; JARAMILLO L., C. Cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* en residuos agrícolas de la zona cafetera. Chinchiná : CENICAFÉ, 2005. 56 p. (Boletín Técnico No. 27).
- RODRÍGUEZ V., N.; ZAMBRANO F., D.A. Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. Chinchiná : CENICAFÉ, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 393).
- SADEGHIAN K., S. Requerimientos nutricionales del cafeto y la fertilización orgánica. p. 37-39. En: SEMINARIO Sobre tecnología para la producción y beneficio de café orgánico. (Julio 22-24 2002 : Chinchiná). Chinchiná : CENICAFÉ : ICONTEC, 2002. 79 p.
- SALAZAR A., N. La pulpa de café transformada por la lombriz es un buen abono para almácigos de café. Chinchiná: CENICAFÉ, 1992. 2 p. (Avances Técnicos No. 178).
- VALENCIA A., G.; CALLE V., H. La miel de café y su composición. *Cenicafé* 19(4):135-139. 1968.

- ZAMBRANO F., D.A. Fermente y lave su café en el tanque tina. Chinchiná : Cenicafé, 1993. 8 p. (Avances Técnicos No. 197).
- 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).
- 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.
- ZAMBRANO F., D.A.; ISAZA H., J.D. Lavado del café en los tanques de fermentación. Cenicafé 45(3):106-118. 1994.
- 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. 19 p.
- ZAMBRANO F., D.A.; ISAZA H., J.D.; RODRÍGUEZ V., N.; LÓPEZ P., U. Tratamiento de aguas residuales del lavado del café. Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 26 p. (Boletín Técnico No. 20).
- ZAMBRANO F., D.A.; RODRÍGUEZ V., N.; LÓPEZ P., U.; OROZCO R., P.A.; ZAMBRANO G., A.J. Tratamiento anaerobio de las aguas mieles del café. Chinchiná : CENICAFÉ, 2006. 28 p. (Boletín Técnico No. 29).
- ZAMBRANO F., D.A.; RODRÍGUEZ V., N.; LÓPEZ P., U.; ZAMBRANO G., A.J. Construya y opere su sistema modular de tratamiento anaerobio para las aguas mieles [cd rom]. Chinchiná : CENICAFÉ, 2010. 36 p.
- ZAMBRANO F., D.A.; ZULUAGA V., J. Balance de materia en un proceso de beneficio húmedo del café. Cenicafé 44(2):45-55. 1993.
- ZAMBRANO G., A.J. Diseño de un sistema integral para manejo y tratamiento de los residuos generados en la tecnología Becolsub en una finca. Manizales : Universidad Católica de Manizales. Facultad de ingeniería de saneamiento y desarrollo ambiental, 2006. 67 p. Tesis: Ingeniero de saneamiento y desarrollo industrial.