



# Evaluación del tratamiento de lixiviado de pulpa de café con destilación y evaporación mediante concentradores solares parabólicos en la Hacienda Majavita



Ingeniería Ambiental

Avance Proyecto "Manejo subproductos del beneficio ecológico del café con tecnología Becolsub MaSBEK"

Mayra Alejandra Hernández Bautista<sup>1</sup> y Haimar Ariel Vega Serrano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Auxiliar Investigador Semillero SIXTRAK, Ingeniería Ambiental.ingmayrahdz@gmail.com

<sup>2</sup> Ingeniero civil. Especialista en Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Docente Ingeniería Ambiental, Universidad Libre Seccional Socorro. haimar.vega@mail.unilibresoc.edu.co

Recepción Artículo: Abril 25 de 2013. Aceptación 30 julio de 2013

INNOVANDO EN LA U ISSN 2216 - 1236

## RESUMEN

El beneficio ecológico del café guayaba con la tecnología Becolsub origina los subproductos pulpa y lixiviado los que generan altas cargas contaminantes, la forma inadecuada como están siendo manejados hace necesario realizar un tratamiento para disminuir los efectos negativos. Se evaluó el tratamiento de lixiviados de pulpa de

**Fotografía 1.** Concentrador solar parabólico



café mediante destilación y evaporación con concentradores solares parabólicos en la Hacienda Majavita (Socorro, Santander). Para determinar la carga hidráulica los concentradores se cargaban a las ocho de la mañana con un volumen específico para cada uno y a las tres de la tarde se medía el volumen evaporado por día. En el caso del destilador se revisó diariamente el volumen de agua destilada obtenida de la evaporación, condensación y destilación del lixiviado, al cual se le realizó análisis en el laboratorio para determinar la eficiencia en remoción de indicadores de carga contaminante del lixiviado tratado. El concentrador solar parabólico mediante evaporación directa se encuentra por encima de la media con un p-valor de 0,546 mayor a 0,05, y un incremento de carga hidráulica de 3,69 l/m<sup>2</sup> comparado con el concentrador mediante destilación de 2,44 l/m<sup>2</sup>, indicando que no hay diferencia significativa entre los dos tratamientos. El incremento más significativo fue de un volumen evaporado de 1806 ml de lixiviado con 7 horas de radiación solar. Los

análisis físico – químicos y microbiológicos (DQO, DBO5, grasas y aceites, color, coliformes, entre otros) que se le realizaron al lixiviado tratado mediante destilación, tiene remociones del 90% de los indicadores contaminantes, es decir, son removidos casi que en su totalidad. Se demostró que aunque no hay diferencia significativa entre los dos concentradores, hay un incremento en el concentrador solar parabólico mediante evaporación directa, indicando que este tipo de tratamiento es una alternativa viable para tratar el lixiviado en fincas con suficiente cantidad de radiación solar, contribuyendo con la disminución de carga contaminante. Además se demuestra que el tratamiento del lixiviado por medio de destilación es significativo, demuestra que este tipo de tratamiento es viable.

## Palabras clave:

Radiación solar, remoción, beneficio ecológico, carga hidráulica.

## I. INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos pueden clasificarse de muchas maneras, según el planteamiento o finalidad prevista. Recordemos que dicha clasificación depende del sistema productivo de la región y de los diferentes hábitos y costumbres locales. Igualmente existen otras externalidades que inciden en la producción de los residuos municipales tales como la misma demanda ambiental a la que está sujeta la explotación de una serie de recursos, tanto de tipo biótico como abiótico (Pineda, 1998: 55).

Se puede definir el lixiviado como el líquido que se filtra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión (Pineda, 1998: 235).

Cuando llueve, una cierta cantidad de agua entra en los rellenos sanitarios debido a que una parte se pierde en la escorrentía superficial y evapotranspiración, el agua restante se filtra a través de los residuos en el relleno sanitario y es contaminada con diversos componentes orgánicos e inorgánicos. La generación de lixiviado ocurre cuando las características absorbentes de los residuos son excedidas (capacidad de campo), produciéndose la percolación. (Pineda, 1998: 235). Las características de los lixiviados están íntimamente relacionadas con la cantidad producida, la naturaleza de los residuos y la etapa de estabilización en que se encuentra, variando de un relleno sanitario a otro y dependiendo de la estación del año.

Cuando el lixiviado penetra en las aguas de un río, el oxígeno es consumido por las bacterias, las cuales descomponen los compuestos orgánicos del lixiviado. Cuando la contaminación orgánica es grave, el río puede ser despojado de la totalidad del oxígeno con consecuencias fatales para la vida acuática aerobia (Pineda, 1998: 239).

El relleno sanitario, de acuerdo con la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), es una "técnica para la disposición de la basura en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin causar molestia o peligro para la salud y seguridad pública. Este método utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en el menor área posible,

reduciendo su volumen al mínimo practicable, y cubriendo la basura allí depositada con una capa de tierra con la frecuencia necesaria al fin de cada jornada" (Meléndez, 2004).

*Fotografía 2. Lixiviado del tanque de almacenamiento.*



Una vez se han enterrado los residuos sólidos es necesario minimizar los impactos de esta práctica. Para empezar, el agua que ha entrado en contacto con la basura recoge gran cantidad de las sustancias que originalmente estaban dentro del residuo, quedando de esa manera altamente contaminada. Esta agua se denomina lixiviado y es uno de los líquidos más contaminados y contaminantes que se conocen. De no recogerse adecuadamente y luego tratarse, el lixiviado puede contaminar a su vez aguas subterráneas, aguas superficiales y suelos. Por esta razón, y para evitar que esto ocurra, los rellenos sanitarios se impermeabilizan, se drenan apropiadamente y los lixiviados recogidos por estos drenes se deben tratar (Giraldo, 1997:1).

Una de las principales causas de la variabilidad de las características del lixiviado es la condición climática (temporadas seca y lluviosa), que hace que el lixiviado recolectado en los periodos secos presente mayores concentraciones, mientras que en los periodos lluviosos, la escorrentía provoca fenómenos de dilución (Torres, 2005:6).

Existen numerosas caracterizaciones de los lixiviados en donde se hace énfasis en su alto poder

contaminante. Se concluye usualmente que los lixiviados contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos. Estas características son importantes en cuanto nos indican qué es lo que toca removerle a los lixiviados durante su tratamiento (Giraldo, 1997:1).

El tratamiento de los lixiviados de los rellenos sanitarios es un problema difícil de resolver, tal vez, sin exageración, uno de los problemas más desafiantes en la ingeniería del tratamiento de las aguas residuales. Esta apreciación quizás ayuda a explicar la gran cantidad de tecnologías y de investigación que se ha realizado, y aún se realiza, alrededor del tema. En general puede decirse que todavía existe un gran campo para la innovación. Tal vez la solución final y racional consista en no producir los lixiviados, o al menos en producir lixiviados de características mucho menos contaminantes. Sin embargo, esta solución se podrá dar cuando se mire de una manera global el flujo de materiales en la sociedad y se internalicen los costos ambientales en todo el ciclo de los materiales, desde su producción, transformación, distribución, uso y descarte (Giraldo, 1999:7).

El manejo inapropiado de los subproductos generados en el proceso de cultivo del café genera impactos negativos de gran magnitud en el ecosistema cafetero, afectando tanto el suelo como el aire y agua. Los dos principales subproductos del café se generan durante el proceso de beneficio ecológico del fruto y son la pulpa y el mucílago. (Rodríguez, 2009)

Dado el riesgo que representa el desplazamiento de lixiviado en cualquier sitio de disposición final por la potencial contaminación hacia los cuerpos de agua, es indispensable realizar esta investigación que sirva como aporte para el manejo adecuado de los lixiviados producidos del beneficio de la pulpa del café.

## **I.1 Justificación**

La Universidad Libre, por ser en la actualidad uno de los mayores productores de café y por ende generadora de una gran cantidad de lixiviados, a

través de la energía solar y la implementación de un sistema sencillo y eficiente de evaporación y condensación con concentradores solares parabólicos, busca disminuir la carga contaminante a través de tratamientos enfocados en la degradación de la materia orgánica y el aprovechamiento ecológico que se le puede dar a los subproductos, determinando si las características de los sistemas de tratamiento de los lixiviados son eficientes.

Con esta investigación se pretende determinar las características de tratamiento de los lixiviados de concentración solar parabólica existentes en la Hacienda Majavita, realizando un seguimiento que permita evaluar, controlar y mejorar continuamente el correcto funcionamiento y eficiencia de los concentradores solares parabólicos de evaporación directa y destilación, generando nuevos mecanismos para controlar los impactos negativos que produce el lixiviado en el medio ambiente, medidas de control de los subproductos del café que lo generan y remoción de la carga contaminante, generando así beneficios no sólo a la comunidad de las fincas cafeteras cercanas a la Hacienda Majavita (Socorro, Santander), sino también en un futuro, posiblemente a las demás fincas cafeteras del pueblo que podrían hacer uso de estas tecnologías que son sencillas y eficientes.

## **I.2 Objetivo general**

Evaluar el tratamiento de lixiviados de pulpa de café mediante destilación y evaporación con concentradores solares parabólicos en la Hacienda Majavita.

## **I.3 Objetivos específicos**

- Identificar las propiedades de la producción de lixiviados de pulpa de café y sus características físico-químicas.
- Determinar la carga hidráulica de los concentradores solares parabólicos en evaporación directa y destilación.
- Evaluar la eficiencia en remoción de indicadores de carga en la destilación de lixiviados.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Localización del proyecto

Los sistemas utilizados para el desarrollo de la investigación están localizados en la Hacienda Majavita de la Universidad Libre – Seccional Socorro, a una elevación de 1350 msnm con una temperatura promedio de 24 °C, en la Vereda Alto de Chochos en el Socorro, perteneciente a la Provincia Comunera de Santander.

### 2.2 Tipo de investigación

Esta es una investigación de tipo cuantitativo - descriptivo, la información que se obtuvo a través de monitoreo, análisis de las muestras y resultados estadísticos permitieron verificar y cuantificar la eficiencia de los sistemas y el porcentaje de remoción de la carga contaminante durante los procesos de tratamiento en cada uno de los sistemas.

### 2.3 Variables

Las siguientes son las variables que se tuvieron en cuenta según los objetivos de investigación:

**Tabla 1.** Definición de Variables

Tipo De Variable	Variable	Unidad
Dependiente	Remoción	%
	Carga Hidráulica	l/m2 - día
Independiente	Tiempo	día
	Orientación de los concentradores	Dirección
Intervinientes	Radiación solar	Horas

### 2.4 Técnicas e instrumentos

Se realizaron diferentes técnicas para la recolección de datos, basadas en el monitoreo de cada sistema, a los cuales se le realizaron análisis estadísticos para observar su comportamiento y se describen a continuación:

Tres tipos de concentradores solares parabólicos (Destilador con Concentrador Solar Parabólico, Concentrador Solar Parabólico con Evaporación

Directa y Cubierta de vidrio y Concentrador Solar Parabólico con espejos), a los cuales se les realizó un seguimiento diario de campo, en el que se recopilaban datos como Altura Inicial, Altura Final, Volumen Evaporado, Carga Hidráulica, Radiación y Precipitación. Se le hizo seguimiento a cuatro composteras, a las cuales se les iba depositando pulpa cada 15 días, donde se observó el proceso de descomposición y la cantidad en mililitros de lixiviado que se obtenía de cada compostera por semana.

También se observó el comportamiento de la humedad de la pulpa; se realizaron estudios en el laboratorio de suelos, en los cuales se depositó la pulpa en el horno para su posterior secado, obteniendo así la humedad inicial y final de la pulpa de cada compostera.

La recopilación de la información de cada sistema se fue archivando en una base de datos en Excel, donde posteriormente se realizaron diferentes cálculos estadísticos para determinar la eficiencia de cada sistema a través del tiempo.

### 2.4 Equipos (sistema)

Para realizar el tratamiento de los lixiviados obtenidos de la pulpa de café, se adecuaron tres (3) sistemas de concentradores solares: Destilador con Concentrador Solar Parabólico, Concentrador Solar Parabólico con evaporación directa y cubierta de vidrio, y Evaporación con Concentradores Solares parabólicos con Espejos.

El destilador está compuesto por un canal de evaporación en lámina galvanizada de sección transversal circular, construido en lámina de

**Fotografía 2.** Concentrador solar parabólico para evaporación directa



ColdRolled de 220 centímetros de largo con un diámetro de 10 centímetros.

El Destilador, a diferencia del evaporador con cubierta de vidrio, tiene un sistema de condensación en forma de cubierta construido en acrílico translucido de tres milímetros y una adecuación de canales que transportan el lixiviado destilado a un punto de salida.

**Fotografía 3.** Destilador con concentrador parabólico.



El concentrador de Evaporación Directa está compuesto por un tubo PVC de 6" con diámetro interno de 15 cm y una altura de 45 cm, el recipiente de destilación es un tubo PVC de 4" con diámetro interno de 10 cm y una altura de 28 cm, se marcó el nivel de entrada donde se adecuó una manguera transparente para realizar la medición de variación en nivel.

Los Concentradores Solares Parabólicos con Espejos están hechos en lámina galvanizada y tienen un largo de 40 cm, ancho de 4,6 cm y área de 184 cm<sup>2</sup>.

**Fotografía 7.** Concentrador solar Parabólico con Espejos.



Se adecuaron cuatro (4) composteras, tres (3) con una capacidad de 130 kilogramos de pulpa y una (1) con 120 kilogramos, cada una tiene en la parte frontal una red de drenaje a partir de la cual se obtiene el lixiviado de la pulpa que está depositada en cada compostera y se almacena directamente en envases plásticos de tres (3) litros que están adecuados al sistema.

**Fotografía 8.** Composteras con la pulpa.



Cada compostera se cubrió con un plástico transparente para evitar la entrada de agua cubierto por un plástico negro para evitar la entrada de luz solar.

## 2.6 Materiales

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron la pulpa y el lixiviado.

La pulpa es uno de los subproductos del café, la cual se genera a partir del beneficio de éste, realizado en la Hacienda Majavita; de la descomposición y tratamiento de la pulpa depositada en las compostera y provenientes de la operación de la tecnología Becolsub, se obtuvo el lixiviado que se utilizó para los concentradores.

## 2.7 Procedimiento

Se realizó un análisis del volumen de lixiviado que se podría obtener del café guayaba (el beneficio y despulpe), primero se pesó un cuñete de café guayaba recién traído, después se pesó un cuñete con la pulpa producto del beneficio para ver la

diferencia en peso del café guayaba y la pulpa.

Con los 130 kilogramos de pulpa depositada en cada compostera, por día se revisó el volumen con un vaso de precipitado de 500 ml, esto para obtener la relación lixiviado-pulpa, es decir, la cantidad de lixiviado que se obtiene a partir de un volumen establecido de pulpa.

La primera compostera se llenó el día 11 de octubre, la segunda compostera quince (15) días después el día 26 de octubre, la tercera compostera cuatro (4) días después el 30 de octubre. El mismo procedimiento se hizo en una caneca de 200 litros pero a éste se le depositaron 120 kg de pulpa el día 13 de noviembre.

Al lixiviado obtenido de cada compostera se le realizaron análisis de color, turbiedad, pH, DBO5, DQO, sólidos totales y grasas y aceites en el laboratorio, para determinar sus propiedades y características físico-químicas.

Para establecer la humedad de la pulpa, antes de ser cubierta la compostera con los plásticos se toman tres muestras de la pulpa recién depositada, se llevan al laboratorio de suelos donde se pesan 100 gr de ésta por cada muestra en un recipiente de aluminio (la muestra que se saque de la compostera debe ser repuesta), se deja en el horno durante cuatro (4) días a una temperatura de 100°C, se pesa diariamente hasta que el peso no cambie. El mismo procedimiento se hace en las composteras cuando el volumen de lixiviado ya sea mínimo.

Para determinar la carga hidráulica de los dos diseños de concentradores solares parabólicos, lo primero que se hizo fue monitorear los sistemas con agua para ver que los concentradores estuvieran en buen estado (fugas, rupturas, oxidado, entre otros) y calcular un promedio de cantidad de lixiviado que se podría llegar a evaporar por día cada uno. Se repararon algunos daños y se empezó el tratamiento de lixiviados en los concentradores.

La recopilación de datos de los concentradores solares parabólicos por destilación y evaporación directa se realizó de lunes a viernes, cargando los concentradores con un volumen inicial de lixiviado de 24 centímetros a las siete y media (7:30) de la

mañana y a las cuatro (4) de la tarde se medía la disminución del nivel y se calculaba la cantidad de volumen evaporado; y con una probeta de 100 ml se medía el volumen de lixiviado destilado producto de la condensación y destilación generadas en el sistema.

Para obtener la relación de lixiviado – pulpa cada quince (15) días después de realizado el beneficio de café, se pesaron en cuñetes 300 kilogramos de pulpa y se depositaron en las composteras. Por semana se midió la cantidad de lixiviado obtenido de cada compostera y el tanque para obtener la relación lixiviado – pulpa (ml/kg). Fotografía . Secado de la pulpa en el horno (Humedad Inicial) También se halló la humedad inicial y final de la pulpa, para esto se tomaron tres muestras de 100 gramos de pulpa recién depositada en la compostera, se llevaron al laboratorio donde se pesaron e ingresaron al horno a una temperatura de 100 °C durante tres (3) días, hasta que su peso fue constante. El mismo procedimiento se hizo para hallarle la humedad final a la pulpa depositada en la compostera que llevaba varios días en proceso de descomposición y secado.

## 2.8 Muestra

Los monitoreos de cada sistema mostraron la capacidad de remoción de cada uno y también se tomaron en cuenta los parámetros físico-químicos y microbiológicos analizados en el laboratorio para obtener análisis que demostrara las condiciones óptimas de funcionamiento del sistema.

A los tres concentradores solares parabólicos con espejos con diferente orientación se les realizó monitoreo durante 51 días, desde el 13 de agosto hasta el 15 de noviembre de 2012.

Al concentrador solar parabólico con evaporación directa se le realizó monitoreo durante 18 días, desde el 19 de septiembre hasta el 15 de noviembre.

Al destilador con concentrador solar parabólico se le realizó monitoreo durante 10 días, desde el 19 de septiembre hasta el 15 de noviembre.

A las cuatro composteras se les realizó monitoreo, a la compostera #1 durante 36 días, la Compostera #2 durante 30 días, la compostera #3 durante 72 días y la compostera #4 durante 13 días; desde el mes de octubre hasta noviembre.

Para determinar la humedad de la pulpa, se le hizo monitoreo durante 3 días a cada muestra (3 muestras) en el mes de noviembre.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Producción de café guayaba

En la producción de café de la Hacienda Majavita se hace la recolección de café guayaba, la cosecha inicia en septiembre y culmina a finales de diciembre, este café es recolectado por mujeres acompañadas de hombres que se encargan de realizar el trabajo pesado. Para el caso del 2012 se tiene una curva de producción desde el día 24 de septiembre del 2012 hasta el 27 de noviembre de 2012.

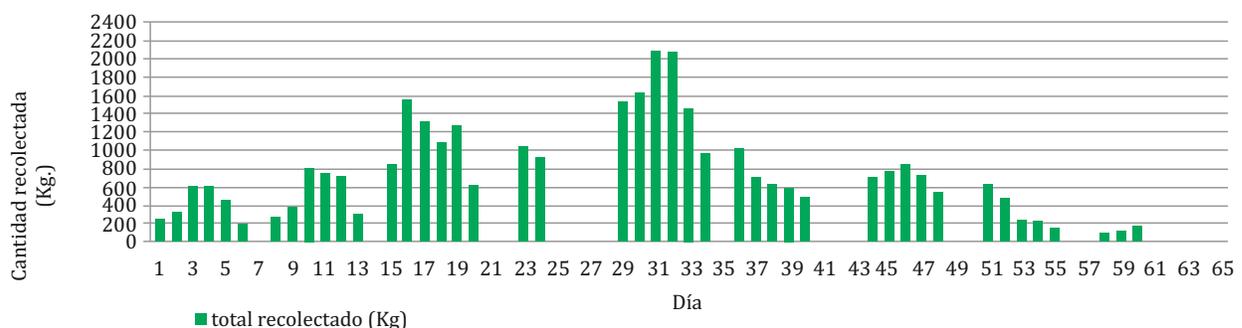
En la figura 1 se puede observar la curva de producción de café guayaba que se presentó en el año 2012, según el comportamiento de los datos en la figura se establece que la mayor producción de pulpa se presentó en el mes de octubre los días 9 con 1564,8 kg, 25 con 2094,4 y 26 con 1472 kg.

El total de café recolectado día en 33 días fue de un promedio de 516 kg/día con una producción máxima de 2,109 kg/día y un total de producción de café 33,568 kg de café guayaba.

#### 3.2 Producción de pulpa de café guayaba

Una vez realizada la recolección del café guayaba, éste es llevado hasta el sitio de acopio (beneficiadero), en donde se inicia el beneficio del café con el despulpado realizado mediante un módulo Becolsub modelo 600, el cual deja como resultado, además del grano de café, subproductos como la pulpa.

Figura 1. Producción de café Guayaba Hacienda Majavita 2012



La pulpa se pesó un total de 13 días en fechas entre el 27 de septiembre del 2012 y el 1 de noviembre de 2012, para identificar la cantidad de pulpa que se produce, de lo cual se pudo establecer que el 45% del café guayaba se convierte en pulpa.

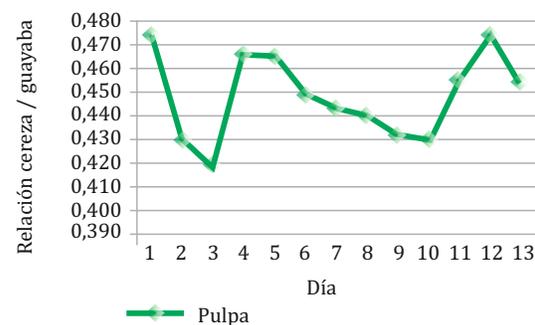
Debido a que no se le dejó entrada de aire a las composteras se formó fermentación, lo cual hizo que el olor de la pulpa se volviera más fuerte y al mismo tiempo se presentaron características más contaminantes.

#### 3.3 Producción de lixiviado de pulpa de café

De la compostera uno se obtuvieron aproximadamente 20 litros de lixiviado, de la compostera dos, ocho (8) litros y de la compostera tres, nueve (9) litros de lixiviado, cada una producto de 130 kg de pulpa depositada en las composteras, y en la caneca de 200 litros de la cual se obtuvieron 10 litros de 120 kg de pulpa.

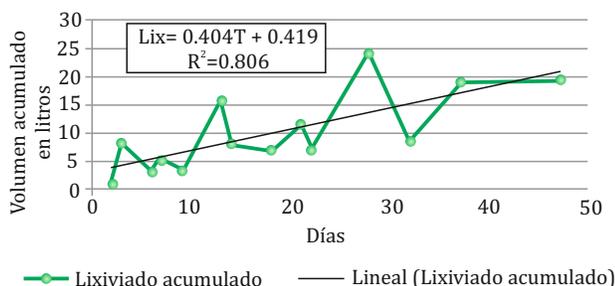
En la figura 3 se muestra el volumen acumulado de lixiviado que se produjo de la pulpa depositada en las composteras. El valor (T) es el día en el que la producción de lixiviado se estabilizó, el cálculo se

Figura 2. Producción de cereza o pulpa de café de la Hacienda Majavita 2012



realiza para obtener el valor en mililitros de lixiviado equivalente a los 37 días que duro el escurrido, mostrando que a los 37 días y con 130 kg de pulpa se obtienen 15,36 litros de lixiviado, que por cada kilogramo de pulpa se obtienen aproximadamente 118 ml de lixiviado y que de los 15,1056 kg de pulpa obtenidos del café guayaba en esta cosecha, se producen 1,7 l de lixiviado.

Figura 3. Relación del lixiviado acumulado en litros por día.



### 3.4 Humedad inicial de la pulpa

Después de realizarle el debido proceso a la pulpa, se obtuvieron seis muestras. En la Figura 4, se observa que con una desviación estándar de 1,5 la humedad inicial de la pulpa es de aproximadamente 80%.

### 3.5 Características físico-químicas de los lixiviados de pulpa de café

Se realizaron pruebas de DQO, DBO5, Sólidos totales, color aparente, turbiedad y Potencial de Hidrógeno, a muestras del lixiviado proveniente de las tres (3) composteras, una caneca de 200 litros y el tanque de almacenamiento principal a donde llega el lixiviado producto del beneficio, estos análisis se realizaron con el fin de identificar las características que tiene cada muestras.

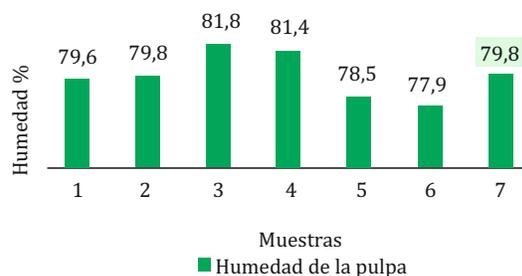
En esta investigación los resultados doblan las cantidades de producción (ver tabla 2), la causa de esto podría ser por el tipo de cubierta que se usó en las composteras donde se depositaba la pulpa, se utilizaron dos tipos de cubiertas, la translúcida y cubierta por un plástico negro para evitar el contacto con la radiación.

### 3.6 Carga hidráulica concentradores solares parabólicos

#### 4.6.1 Tratamiento de lixiviado por medio de evaporación directa y destilación

En la figura 5 se observa que existe una correlación entre la carga hidráulica del blanco acrílico y la carga

Figura 4. Humedad inicial de la pulpa



Fotografía 5. Lixiviado de las composteras - edades diferentes

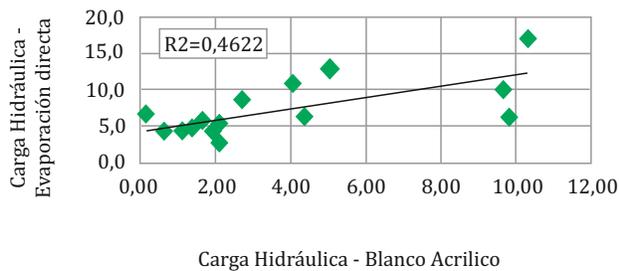


Tabla 2. Análisis Físico - Químicos y Microbiológicos del lixiviado obtenido de la pulpa.

Fecha	Edad del lixiviado (días)	Muestras de lixiviado	DBO5	DQO	Sólidos Totales	pH	Color aparente	Turbiedad
			mg/L	mg/L	Residuo (g)	H+	Pt/Co	UNT.
Oct - 31	20	Compostera # 1	24,000	34,350	18,669	6	270	110
Oct - 31	7	Compostera # 2	49,000	74,890	17,033	6	55,2	16
Oct - 31	2	Compostera # 3	38,000	67,410	1,626	6	46,9	6
Nov - 14	1	Tanque # 1	11,000	47,220	76,654	6	330	300
Nov - 14	32	Tanque de almacenamiento de lixiviado	26,000	125,080	28,936	5	850	30

hidráulica del concentrador solar de evaporación directa con un producto  $r = 0,68$  es decir, que la correlación es significativa. Frente al blanco acrílico no existe correlación.

**Figura 5.** Comportamiento de Cargas Hidráulicas de concentrador solar parabólico de evaporación directa respecto del Blanco acrílico.



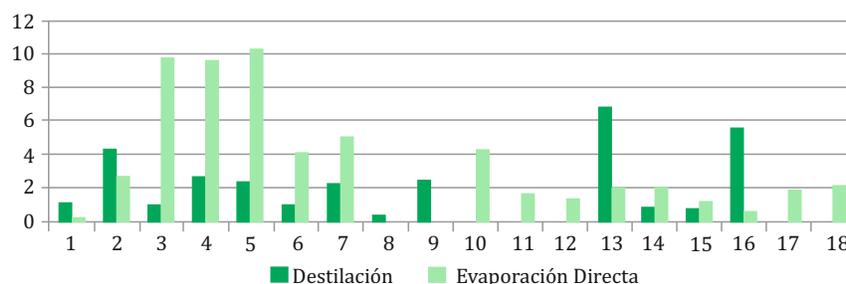
### 3.6.2 Tratamiento de lixiviado mediante destilación

La relación entre los dos concentradores solares demuestra que aunque no hay diferencia entre sus valores de evaporación, el Concentrador Solar parabólico de evaporación directa es mayor con un promedio en su carga hidráulica de 3,69 l/m<sup>2</sup> comparado con el de destilación con un 2,44 l/m<sup>2</sup>.

Como se observa en la figura 6, el concentrador de evaporación directa se encuentra por encima de la media, con un p-valor de 0,546, es decir, que es mayor a 0,05 lo que indica que no hay diferencia significativa entre los dos tratamientos.

Según el comportamiento de los datos en la figura se puede observar que el concentrador mediante evaporación directa tiene un promedio de 746 ml tratado por día contra un 465 ml de volumen evaporado por el concentrador de destilación. Esto es, que existe un incremento significativo frente al concentrador de destilación.

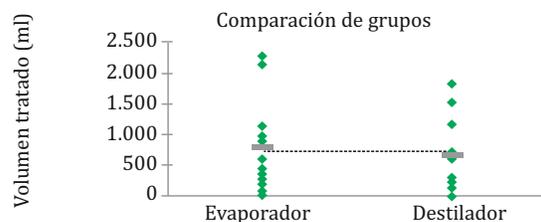
**Figura 6.** Relación Carga hidráulica de evaporación directa y destilación



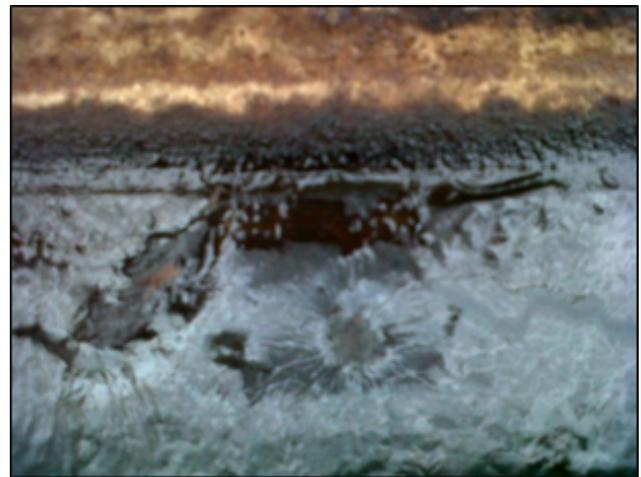
### 3.6.3 Posible causa de la baja eficiencia de los concentradores

Durante el tiempo que se realizó el monitoreo de los concentradores solares parabólicos, se empezó a observar el bajo desempeño de estos, se le realizó limpieza a los sistemas, pero la eficiencia siguió siendo muy baja, probablemente se debió a la capa superficial que se formó en el lixiviado depositado en el canal o a los hongos que se formaron en el recipiente y la unidad de control.

**Figura 7.** Comparación de la eficiencia del concentrador solar por evaporación directa y el de destilación



**Fotografía 6.** Capa formada en el lixiviado depositado en el canal de evaporación directa



La capa que se presenta en el lixiviado puede ser de grasas que se forman por la hidrólisis (reacción química entre una molécula de agua y otra molécula) de la materia orgánica, específicamente, por la hidrólisis de los lípidos que debe poseer el mucílago, otro de los subproductos del café que tiene relación directa con la pulpa.

En el desarrollo del análisis de la muestra se presentó un residuo que impidió el paso del lixiviado, siendo necesario separar la muestra para poder obtener la separación de grasas y aceites. Este residuo parece ser la mezcla de grasas y el material del canal (óxido flotante), los cuales forman una capa gruesa en la superficie del lixiviado.

*Fotografía 7.* Hongos formados en la unidad de control de lixiviado



*Fotografía 11.* Recolección de capa formada en el lixiviado depositado en los concentradores solares



Con un resultado de 0.04 gramos de la prueba de grasas y aceites, no hay descargas significativas de grasas y aceites en los lixiviados, los resultados son bastante bajos comparados con los mencionados en el Decreto 3930 de 2010; sin embargo, el material flotante proveniente del canal (óxido) podría ser la causa del bajo rendimiento, debido a que esa capa superficial formada en todo el canal es bastante densa y sólida. Esto podría impedir el paso de la radiación solar directamente al lixiviado del canal.

### 3.6.4 Tratamiento de lixiviado por evaporación mediante concentradores solares parabólicos con espejos

*Fotografía 12.* Residuos presentes en la separación de grasas y aceites de la muestra



Como se muestra en la figura 8, con 51 datos tomados la carga hidráulica, el promedio fue de 8,75 l/m<sup>2</sup> con una desviación estándar bastante dispersa. Según las direcciones del concentrador, se presentó un valor máximo de 11,39 en la dirección N – S y un mínimo de 10,08 NE – SW.

Con el método estadístico de comparación de grupos se puede observar de manera precisa la diferencia entre los tratamientos.

Como se observa en la figura 9, no se presenta diferencia entre los tratamientos con concentradores debido a que todos se encuentran por encima de la media; sin embargo, frente a los blancos hay un incremento significativo en la dirección N-S del concentrado.

Figura 8. Carga Hidráulica respecto a la dirección del canal.

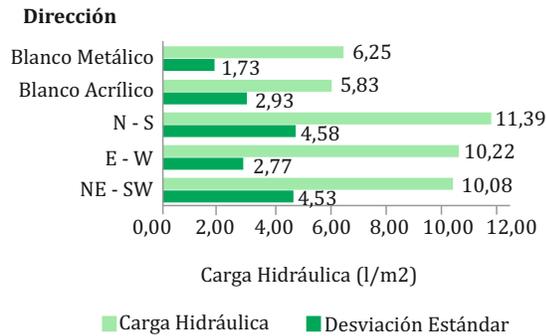
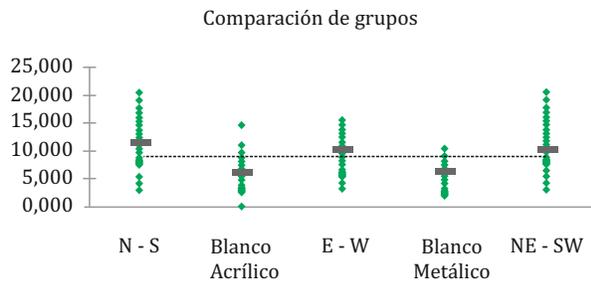
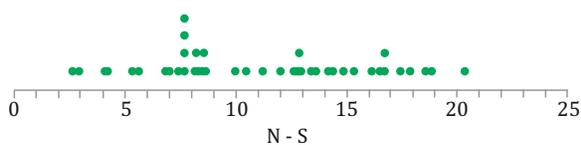


Figura 9. Comparación de los tratamientos frente a la carga hidráulica por comparación de grupos



Según el análisis del diagrama de puntos se puede inferir que en los datos tomados en la dirección N-S la mayor parte de la carga hidráulica se encuentra en un rango entre los 7 y 9 l/m<sup>2</sup>, tal y como se observa en la figura 8.

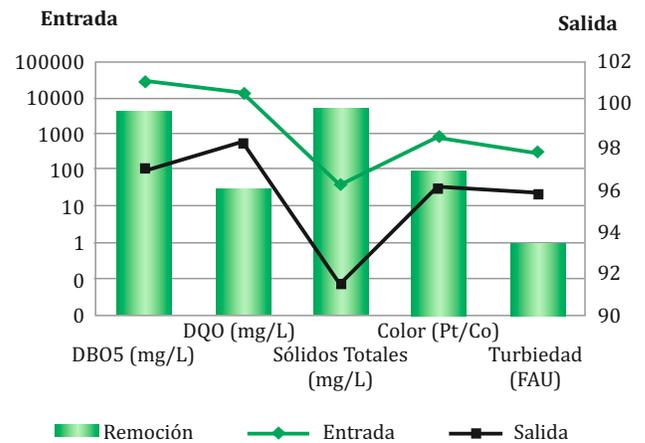
Figura 10. Diagrama de puntos del Tratamiento más significativo frente a los blancos



### 3.6.5 Eficiencia de remoción de carga en la destilación de lixiviados

Como se observa en la figura 11, mediante el tratamiento del lixiviado con el concentrador solar parabólico por medio de la destilación, los indicadores de contaminación del lixiviado tienen remociones superiores al 90%, es decir, que el tratamiento está teniendo una gran eficiencia a la salida respecto a los valores que se obtiene a la entrada. En el potencial de hidrógeno pH la entrada es de cinco (5) y la salida es de seis (6), esto indica que el agua destilada (lixiviado tratado) es un punto menos ácida que el lixiviado de entrada.

Figura 11. Remoción de Parámetros Físico – químicos del Agua destilada obtenida del concentrador solar parabólico con destilación



Del tratamiento del lixiviado en el concentrador solar parabólico mediante destilación se obtuvo agua destilada, a ésta se le realizaron análisis microbiológicos y físico-químicos para determinar la remoción de contaminantes y sus características. Los datos que se obtuvieron son los siguientes:

Tabla 3. Eficiencia de tratamiento de lixiviado mediante destilación

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	Remoción
pH	und pH	5	6	
Turbiedad	(FAU)	300	20	93,3%
DBO5	mg/L	26,000	100	99,6%
DQO	mg/L	12,508	505,1	99,6%
Color	Pt/Co	850	26,6	96,9%
Sólidos Totales	mg/L	28,936	0,064	99,8%

Estos resultados se pueden comparar con los datos obtenidos del tratamiento de lixiviados mediante destilación solar realizado en una investigación anterior (Vega, 2012: 10) la diferencia es bastante significativa en todos los parámetros, arrojando concentraciones más bajas el lixiviado que se trató en esta investigación (agua destilada obtenido a la salida).

**Tabla 4.** Eficiencia de tratamiento de lixiviado mediante destilación

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	Remoción
pH	und pH	4.10	3.31	
Turbiedad	UNT	1,100	4	99.6%
DBO5	mg/l O2	71,000	19000	73.2%
DQO	mg/l O2	87,810	9148	89.6%
Color	UPC	6,930	14	99.8%
Sólidos totales	mg/l	69,135	515	99.3%

Teniendo en cuenta que aún no hay una norma que establezca los parámetros por evaluar del lixiviado, para determinar el porcentaje de remoción de la destilación de los lixiviados se toma en consideración el Decreto 1594 de 1984 que reglamenta los usos del agua y residuos líquidos, indicando los análisis pertinentes que se deben realizar periódicamente y así determinar si hay sustancias de interés sanitario que requieren análisis de uso prioritario. Teniendo en cuenta este decreto se considera que según el Art 72. Todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir, por lo menos, con las siguientes normas:

La remoción en los parámetros de DBO5 y DQO del lixiviado tratado fue significativa según los valores que se obtuvieron en los análisis, los cuales removieron en DQO un 95,96% y DBO5 un 99,61%, cumpliendo con el valor máximo permisible.

**Tabla 5.** Parámetros de vertimiento sobre cuerpos de agua

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	Remoción %	Valor máximo permisible
pH	und pH	5	6		5 a 9 unidades
Turbiedad	(FAU)	300	20	93,3	
DBO5	mg/l	26,000	100	99,6	Remoción = 80% en carga
DQO	mg/l	12,508	505,1	99,6	Remoción = 80% en carga
Color	Pt/Co	850	26,6	96,9	20 unidades, escala platino - cobalto
Sólidos totales	mg/l	28,936	0,064	99,8	Remoción = 80% en carga

El artículo 38 del Decreto 1594 de 1985, dice que los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico son los que se relacionan a continuación, e indican que para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional: Coliformes totales (NMP) 20.000 microorganismos/100 ml y Coliformes fecales (NMP) 2.000 microorganismos /100 ml.

Según el Art. 38 del Decreto 1594 de 1985 y los datos obtenidos del análisis al lixiviado tratado (agua destilada), se concluye que el rango de coliformes totales y fecales cumple con el valor máximo permisible establecido.

**Tabla 6.** Análisis microbiológicos del agua destilada

Fecha	Coliformes Fecales (UFC)	Coliformes Totales (UFC)
nov - 01	40	900
nov - 14	22	1,152

## 4. DISCUSIÓN

La diferencia entre los resultados de las investigaciones es evidente, en esta investigación los resultados doblan las cantidades de producción de lixiviado y la humedad de la pulpa, la causa de esto podría ser por el tipo de cubierta que se usó en las composteras donde se depositaba la pulpa, ya que Vega y Rojas (2012) utilizaron una cubierta plástica traslucida la cual permite que la radiación solar le llegue directamente provocando el secado más rápido de la pulpa y por ende, menos lixiviado y humedades más bajas. En esta investigación se utilizaron dos tipos de cubiertas, la translucida y cubierta con un plástico negro para evitar el contacto con la radiación.

En investigaciones anteriores (Vega y Rojas, 2012: 7) sobre la producción y humedad de la pulpa y el lixiviado proveniente de ésta, se estableció que con las muestras de pulpa, la cantidad de lixiviados producidos es de un promedio de 45 mililitros de lixiviado por kilogramo de pulpa, con una humedad promedio de la pulpa establecida en un 30% con una desviación estándar de dos, un máximo de 32 y un mínimo de 27. En general, con esta investigación se determinó que por cada kilogramo de pulpa se obtienen aproximadamente 118 mililitros de lixiviado, la humedad inicial de la pulpa se estableció en aproximadamente 80% con una desviación estándar de 1,5 un máximo de 81,8% y un mínimo de 77,9%.

Según Villamizar (2010) la cantidad de lixiviados producidos es de 100 mililitros por kilogramo de pulpa, en esta oportunidad se redujo significativamente por utilizar una cubierta translúcida en las composteras, las que permiten el paso de la radiación solar logrando evaporar gran parte de la humedad.

Según Rodríguez Valencia, (2010: 15) La pulpa es un subproducto con alto contenido de humedad alrededor del 80% y es abundante en época de cosecha. En esta investigación se obtuvo que con una desviación estándar de 1,5 la humedad inicial de la pulpa es de aproximadamente 80%.

Según Rodríguez Valencia (2010: 2) el procesamiento del fruto del café representa en base húmeda alrededor de 46,6% del peso del fruto fresco, en esta investigación se obtuvo que el 45% de café guayaba se convierte en pulpa.

Los resultados del tratamiento de lixiviados mediante destilación solar se pueden comparar con los datos obtenidos en una investigación anterior (Rojas, 2012: 10) la diferencia es bastante significativa en todos los parámetros, especialmente en la remoción en los parámetros de DBO5 con un 99,61%, y DQO con un 95,96% comparado con los resultados de la investigación de Rojas, con un porcentaje de remoción en DBO5 de 73, 2%, y DQO de 89,6%.

Según Carreño et al, (2011: 70) El concentrador solar parabólico de espejos dio como resultado un promedio de carga hidráulica de 7,6 l/m<sup>2</sup> con una desviación estándar de 2,3 respecto al testigo metálico y acrílico, mientras que en esta investigación el incremento de la carga hidráulica fue de 11,39 l/m<sup>2</sup> con una desviación estándar de 4,6.

## 5. CONCLUSIONES

En la producción de café registrada entre la 24 de septiembre y el 27 de noviembre de 2012, se obtuvo un total de producción de café guayaba de 33,568 kg, del cual el 45% es equivalente a 15,105 kg que se convierte en pulpa produciendo 1,770 litros de lixiviado. Por cada 130 kg de pulpa depositada en las composteras se obtienen aproximadamente 15 litros de lixiviado, es decir, por cada kilogramo de pulpa se obtienen 118 ml de lixiviado.

El concentrador solar parabólico mediante evaporación directa, se encuentra por encima de la media, con un p-valor de 0,5460 es decir que es mayor a 0,05 indicando que no hay diferencia entre los dos tratamientos, sin embargo el concentrador mediante evaporación directa tiene un incremento significativo con un promedio de evaporación de 8,5 litros y una carga hidráulica de 32,08 l/m<sup>2</sup> comparado con un volumen promedio de evaporación del concentrador mediante destilación de 1,7 litros y una carga hidráulica de 7,81 l/m<sup>2</sup>.

Se demostró que la carga hidráulica del concentrador solar de evaporación directa tiene un coeficiente de correlación con al menos uno de los tratamientos, en este caso con el blanco acrílico con una correlación de 0,68. Además, en los datos obtenidos por destilación no se encuentra una correlación característica con la radiación solar y tampoco con ningún blanco.

Se determinó que la radiación solar que llega al concentrador solar parabólico por medio de destilación, sólo fue efectiva los primeros días, pues se supone que a mayor radiación solar se debe presentar un mayor volumen de destilación y esto sólo sucedió en el 40% de los datos obtenidos.

Se determinó que el concentrador de evaporación directa se encuentra por encima de la media, con un p-valor de 0,5460, es decir que por ser  $< 0,05$  muestra una diferencia significativa entre los dos tratamientos, siendo más eficiente el concentrador solar parabólico de evaporación directa con un promedio de 746 ml evaporado por día contra un 465 ml de volumen evaporado por el concentrador de destilación.

Con un promedio de evaporación de 1,7 l/día, se necesitarían por lo menos cinco concentradores para evaporar el lixiviado producido en esta cosecha (1,770 litros) en por lo menos siete meses de tratamiento. Lo que indica que el sistema está mostrando un bajo desempeño.

Los análisis físico – químicos y microbiológicos que se le realizaron al lixiviado tratado mediante destilación demuestran que este tipo de tratamiento es viable, pues la mayoría de sus indicadores contaminantes son removidos casi que en su totalidad como se demostró en los resultados obtenidos, lo que indica que este tipo de tratamiento es una alternativa viable para tratar el lixiviado y que a gran escala podría ser utilizado en rellenos sanitarios para contribuir con la protección del medio ambiente.

Se demostró que no hay diferencia característica entre las direcciones de los concentradores, debido a que todos se encuentran por encima de la media, sin embargo frente a los blancos hay un incremento significativo en la dirección N-S del concentrador, lo que indica que al menos en uno de los tratamientos hay una diferencia significativa.

### 5.1 Planes para el trabajo futuro

Continuar con las pruebas utilizando lixiviados provenientes de la pulpa de café, y otro tipo de material (que no se oxide) para los canales de los concentradores solares parabólicos.

Buscarle otro tipo de tratamiento a la pulpa de café, debido a la gran cantidad que se obtiene de esta durante la cosecha.

### 5.2 Agradecimientos

Agradecimientos por su colaboración en todo el proceso de esta pasantía, a los docentes calificadores Ingeniero William Tolosa y PhD Mario Barón, también al Ingeniero Edgar Mauricio Sanmiguel y el Ingeniero Darío Naranjo Fernández, por sus apuntes y correcciones fueron de gran ayuda para la culminación de este proyecto.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEPIS/OPS. Programa Regional HEP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Serie: Filtración Lenta. Manual II – Diseño, junio 1992.

Giraldo, Eugenio. 1997. "Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos". Tratamiento de Lixiviados de rellenos sanitarios. Facultad de Ingeniería.

Giraldo, Eugenio. 2010. "Tratamientos de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes". Universidad de los Andes. Págs. 44 – 45.

Jay Carreño, Jaime Huberto y Vega Serrano, Haimar Ariel. 2011. Tratamiento de lixiviados de pulpa de café mediante destilación solar. Informe final de pasantía. Ingeniería Ambiental. Universidad Libre Seccional Socorro.

Pineda, Samuel Ignacio. Manejo y Disposición de residuos Sólidos Urbanos. 1998. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACODAL). Págs. 55 – 239.

Torres Lozada, Patricia, Jenny Alexandra Rodríguez, Luz Edith Barba, Adriana Moran y Jorge Narváez. 2005. Tratamiento Anaerobio de lixiviado en reactores UASB. Ingeniería y Desarrollo Universidad del Norte. Pág.3  
En: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/852/85201804.pdf>

Rodríguez Valencia, Nelson, Zambrano Franco, Diego Antonio. Cenicafé. 2010. Los subproductos del café: Fuentes de energía renovable. ISSN – 0120 – 0178. Programa de investigación científica. Pág.2

Rojas, Ricardo. 2002. "Gestión integral de tratamiento de aguas residuales". Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. CEPIS/OPS-OMS, págs.: 3

Vega S. Haimar Ariel y Martínez, C. Holger Fredy. 2011. Adaptación SMTA al tratamiento de aguas residuales del beneficio ecológico del café con módulo Becolsub. Revista El centauro: Expresión Libre Comunera. ISSN: 2027-1212. Universidad Libre Seccional Socorro. 26 p.

Vega Serrano, Haimar Ariel. 2009. Alternativa de manejo para los subproductos del beneficio ecológico del café MaSBEK. Colombia, El Centauro: Expresión Libre Comunera ISSN: 2027-1212. Universidad Libre Seccional Socorro. 2 ed. págs. 7 - 18.