



## Diagnóstico del tratamiento de aguas residuales mediante los sistemas Cenicafé y Majavita del beneficio ecológico del café con módulo Becolsub en la Hacienda Majavita



Lady Alexandra Salazar Salas, Ruth Yesenia Quiroga Mateus, Luis Fernando Castillo Rojas<sup>1</sup>  
Haimar Ariel Vega Serrano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Auliales de investigación, egresados Ingeniería Ambiental, Semillero SIXTRAK,  
lady.salas@hotmail.com, ruthyesenia@hotmail.com, [luisfer-castillo@hotmail.com](mailto:luisfer-castillo@hotmail.com)

<sup>2</sup>Investigador principal, 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](mailto:haimar.vega@mail.unilibresoc.edu.co)

Recepción Artículo: Abril 25 de 2013. Aceptación 24 julio de 2013

INNOVANDO EN LA U ISSN 2216 - 1236

### RESUMEN

**Problema Central:** En el proceso de beneficio del café se originan los subproductos pulpa y aguas mieles, los cuales contienen altas concentraciones de carga orgánica contaminante y pueden generar un impacto negativo al tener contacto con los recursos del medio ambiente debido al desecho indiscriminado sin previo tratamiento de estos.

**Fotografía 1.** Tratamiento aguas residuales del café Hacienda Majavita



**Objetivo:** El objetivo de este proyecto consistió en el diagnóstico del manejo de las aguas residuales del beneficio ecológico del café con la tecnología Becolsub en la Hacienda Majavita, con el fin de mejorar la calidad del ambiente y garantizar la eficiencia en el tratamiento de estos subproductos. **Metodología:** Se desarrolló un proceso de cuantificación de los subproductos mediante el pesaje y monitoreo de las unidades que integran los dos sistemas. Para mejorar la remoción de material contaminante en los sistemas de tratamiento se diseñó, construyó e implementó una nueva unidad, reactor UASB (upflow anaerobic sludge blanket), el cual fue instalado al final de los dos sistemas de tratamiento y dispuesto para las futuras cosechas. **Resultados:** La evaluación de los sistemas de tratamiento mostró que el comportamiento

de la materia orgánica varió de un sistema a otro, el sistema de tratamiento Cenicafé logro remoción total del 86,3% DQO y 89,7% DBO5. Se puso en operación el reactor anaerobio UASB, con el cual se incrementó la remoción de carga contaminante y se evaluó su comportamiento mediante el seguimiento de indicadores físico-químicos, también se diseñó el nuevo sistema de tratamiento para la Hacienda Majavita. **Conclusión:** La cuantificación de los subproductos generados en el proceso de beneficio de café permitió concluir que los sistemas de tratamiento existentes presentan una capacidad inferior a la requerida para el manejo de las aguas mieles, teniendo en cuenta que las producciones de café a futuro tienden a aumentar.

### Palabras clave

Agua miel, beneficio del café, carga orgánica, remoción, tratamiento biológico.....

## I. INTRODUCCIÓN

En la provincia Comunera del departamento de Santander, uno de los procesos productivos agrícolas se basa en el cultivo de café, fruto con un proceso de transformación que implica el uso tanto de energía eléctrica para el funcionamiento del módulo de cerezado, como de agua para realizar el lavado del grano, esta última viéndose directamente afectada en sus características físicas, químicas y microbiológicas por los componentes propios que segrega el grano, así mismo se generan residuos los cuales al igual que el agua del lavado requiere un manejo previo antes de ser dispuestos en el ambiente natural.

El proceso de beneficio tiene marcada influencia sobre la calidad del café, este permite conservar o degradar las características sensoriales, de tal forma que en el mercado mundial se distinguen los cafés procesados por la vía húmeda y seca. El café colombiano es calificado como "suave lavado" por el proceso húmedo empleado (Toledo, 2003:20).

En la Hacienda Majavita se cuenta con cultivo de café orgánico de variedad castillo, siendo éste beneficiado mediante un proceso de cerezado ecológico en el módulo Becolsub, consumiendo un litro de agua por kilogramo de café seco.

Los sistemas modulares de tratamiento anaerobio (SMTA) fueron diseñados para descontaminar las aguas residuales generadas en el lavado del café en el beneficio tradicional húmedo, donde se retira el mucílago o baba del café por el método de fermentación natural. Son componentes esenciales de los sistemas modulares los reactores hidrolíticos-acidogénicos RHA, la recámara de dosificación RD, y el reactor metanogénico RM, construidos en tanques plásticos.

Para el buen manejo del sistema de tratamiento de aguas residuales se debe realizar una correcta inoculación, aclimatación y arranque de los reactores que componen el sistema para mantener un buen funcionamiento de este. No obstante durante su operación pueden ocurrir periodos de funcionamiento deficiente o acidificación en la fase metanogénica, otro de los puntos relevantes para el tratamiento de este tipo de aguas es el potencial de

hidrógeno, en el cual se debe evitar la acidificación de los reactores porque su recuperación requiere mucho trabajo y tiempo.

Los subproductos generados en el beneficio ecológico del café requieren un tratamiento especial para disminuir la concentración de carga contaminante y así contribuir a mantener el equilibrio en el ecosistema, conservando las características propias del suelo, agua y entorno de las fincas cafeteras.

Debido al manejo de aguas residuales generadas en el beneficio del café complejo en fincas cafeteras de minifundio, se han implementado sistemas modulares de tratamiento anaerobio SMTA, que son ideales por lo prácticos, funcionales y eficientes en la descontaminación en un 85% a 90% en su etapa final. Pero el costo de tener este tipo de sistema ha originado la creación e implementación de sistemas de bajo costo por extensionistas comprometidos con este proceso y caficultores avanzados. Utilizando materiales de la finca, logran construir los sistemas artesanales de depuración, como ellos mismos han llamado a este tipo de manejo, en los cuales se ha establecido una remoción en total del 65% al 70% en su etapa final (Noguera, 2012:11).

*Fotografía 2. Agua residual del beneficio mecánico.*



En la Universidad se trabajó en la adaptación del SMTA para el tratamiento de las aguas mieles producto del beneficio con desmucilagador mecánico, con concentraciones de carga mayores al beneficio tradicional, como las que se aprecian en la fotografía 2.

## 1.1 Pregunta problema

¿Cómo es el comportamiento del tratamiento de las aguas residuales mediante los sistemas Cenicafé y Majavita del beneficio ecológico del café, con módulo Becolsub en la Hacienda Majavita?

## 1.2 Objetivo General

Determinar el comportamiento del tratamiento de las aguas residuales mediante los sistemas Cenicafé y Majavita del beneficio ecológico del café, con módulo Becolsub en la Hacienda Majavita.

## 1.3 Objetivos Específicos

Ø Identificar el comportamiento de la generación de los subproductos del beneficio del café con módulo Becolsub.

Ø Evaluar la remoción de carga contaminante en los sistemas de tratamiento de agua residual del café Cenicafé y Majavita.

Ø Establecer las características de funcionamiento del reactor anaerobio UASB para incrementar la eficiencia en remoción del sistema.

## 2. METODOLOGÍA

El proyecto de investigación se llevó a cabo en la Hacienda Majavita de la Universidad Libre Seccional Socorro, a una elevación de 1387 msnm con temperatura promedio de 24 °C, en la Vereda Alto de Chochos en el Socorro, provincia Comunera de Santander.

### 2.1 Clasificación de la investigación

El tipo de investigación es cuantitativa, teniendo en cuenta que el propósito fue obtener información a partir de la toma de datos del beneficio y los respectivos monitoreos del sistema y de esta forma cuantificar la cantidad de subproductos obtenidos y del mismo modo, la remoción de carga contaminante durante el proceso en cada uno de los sistemas de tratamiento. El alcance de la investigación es descriptiva por cuanto se describió el manejo dado a los subproductos del beneficio ecológico del café y las características de los sistemas de tratamiento de la Hacienda Majavita, en los cuales se implementarán procesos para mejorar

la eficiencia en remoción de carga contaminante,

teniendo como base el balance de materia del beneficio.

### 2.2 Variables

Las variables establecidas para describir el comportamiento de los sistemas fueron los presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Variables de la investigación

Tipo Variable	Variable	Unidad
Dependiente	Remoción de parámetros contaminantes	%
Independiente	Tiempo de operación	días
Interviniente	Producción de café	Kg
	Temperatura ambiente	°C
	Tiempo retención hidráulico	Horas
	Potencial de hidrogeno	Und pH

Los indicadores establecidos para determinar la remoción en las unidades de los sistemas son los de la tabla 2, definidos según la normatividad y los requerimientos de los sistemas.

Tabla 2. Indicadores

Indicador	Unidad	Técnica
Potencial hidrogeno	Unidades de pH	Potenciométrica
DQO	mg/l O <sub>2</sub>	Reflujo - colorimétrica
Turbiedad	NTU	Colorimétrica
Color	Pt - Co	Colorimétrica
DBO <sup>5</sup>	mg/l O <sub>2</sub>	Incubación 20°C

### 2.3 Técnicas e instrumentos

Los datos recopilados se obtuvieron mediante cuatro monitoreos realizados en cada uno de los sistemas de tratamiento ubicados en la Hacienda Majavita, las muestras fueron tomadas puntualmente a la entrada y salida de cada una de las unidades de tratamiento; Cenicafé y Majavita. Para la toma de muestras se utilizaron los elementos de protección personal como guantes, botas de caucho y tapabocas, así mismo

botellas plásticas de 1,5 litros. Para la unidad (UASB) se tomaron cuatro muestras a la entrada y salida de esta unidad, además se realizó el respectivo muestreo a cada una de las válvulas de dicha unidad, cada una de las muestras recolectadas del sistema Majavita, Cenicafé y el UASB fueron llevadas al laboratorio de aguas para realizar los análisis.

## 2.4 Materiales

Los materiales utilizados incluyen las aguas mieles y la cereza producidas por el beneficio del café en la Hacienda Majavita, para el tratamiento de estos residuos se evaluaron dos clases de sistemas de tratamiento el Cenicafé y el Majavita. Los cuales constan de:

**Sistema Majavita:** compuesto por un separador hidráulico de 1000 litros, dos sedimentadores de 1500 litros, una tanquilla de distribución de 250 litros, dos reactores metanogénicos de 2000 litros.

**Sistema Cenicafé:** compuesto por un separador hidráulico de 1000 litros, dos reactores hidrolíticos-acidogénicos de 500 litros, tanquilla dosificadora de 250 litros y dos reactores metanogénicos de 500 litros y por ultimo un reactor UASB.

Un tubo de 12 pulgadas para realizar la construcción del reactor UASB se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros de diseño:

**Tabla 3.** Parámetros de diseño UASB

Parámetro	Valor	Unidad
$V_R=$	0,18	$m^3$
$L=$	2,85	m
$F=$	4,62	Kg/día
$A_{reactor}=$	0,062	$m^2$
$Ch=$	0,356	m/h

Se utilizaron tubos de digestión de 1.5 ml, termoreactor, fotómetro, para realizar las respectivas mediciones.

## 2.5 Equipos de medición

En las mediciones realizadas en el laboratorio se utilizaron los siguientes equipos:

- Oxitop.
- Turbidímetro.
- Sensor de pH.
- Fotómetro.
- Balanza analítica.

## 2.6 Procedimiento

Los datos fueron tomados durante la cosecha del año 2012 iniciando a mediados de septiembre y culminando en diciembre. Teniendo en cuenta la cantidad de café guayaba recolectado diariamente, se midió el consumo de agua, producción de mucílago, aguas mieles y pulpa por kilogramo de café guayaba beneficiado. Así mismo se inocularon los reactores metanogénicos del sistema Cenicafé y el reactor UASB, para obtener una cepa microbiana con capacidad de consumo de materia orgánica.

El proceso de inoculación de los reactores metanogénicos se desarrolló de la siguiente manera:

1. Se tomó estiércol de ganado en proporción tres a uno en un tanque plástico, por cada balde de estiércol dispuesto en el tanque se disponía tres de agua, esta mezcla se dejó en reposo por una semana y luego se retiraron los sólidos haciendo pasar la mezcla por un angeo, el líquido colado se llevó a los reactores metanogénicos depositando en el reactor de 500 litros un total de 175 litros de inoculo y en el reactor de 250 litros una cantidad igual a 88 litros de inoculo.
2. Después de almacenado el inoculo en los reactores, estos se llenaron con 275 litros y 138 litros de agua residual respectivamente, la solución cubrió totalmente los trozos de botellas plásticas ubicados en cada reactor con anterioridad para servir de soporte a la cepa de microorganismos por formarse, se adicionó a cada reactor una cantidad equivalente a 375 gramos y 188 gramos de cal masilla teniendo en cuenta el volumen de cada uno de estos, también 63 y 31 gramos de urea comercial y se mezcló bien.
3. Finalmente en el proceso de inoculación se taparon los reactores y se dejó transcurrir cuatro semanas antes de comenzar a circular el agua procedente de los reactores hidrolíticos acidogénicos, a los cuales durante este tiempo se les adicionó 250 gramos de cal masilla para regular el potencial de hidrógeno del agua residual.



En la cuantificación de los subproductos generados en el despulpado fue necesario la recopilación de datos una vez ingresa el café a las instalaciones del beneficiadero, cuando se lleva a cabo la recepción del grano se procede a pesar la cantidad de fruto recolectado, seguidamente al iniciarse la de extracción del grano verde, se observa la apropiada operación del módulo Becolsub, luego se medía la cantidad de subproductos generados para realizar el análisis de la relación de grano obtenido respecto a la cantidad de subproductos sólidos y líquidos producidos.

Se determinó la cantidad de agua para lavar un kilogramo de café guayaba o fruto recolectado fresco realizando la medición del tanque de almacenamiento de 1000 litros el cual alimenta el desmucilagador. Las mediciones realizadas se hicieron en el cambio del nivel del agua, al inicio y al final del beneficio; siendo necesario en los días de recolección pico llenar varias veces el tanque, el tratamiento estadístico de los datos obtenidos se hizo mediante el macro de Excel y Megastat.

Los porcentajes de producción de pulpa fueron determinados así: la pulpa se pesó al final cada beneficio monitoreado; en un cuñete de 20 litros el cual fue pesado 10 veces para obtener un peso promedio del cuñete lleno de pulpa, restando el peso del mismo, vacío. Debido a la gran cantidad de pulpa que se debía pesar, se estableció el peso promedio de cada cuñete lleno de pulpa fresca, para luego contar cuántos cuñetes se llenaron con la pulpa generada en cada beneficio, obteniendo el peso y luego el porcentaje de pulpa generada del café guayaba recolectado en el día.

El porcentaje de mucílago, fue determinado mediante la medición del consumo de agua potable en el tanque del beneficiadero, el cual tiene una capacidad de 1000 litros por medio del volumen del cono truncado y posterior medición de la producción de aguas mieles, teniendo en cuenta la densidad del mucílago puro que fue de 0.91 g/ml obtenida por medio de un proceso realizado en el laboratorio, en el cual se usó picnómetro con el que se calculó dicha densidad, con este resultado se determinó el volumen producido y luego el peso del mismo, con el cual se obtuvieron los porcentajes de mucílago producidos en el desmucilagado en los días que se

monitoreo el beneficio. Para obtener la diferencia de volúmenes, el agua miel de salida fue conducida a un separador hidráulico vacío al cual se le determinó el volumen usando la fórmula para el cono truncado. El volumen de mucílago resultante es la diferencia entre el volumen de agua a la entrada y de salida de aguas mieles de cada cochada, dicho volumen se multiplicó por la densidad del mucílago determinada en laboratorio, para obtener el peso en kg del mucílago producido para determinar qué porcentaje representa este en el café beneficiado.

*Fotografía 3. Sistemas de tratamiento.*



La segunda parte comprende la evaluación de los sistemas de tratamiento, Cenicafé y Majavita respectivamente, para esto se toman muestras a la salida de las unidades que comprenden los sistemas y son llevadas al laboratorio de aguas de la Universidad Libre, donde se analizan indicadores de materia orgánica y sólidos, expresados como DQO con la técnica reflujó-colorimétrica, DBO5 con la técnica analítica Incubación a 20°C, pH con la técnica Potenciométrica, turbiedad y color aparente aplicando la técnica Colorimétrica y sólidos totales con la técnica Gravimétrica, con el fin de determinar la remoción de estos parámetros contaminantes. Se debe tener en cuenta que con anterioridad a los días de beneficio se acondicionan los sistemas de tratamiento y se realizaba la inoculación de los reactores Metanogénicos para climatizar la cepa de bacterias que consumirán la materia orgánica.

En la realización del inóculo para el reactor UASB se requirió de un lodo granulado bien formado para así proceder del mismo tipo de agua residual de donde

se venía tratando, en este caso del agua residual del café se extrajo lodo de los reactores metanogénicos, los cuales contaban con un tiempo de maduración de siete meses, se ingresó al rector UASB, por último se llenó el reactor UASB con agua residual del café dejándolo con un tiempo de retención de ocho días; con esto se da paso a la puesta en marcha del reactor.

## 2.7 Recopilación de datos

Los datos fueron recopilados por medio de monitoreos realizados a lo largo de la cosecha del año 2012 en los cuales se cuantificaron los subproductos y las eficiencias en remoción de los sistemas de tratamiento mediante análisis en el laboratorio de aguas.

Todos los datos se recopilaron en un formato previamente establecido.

## 2.8 Población y muestra

Para el desarrollo de esta investigación se llevó a cabo primero, el pesaje de la cantidad de fruto recolectado diariamente durante todo el tiempo que dura la cosecha, paralelo a esto se cuantificaron también la cantidad de subproductos generados después de realizado el beneficio, es decir, cantidad de pulpa agua residual y mucílago, y con esto se determinó la relación de la cantidad de café verde obtenido respecto de los subproductos generados.

Así mismo, se realizaron análisis de las muestras de agua tomadas en cuatro monitoreos, es decir, en la entrada y salida de cada unidad (separador hidráulico, sedimentador, reactor Hidrolítico-acidogénico, reactor 1, reactor 2, reactor 3, reactor metanogénico) y salidas unidades observadas en la fotografía 3, obteniendo un total de 10 muestras por monitoreo, a las cuales se les evaluaron remoción de indicadores físicos y químicos expresados en DQO, DBO5, pH, color, turbiedad y sólidos totales.

La muestra para este proyecto fue: cuatro monitoreos realizados durante la cosecha del año 2012, en donde en cada monitoreo se tomaron once muestras para realizarles sus respectivos análisis de parámetros contaminantes.

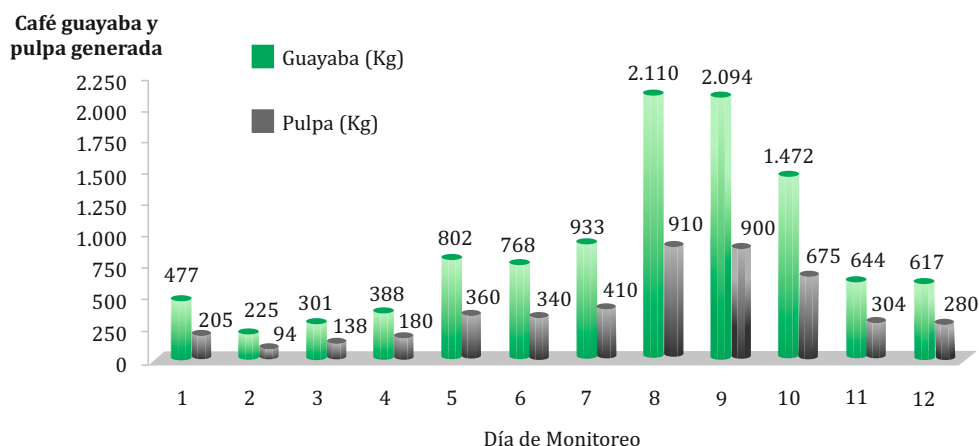
## 2.9 Análisis estadístico

Se calcularon promedios, desviaciones estándar y correlaciones utilizando como herramienta estadística el macro de Excell Megastat, el cual permitió realizar un tratamiento estadístico para datos agrupados y no agrupados para una distribución normal y una distribución t-student.

## 3 RESULTADOS

El beneficio ecológico del café se consideró como un proceso intermitente al realizarse en la época de cosecha en los meses de septiembre a diciembre, el cual se trabajó por medio de batchs o cochadas.

Figura 1. Cantidad de Café Guayaba y pulpa generada

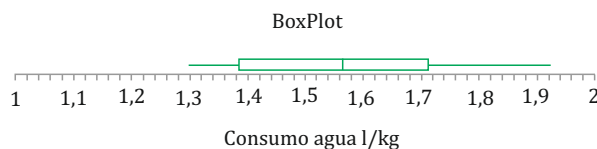


### 3.1 Comportamiento de la generación de los subproductos del beneficio del café

En la cosecha del año 2012 de la Hacienda Majavita se recolectó en 65 días un total de 33.925 kilogramos de café guayaba dentro de los meses de septiembre a diciembre, con una semana pico de producción de 10.892 kilogramos, generando 4.800 kilogramos de pulpa o cereza, con una relación en el beneficio promedio del 44.6% de pulpa, desviación estándar de 1.7% y de aproximadamente 1.6 litros por kilogramo de café guayaba con una desviación de 0.19 para un total de 54.3 metros cúbicos de aguas mieles, de las cuales se trataron 40.6 m<sup>3</sup> de agua residual una vez retirados los sólidos en el separador hidráulico de mucílago. En el día pico se produjo 2110 kg de café guayaba y 2800 litros de agua miel.

La producción de pulpa en un grano de fruto de café cereza representa el 45% de la totalidad de los componentes, es decir, en la producción de un grano de café se genera gran cantidad de subproductos, lo anterior justifica la necesidad de realizar un tratamiento adecuado para evitar impactos ambientales negativos, teniendo en cuenta que la disposición de estos en lugares inadecuados provoca la aparición de vectores y lixiviados ofensivos debido al proceso de degradación natural al estar expuestos a las condiciones atmosféricas del lugar. Así mismo un coeficiente de variación menor al 5% indica que los datos obtenidos son muy buenos y esto permite tomar el promedio obtenido del porcentaje de pulpa para inferir una futura generación de pulpa teniendo en cuenta la cantidad de café guayaba a beneficiar.

Figura 2. Diagrama de caja porcentaje de consumo de agua



En el diagrama de la figura 2 de caja se pueden observar los porcentajes de consumo de agua producidos, agrupado en el rango de 1,4 al 1,7% es decir, el 1,5% es el porcentaje de agua consumida lo que indica el agua miel siendo este el componente que afecta al medio ambiente por su alto contenido de carga contaminante.

### 3.2 Remoción de carga contaminante en los sistemas de tratamiento

En la tabla 4 se aprecian las fracciones de materia orgánica biodegradable en cada unidad del sistema de tratamiento Majavita con relación al total de materia carbonácea (DQO), se evidencia que la separación hidráulica de mucílago en los SHM, genera una remoción importante de materia orgánica biodegradable, también es importante señalar que a medida que el agua miel pasa por cada proceso se produce una disminución en la fracción de materia orgánica, biodegradable lo cual es un indicio de la actividad microbiológica desde el ingreso del agua miel a las primeras unidades

Tabla 4. SMTA Majavita

Relación DBO <sub>5</sub> /DQO	
SHM	0,54
SDR	0,33
RA1	0,29
RA2	0,33
RA3	0,22

La fracción de materia orgánica biodegradable del SMTA Cenicafé está en un rango similar al SMTA Majavita aunque se puede evidenciar una actividad microbiológica menor como se puede ver en la tabla 5 el reactor metanogénico (RM) presenta una fracción de materia orgánica biodegradable mayor a la de la última unidad del SMTA Majavita (RA3, esto puede ser debido a una capacidad menor del SMTA Cenicafé y por consiguiente una actividad anaerobia menor.

Tabla 5. SMTA Cenicafé

Relación DBO <sub>5</sub> /DQO	
SHM	0,48
SDR	0,41
RH	0,30
RM	0,35

### 3.3 Seguimiento de parámetros UASB

Para comprobar la eficiencia del reactor tipo UASB se llevó a cabo el monitoreo de esta unidad durante una semana, haciendo circular agua residual del café

procedente del sistema Cenicafé de los reactores hidrolíticos, teniendo en cuenta el tiempo de retención y tomando las respectivas muestras en el efluente del reactor para el posterior análisis de parámetros químicos y físicos en laboratorio. Los resultados del comportamiento de reactor se muestran a continuación.

En la figura 3 se observa el análisis de muestras para evaluar el indicador DQO el cual evidenció un comportamiento descendente en los datos de salida con respecto a los de entrada, se encontró que durante los cuatro días de monitoreo se presentó disminución en la cantidad de carga contaminante con un máximo de 57% de remoción y un mínimo de 11%, es decir, el reactor UASB incrementa las eficiencia en remoción en el tren de cargas del sistema de tratamiento.

Los resultados obtenidos para la DBO5 indican que el agua residual de entrada presentaba altas concentraciones de material contaminante, pero después de ser tratada en el reactor UASB, evidenció una disminución de contaminante, en promedio se obtuvo una remoción del 76%, comprobando los hallazgos teóricos que indican remociones entre el 60% y el 80% para este tipo de reactores. Los resultados se observan en la figura 4.

### 3.4 Tasa de oxidación reactor UASB

Para obtener información de la tasa de oxidación del reactor fue necesario incubar la muestra durante un intervalo de tiempo, para estimar los parámetros cinéticos  $k$  y  $L$ . Si bien, existen diferentes modelos cinéticos, el más frecuente es describir el valor de la DBO en función del tiempo mediante una cinética de primer orden ( $dL/dt = -kL$ ).

Figura 3. Comportamiento de la DQO en el reactor UASB

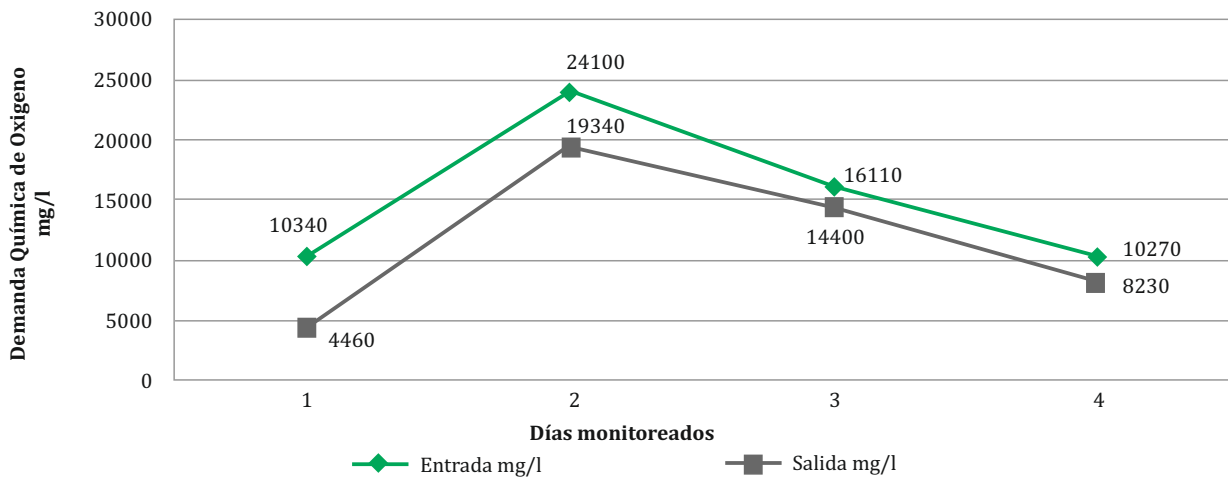
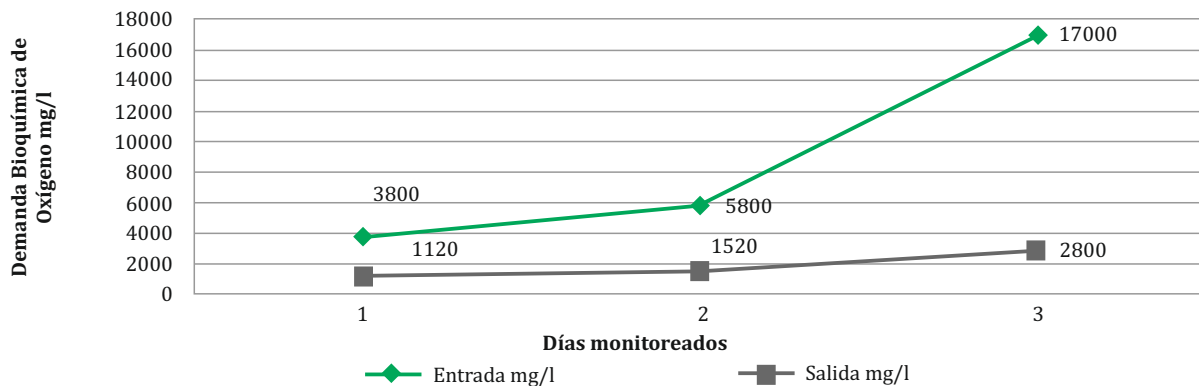


Figura 4. Comportamiento de la DBO5 en el reactor UASB





La tasa de oxidación bioquímica de la materia orgánica es directamente proporcional a la cantidad de materia orgánica biodegradable presente, es decir, obedece a una ecuación de primer orden, como se observa a continuación:

Matemáticamente se tiene la relación de la ecuación uno:

$$\frac{dLt}{dt} = Kl_t$$

Donde:

$L^t$  = DBO5 remanente en el agua para el tiempo t, en mg/L.

K = coeficiente cinético que expresa la tasa de oxidación, d-1

$\frac{dLt}{dt}$  = tasa de oxidación de la materia orgánica carbonacea, mg/L.d.

Aplicando el método de mínimos cuadrados se puede definir la ecuación dos:

$$DBO = (1 - e^{-kt})$$

La velocidad a la cual ocurre esta reacción bioquímica dependió de múltiples factores, muchos de los cuales debieron ser estandarizados para la reproducibilidad del método (temperatura, tiempo de incubación, nutrientes e inóculo requeridos). De ese modo, la velocidad de consumo del oxígeno obedeció solamente de la concentración y la naturaleza de la materia orgánica presente. El parámetro k es independiente de la concentración ( $k = 1/L \cdot dL/dt$ ), por lo que, estimando su valor para diferentes efluentes, permitió conocer la facilidad con la cual será oxidada la materia orgánica en condiciones estándares.

Los valores de DBO encontrados a diferentes instantes de tiempo para las muestras analizadas. Se observa una importante dispersión de los resultados obtenidos para las muestras extraídas en diferentes días de la semana, con rangos amplios en todas las mediciones realizadas. La K fue de 0,377 con un L (mg/l) de 782,7, con un tiempo de cinco días para el monitoreo del cuatro de marzo.

Para el análisis de la muestra del cinco de marzo se obtuvo en la K 0,388, con un L de 940, realizada por cinco días. Para el último muestreo realizado el seis de marzo se logró una K de 1.58, con un L de 1729.03. La DBO5 remanente promedio L y la

constante cinética K de la reacción, el reactor UASB fue adaptado al sistema Cenicafé, después de cinco días, en tres muestras tomadas.

### 3.5 Datos de L y K obtenidos

Se obtuvo una L promedio de 1.150,6 mg/l y una K promedio de 0,78 d-1

Se observa una importante dispersión de los valores de k = 0,78 d-1 y de L = 1151mg/l, posiblemente asociados a la sobrecarga de materia contaminante presente en el día dos. A pesar de ser agua residual procedente del beneficio del café tomada del sistema Cenicafé, es una actividad que genera un efluente de naturaleza eminentemente orgánica, la constante k toma valores bajos, indicando baja velocidad de estabilización del residuo con valores de L muy elevados, por lo que es de esperar que se requieran tiempos prolongados e importantes consumos de oxígeno disuelto para poder satisfacer su demanda de oxígeno y evitar la acción contaminante del vertido.

La velocidad a la cual ocurre la estabilización de la materia orgánica ( $dL/dt$ ) es proporcional a la concentración de la materia orgánica contenida en la muestra, como lo indica la ecuación número tres:

$$DBO = 1150.6 (1 - e^{-0.78t})$$

El valor medio calculado para la constante cinética k para este efluente muestra valores más altos que el informado para efluentes de otros orígenes. Esto demuestra que se trata de un efluente relativamente sencillo de biodegradar, aun cuando logra la completa satisfacción de la demanda alta de masa de oxígeno disuelto en la mezcla de los reactores biológicos.

### 3.6 Remociones sistema de tratamiento Cenicafé

Según los muestreos realizados a los sistemas de tratamiento de las aguas residuales del beneficio ecológico del café en la Hacienda Majavita en la cosecha del año 2012 se obtuvieron los porcentajes de remoción de cada una de las unidades.

Este parámetro permite cuantificar cuanto material orgánico fue descompuesto o degradado respecto al agua residual entrante, pero no diferencia entre el material soluble eficientemente consumido por las

bacterias y el material insoluble que pudo ser retenido por el manto de lodos para ser posteriormente degradado. (Monroy, 2002:36).

La figura 5 muestra el comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno en el sistema de tratamiento Cenicafé, en los datos se puede observar que la remoción total del sistema fue del 89%, el separador hidráulico de mucílago fue la unidad que mayor remoción presentó con un resultado de 28%, y la unidad con más baja remoción en este parámetro es el reactor Hidrolítico con 14%; indicando el proceso realizado por este sistema para la DQO es eficiente, por lo tanto es apto para tratar el agua residual procedente del beneficio del café.

Representa la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar o estabilizar la materia orgánica biodegradable en condiciones anaerobias; este es el indicador más usado para medir la calidad del agua residual del café y así determinar la

cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, logrando evaluar el funcionamiento de las unidades de tratamiento del sistema y así fijar las cargas orgánicas permisibles en las fuentes receptoras (Rojas, 2005:38).

Se muestra en la figura 6 el comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en el sistema de tratamiento Cenicafé, esta permite observar que la remoción total del sistema fue de 90%, alcanzando un notable control en este parámetro, indicando la eficiencia que puede alcanzar este sistema para remover la materia orgánica. el sedimentador fue la unidad que mayor remoción presentó con un resultado de 33%, y la unidad con más baja remoción en este parámetro es el reactor metanogénico con 12%; demostrando el proceso realizado por el sistema Cenicafé para la DBO5 es altamente eficaz para remover la contaminación generada por el agua residual del café.

Figura 5. Comportamiento de la DQO en las unidades del sistema Cenicafé

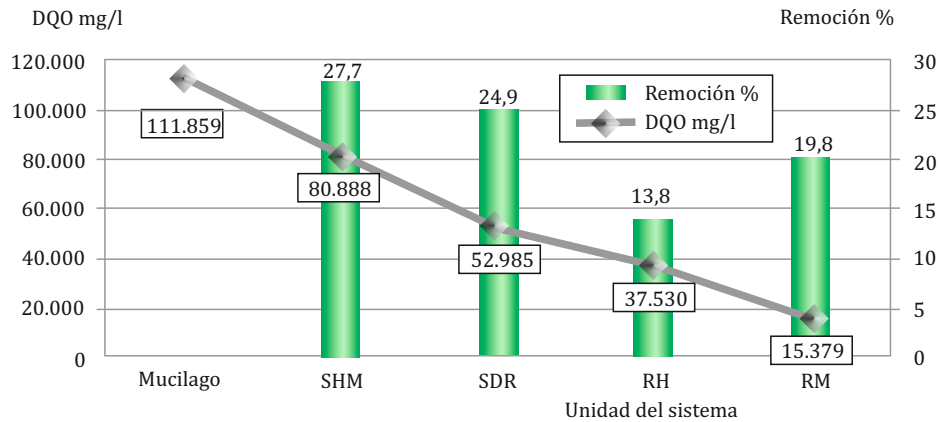
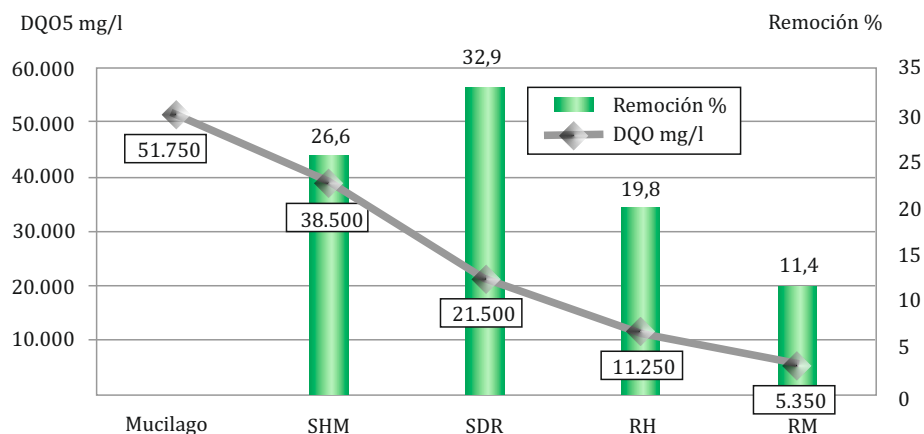


Figura 6. Comportamiento de la DBO5 en las unidades del sistema Cenicafé



### 3.7 Remoción sistema de tratamiento Majavita

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno. DQO se expresa en mg/l O<sub>2</sub>, debido a sus propiedades químicas únicas, el ion dicromato (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>) es el oxidante especificado en la mayoría de los casos. En estos tests el Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup> se reduce a ion crómico (Cr<sup>3+</sup>).

El DQO es un test definido, tanto el tiempo de digestión como la fuerza del reactivo y la concentración DQO de la muestra afecta al grado de oxidación de la misma.

La figura 7 muestra el comportamiento de la demanda química de oxígeno en el sistema de tratamiento Majavita, los datos permiten observar que la remoción total del sistema fue de 47%, en

donde el separador hidráulico de mucílago fue la unidad que mayor remoción presentó con un resultado de 36%, la unidad que presentó incremento en ese parámetro fue el reactor anaerobio uno con 3,3%; y el reactor anaerobio tres con 7,1 el incremento en estas dos unidades se debe al bajo tiempo de retención hidráulico demostrando la existencia de una falla en la inoculación, indicando que el proceso realizado por este sistema para la DQO es insuficiente, por lo tanto es poco recomendable para tratar el agua residual procedente del beneficio del café y se deben realizar algunos cambios en el sistema.

Uno de los parámetros más representativos para la caracterización del agua residual es la DBO<sub>5</sub>, ya que la relación existente entre la demanda química de oxígeno y la demanda bioquímica de oxígeno permite obtener el porcentaje de materia orgánica capaz de biodegradarse de manera biológica, así mismo este indicador es tenido en cuenta por la normativa en el momento de realizar un vertimiento a un cuerpo de agua.

Figura 7. Comportamiento de la DQO en las unidades sistema Majavita

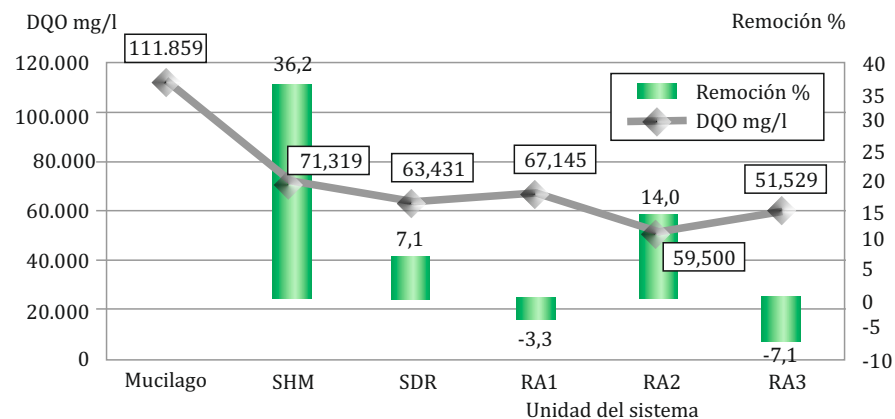
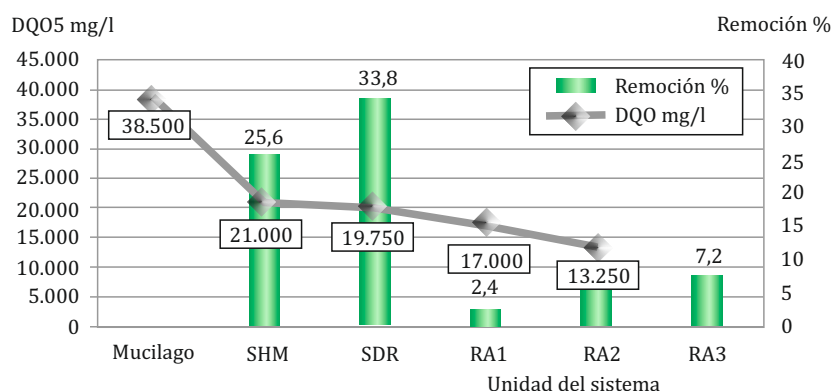


Figura 8. Comportamiento de la DBO<sub>5</sub> en las unidades del sistema Majavita



Se muestra en la figura 8 el comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en el sistema de tratamiento Majavita, en los datos se puede observar que la remoción total del sistema fue de 75%, en donde la unidad que presentó menor cantidad de materia orgánica es el reactor anaerobio uno con 3% y la unidad que remueve en mayor cantidad la materia orgánica es el Sedimentador con 34%. Lo que indica que el proceso realizado por este sistema para la DBO5 es eficiente, por lo tanto es apto para el tratamiento del agua residual del beneficio del café.

## 4. DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación comprueban la hipótesis formulada. Se afirma que hay diferencias significativas en cuanto a remoción en los sistemas Cenicafé y Majavita, ya que con los monitoreos realizados se determinó que el sistema Cenicafé tuvo una mayor eficiencia en remoción, se observaron diferencias significativas en cuanto al SMTA Majavita, éste no cuenta con una separación de las fases, y el caudal es intermitente, lo que afecta el óptimo desarrollo de los procesos biológicos implicados. El tratamiento de las aguas mieles de café con el SMTA Cenicafé, evidenció mejor actividad microbiológica que el SMTA Majavita debido a que en la fase de hidrólisis y acidogénesis se produce una degradación de la materia orgánica que genera un ambiente más propicio para el consumo de la materia orgánica para la fase metanogénica, la cual está en un tanque individual que la separa de la hidrólisis y acidogénesis caracterizada por pH bajos muy perjudiciales para el desarrollo de la metanogénesis.

Esta hipótesis se relaciona con lo dicho por Romero (2005) que explica cómo en la digestión de materia orgánica en condiciones anaerobias, se llevan a cabo una serie de procesos de descomposición de polímeros orgánicos los cuales llevan a cabo bacterias acidogénicas, generando un medio ácido que inhibe el desarrollo de las bacterias metanogénicas, por el contrario los ácidos orgánicos producidos en esta fase como el acético, butírico y propiónico son la fuente de alimento de las bacterias metanogénicas, si se regula el pH.

De la misma forma el SMTA Cenicafé no hubiera tenido la misma eficiencia con el diseño original, pues este no cuenta con los separadores hidráulicos que fueron instalados en la hacienda Majavita, los cuales son responsables del 50% de remoción del sistema.

En cuanto a la eficiencia en remoción teórica del SMTA y la determinada en el SMTA de la hacienda Majavita, se tiene que son similares a las determinadas por Cenicafé en su publicación Tratamiento de las aguas mieles del café, en la cual las eficiencias de remoción promedio para el estado estable del reactor metanogénico fueron 80, 83,4, 45,99 y 74,3% para la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5), los Sólidos Totales (ST) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST), respectivamente.

En cuanto al monitoreo realizado al reactor UASB, se pudo evidenciar que el arranque realizado con lodos madurados de tipo granular adaptado y madurado no necesita tiempos muy largos de aclimatación, como lo dice Bernal (2002) el arranque de un reactor es un proceso largo y difícil, debido a que se requiere desarrollar un volumen grande de biomasa adaptada a las características particulares del agua residual. Una mayor actividad del lodo de inóculo necesariamente implica un menor tiempo de arranque.

Se produjo una disminución de la remoción en DBO al aumentar la carga orgánica de entrada, según Bernal (2002) durante el arranque existe peligro de sobrecarga orgánica y si esto llega a ocurrir, la fermentación ácida se torna predominante sobre la fermentación metanogénica, dando como resultado la acidificación del reactor; lo cual pudo ocasionar una disminución en la actividad microbiológica.

Comparando los resultados del proyecto con investigaciones anteriormente realizadas en los sistemas de tratamiento, se pudo establecer similitud entre la turbiedad al analizarse cómo la unidad del separador hidráulico de mucílago presentó mayor porcentaje de remoción, en los sólidos totales se observó un comportamiento de mayor remoción en el separador hidráulico de mucílago, lo cual indicó un buen proceso en los sistemas de tratamiento. Para la remoción de la demanda química de oxígeno se logró obtener un incremento en la carga por el tiempo de

retención excesivo siendo de 72 horas contenido en el proyecto del 2011, el proyecto del año 2012 presentó gran variación en los resultados, el separador hidráulico de mucílago fue la unidad con mayor remoción en los dos sistemas de tratamiento.

Para la remoción en la demanda bioquímica de oxígeno se logró identificar que la unidad que representó mayor eficiencia fue el sedimentador, en los resultados de investigaciones en años anteriores se puede ver en los sistemas de tratamiento Cenicafé y Majavita la disminución de concentración de carga contaminante y el aumento en la eficiencia de remoción, cumpliendo la normativa y disminuyendo significativamente el impacto medioambiental donde se desarrolla el beneficio ecológico del café.

## 5. CONCLUSIONES

Para el incremento en la remoción del sistema y un óptimo funcionamiento, es necesario implementar un tren de cargas compuesto por las unidades del SMTA Cenicafé con un pretratamiento adicional denominado separador hidráulico de mucílago, de la misma forma que la instalación de un tanque de regulación de caudal que asegure un caudal fijo de entrada a los reactores hidrolítico-acidogénicos.

La cuantificación de los subproductos generados en el proceso de beneficio de café de la Hacienda Majavita permitió deducir que los sistemas de tratamiento existentes presentan una capacidad inferior a la requerida para el manejo de las aguas mieles, teniendo en cuenta que las producciones de café en el futuro tienden a aumentar, por lo tanto el sistema actual no cuenta con la capacidad necesaria en los días pico de producción, lo que hace inminente una ampliación del mismo.

El tratamiento de las aguas residuales mediante los sistemas de tratamiento Cenicafé y Majavita mostraron que el parámetro con mayor remoción en los dos sistemas es la turbiedad, la cual alcanzó 93,5% y 90,4% respectivamente, así mismo se obtuvieron remociones significativas con valores de 90,7% y 85,1% en cuanto a la minimización del indicador de color. La materia orgánica presente en el agua residual expresada en los indicadores DQO y DBO5 varió de un sistema a otro, ya que para el

sistema de tratamiento Cenicafé se alcanzó un total de remoción 86,3% (DQO) y 89,7% (DBO5) resultados de nivel bueno en cuanto al cumplimiento de la normativa colombiana vigente, a diferencia del sistema de tratamiento Majavita, el cual presentó remociones medias con valores de 46,8% (DQO) y 74,4%(DBO).

El tren de cargas de los sistemas de tratamiento Majavita y Cenicafé resulta efectivo para la minimización de los Sólidos Totales presentes en el agua residual, esto se deduce debido a las remociones encontradas, las cuales indican un total en remoción de 84,5% en el sistema Cenicafé y un 78,6% en el sistema de tratamiento Majavita. De igual manera el parámetro pH se mantuvo entre los rangos aceptables para disponer el vertimiento. Se evaluaron los dos sistemas de tratamiento y se encontró que el sistema Cenicafé es más eficiente que el sistema Majavita, por la separación de la fase hidrolítica acidogénica de la fase metanogénica, esto sumado a un tiempo de retención mayor y por consiguiente, la remoción de materia orgánica fue mayor.

Se determinó la eficiencia del reactor UASB, este para el tratamiento de las aguas residuales procedentes del beneficio ecológico del café en la Hacienda Majavita, desarrollando un proceso de caracterización físico-química, el cual demostró que éstas varían según la cantidad de carga orgánica que ingrese, afectando principalmente los parámetros de color y turbiedad. Se realizó la inoculación del reactor UASB, con un lodo anaerobio de muy buena calidad encontrando un material de alta calidad que comúnmente es muy difícil de hallar, lodo granular, este lodo se tipificó llevando a cabo la evaluación de la velocidad de sedimentación, el lodo fue tomado de los reactores metanogénicos del sistema de tratamiento Cenicafé inoculados con estiércol bovino meses atrás. La constante cinética de velocidad de reacción  $k$  muestra un rango de valores muy amplio. Los valores de  $k$  para muestras recogidas en diferentes días de la semana muestran valores muy dispares, lo que indica velocidades de degradación de la materia orgánica muy variable. Se observa un amplio rango de valores de DBO5, por lo que se supone que las distintas velocidades puedan estar asociadas a diferencias en la composición química del efluente. Los resultados del estudio de la tasa de



oxidación de la materia orgánica del reactor UASB indican una importante variación en la carga contaminante del efluente medida en términos de DBO, al igual que la velocidad de estabilización por vía biológica evaluada según los valores de  $k$ . Teniendo en cuenta que se presentó remoción biológica de la materia orgánica se permite asegurar que el reactor UASB utilizó sustrato para realizar su trabajo. La existencia de una masa microbiana activa y la utilización de sustrato, generan un aumento de la biomasa activa en el sistema, es decir, la remoción de carga contaminante fue producto de la actividad microbiológica producida en el fondo de lodos del reactor.

### 6. RECOMENDACIONES

Los actuales sistemas de tratamiento llegaron a su capacidad límite en los días de producción pico, lo que hace inminente una ampliación del mismo, teniendo en cuenta el incremento previsto para los siguientes años.

Para conseguir que el sistema cumpla con las remociones teóricas se debe asegurar el tiempo de retención hidráulica operacional de cada unidad, ya que de no ser así puede presentarse contaminación del efluente.

Es importante que el operario del sistema sea personal técnico que conozca la función de cada una de las unidades, ya que los inconvenientes presentados en la operación se deben al desconocimiento de los procesos físicos y químicos llevados a cabo en las unidades.

Los reactores biológicos del sistema Majavita deben ser modificados, pues no tienen separadas las fases hidrolítico-acidogénica de la metanogénica, lo cual reduce la eficiencia del mismo a causa de una acidificación del medio.

### 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beltrán Pilar, Quiroga Ruth y Salazar Lady. 2010-2011. Tratamiento de las Aguas Residuales del beneficio del Café con la Técnica Becolsub. Proyecto de Investigación formativa. Facultad Ingeniería. Universidad Libre.

Caicedo Messa, Francisco Javier. 2006. Diseño, Construcción y Arranque de un reactor UASB piloto para el tratamiento de Lixiviados. Documento para optar título de posgrado en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional seccional Manizales.

Para la construcción de un reactor UASB se deben tener en cuenta materiales con alta resistencia para así evitar fugas y pérdidas que no puedan garantizar la eficiencia y seguridad del equipo para cumplir su función en el sistema de tratamiento de las aguas residuales.

Para el reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos, es necesario tener en cuenta que en su fase de arranque se debe iniciar con una carga de materia orgánica baja, para así evitar alterar los parámetros físico-químicos que evalúan su eficiencia y evitar que las bacterias se mueran o cambien sus características de degradación.

Se debe tener en cuenta el tiempo de retención hidráulico del reactor UASB para así lograr obtener altas eficiencias en remoción de materia orgánica y evitar el lavado de los lodos, además se deben realizar los respectivos aforos para fijar el caudal de entrada. La inoculación del reactor UASB debe hacerse con un lodo anaerobio que cuente con las características apropiadas de lodo granular, ya que su velocidad de sedimentación evita el lavado del mismo.

Es necesario realizar proyecciones de producción para las cosechas futuras para así tener un sistema de tratamiento de agua residual apropiado, que además tenga la capacidad para almacenar y tratar el volumen de agua dado en cada beneficio ecológico del café.

### 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al laboratorio de aguas por permitir llevar a cabo las pruebas, al ingeniero William Tolosa quien aportó conocimiento en la línea de aguas residuales y a los funcionarios del laboratorio de Aguas y Microbiología por el apoyo brindado en los análisis de las muestras.

Hernández Sampieri, Roberto. 2006. Metodología de la Investigación. Cuarta edición. México. En: <http://www.cbm.uam.es/jlsanz/docencia/master/Documentos/Master%20T-9.pdf>

Martínez Chamorro, Holger Fredy y Vega Serrano, Haimar Ariel. 2010. Operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales y lixiviados del beneficio del café en la Hacienda Majavita. Informe Final Pasantía. Ingeniería Ambiental. Universidad Libre Seccional Socorro.

Orozco R. Paula Andrea. 2003. Arranque y puesta en marcha de un reactor metanogénico tipo UAF para el tratamiento de las aguas residuales del lavado del café. En: <http://www.bdigital.unal.edu.co/978/1/paulaandreaorozcorestrepo.200.pdf>  
 PND. 2010-2014. Plan Nacional de Desarrollo. Prosperidad para todos. Colombia  
 PNUMA. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 2010.

Ramírez V. Andrés. 2011. Innovadores de América. En: <http://innovadoresdeamerica.org/app/do/participant.aspx?id=341>  
 Rodríguez Valencia, Nelson. 2009. Estudio de un Biosistema Integrado para El Postratamiento de las Aguas Residuales del Café Utilizando Macrófitas Acuáticas. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad de Valencia. España.

Romero R. Jairo Alberto. 2005 Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Toledo Girón. Cintya Lizbeth. 2003. Proyecto de beneficiado Ecológico de Café en Aldea Plan de Sánchez, Rabinal, Salamá, Baja Verapaz. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. <http://es.scribd.com/doc/106519571/Proyecto-Del-Cafe>

Vega Serrano, Haimar Ariel y Martínez Chamorro, Holger. 2011. Adaptación SMTA al tratamiento aguas residuales beneficio ecológico del café con módulo Becolsub. Informe pasantía. Facultad de Ingeniería. Universidad Libre.

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

Vega Serrano, Haimar Ariel. 2011. Adaptación SMTA al tratamiento de aguas residuales del beneficio ecológico del café con módulo Becolsub. Revista El Centauro. ISSN: 2027-1212. Universidad Libre Seccional Socorro.

Zambrano F. Diego A. y Jaime Zuluaga. Manejo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café para el control de la contaminación. En: <http://www.cenicafe.org/es/publications/avt0187.pdf>

Zambrano F. Diego A y Juan D. Isaza. Demanda química de oxígeno y Nitrógeno total de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo de café. En: [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc049\(04\)279-289.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc049(04)279-289.pdf)

Zambrano F. Diego A. 2006. Tratamiento anaerobio de las aguas mieles del Café. Cenicafé. Chinchiná Caldas. En: <http://www.cenicafe.org/es/index.php/busqueda/results/61d3dd1dd0cc2db4b4fe0d45f25dfab8/>