



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

CARRERA DE INGENIERIA EN CIENCIAS Y APLICADAS

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TESIS DE GRADO

**TEMA:**

**“EVALUACIÓN DE UN REACTOR UASB Y PRODUCCIÓN DE  
BIOGÁS DE LOS RESIDUALES LÍQUIDOS DEL BENEFICIADO  
HÚMEDO DE CAFÉ”**

Tesis presentada previa a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico.

**Autores:**

Washington Javier Verdezoto Acurio

Guillermo Ismael Vique Salazar

**Tutor:**

*Ing. Yans Guardia Puebla*

Latacunga – Ecuador

Junio 2011

**UNIVERSIDAD DE GRANMA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE DE CIENCIAS TÉCNICAS**

**OPINIÓN DEL TUTOR**

**I- DATOS DEL TRABAJO DE DIPLOMA.**

**Título:** Evaluación de un reactor UASB y producción de biogás de los residuales líquidos del beneficiado húmedo de café

**Autor:** Washintong Javier Verdezoto Acurio

Guillermo Ismael Vique Salazar

**Tutor:** Ing. Yans Guardia Puebla

**II- CONTENIDO DE LA OPINIÓN CRÍTICA.**

Este Trabajo de Diploma guarda relación asociado al título y el contenido en él incluido; está estructurado según la metodología establecidas, de la siguiente forma: Portada, Introducción, Resumen, Índice, Capítulo I: Estado Actual del Tema (10 páginas), Capítulo II: Materiales y Métodos (7 páginas), Capítulo III: Resultados y Discusión (8 páginas), Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía y Anexos (9), con un total de 41 páginas.

La introducción cuenta con 3 páginas. En la cual está incluida una valoración introductoria al tema a investigar, el problema científico, la hipótesis y el objetivo que pretende la investigación. Dicho objetivo están manifestado, en las conclusiones finales.

En el trabajo se hace una buena revisión bibliográfica acerca de la actualidad del tema, contando esta revisión con 29 bibliografías, de ellas 10 son de los últimos 10 años, de las cuáles solamente 7 son en idioma español y las 22 restantes son en idioma inglés de artículos publicados por la Web Science, lo que considero que el trabajo es una fuente de información suficientemente actualizada y valiosa.





UNIVERSIDAD DE GRANMA

*Facultad de Ingeniería*

*Departamento Ciencias Técnicas*

## INFORME DEL Oponente

### DATOS DEL Oponente:

Nombre y apellidos: Yoandro Rodríguez Ponce.

Grado científico: Doctor en Ciencias.

Categoría docente: Profesor auxiliar.

Especialidad: Ingeniero Mecánico.

Centro de trabajo: Departamento Ciencias Técnicas. Facultad de Ingeniería.  
Universidad de Granma.

### DATOS SOBRE LA TESIS:

Título: Evaluación de un reactor UASB y producción de biogás de los residuales líquidos del beneficiado húmedo del café.

Aspirante: Washington Javier Verdezoto Acurio.

Tutor: Ing. Yans Guardia Puebla.



### CONTENIDO DE LA Oponentencia:

El tratamiento a los residuales generados a partir de las actividades productivas del hombre es uno de los temas más preocupantes hoy en día debido a los altos impactos negativos provocados sobre el medio que han sido ubicados los sistemas productivos.

El residual líquido producto del proceso de beneficiado del café constituye uno de los principales contaminantes de los recursos hídricos de las zonas cafetaleras.

Hacia estas cuestiones se han promovido investigaciones de carácter nacional e internacional pero aún existen limitaciones en el tratamiento de estos residuales sobre lo cual versa la tesis que se defiende lo que connota la **actualidad** e importancia de la misma y se demuestra por parte del autor que su elección como esencia investigativa es necesaria. El **resumen** presenta los elementos fundamentales que se abordan en la

tesis y ayuda al lector a orientarse hacia los aspectos centrales de su contenido. La tesis cuenta con una adecuada **estructura y presentación**, que satisface los requerimientos de este tipo de informe. Al realizar el análisis de la memoria escrita se hacen las siguientes valoraciones.

Logra *reflejar de manera implícita* en la memoria escrita como **novedad** la viabilidad del uso de reactores UASB para el tratamiento de los residuales líquidos del beneficiado húmedo del café, quedando establecidos los parámetros de trabajo del reactor para este tipo de residuales a nivel de planta piloto a escala de laboratorio, y que al interpretarse de esta manera se pueden introducir los **resultados** en la práctica social sistematizando el tránsito con calidad.

Las **conclusiones** son generalizadoras, precisan los aportes teóricos de la tesis y el cumplimiento del objetivo de la investigación al darle solución al problema científico que se había planteado, las **recomendaciones** son adecuadas, marcan nuevas brechas epistemológicas que permitirán favorecer el desarrollo científico .

Utiliza una variada **bibliografía**, de un total de 28 títulos el 32,5% corresponde a la última década, en ella se incluye la consulta de textos, tesis de doctorado y de maestrías, lo que prueba la preocupación del autor por encontrar los fundamentos epistemológicos más recientes para realizar su investigación y por ello garantiza su actualidad.

El **resumen** cumple con los requisitos establecidos y expresa una correspondencia con el informe de tesis. Se manifiesta una apropiada relación entre cada una de sus partes y su lectura permite apropiarnos de los aportes fundamentales de la tesis, aparecen algunos errores tipográficos.

En correspondencia con los **méritos e insuficiencias** de la tesis se precisa que satisface los requerimientos de este tipo de informe. Desde el *comienzo de la investigación* los autores, aseguran revelar su problema científico, así como los demás elementos del diseño teórico, en tal sentido le preguntamos: **Atendiendo a la inconsistencia teórica de su investigación, explique:**



1. ¿por qué se decidió a utilizar reactores UASB para el tratamiento del residual? , ¿a qué se debe que hallan decidido la recirculación del 50 % del efluente del sistema? y ¿cuál sería el efecto esperado?
2. En la figura 4.5 página 38 se observa una caída brusca en los valores de la remoción de los sólidos totales del efluente. Explique por qué ocurrió este fenómeno.
3. Según el estudio, se reportó que por cada 1.0 m<sup>3</sup> de agua residual, del beneficio húmedo del café, tratada por digestión anaerobia se obtiene 0.168 m<sup>3</sup> de biogás. ¿Es rentable este tipo de tecnología en los países productores como alternativa de tratamiento?

En general la redacción se realiza con un lenguaje científico apropiado de acuerdo con lo que se exige y existe un adecuado uso de las reglas ortográficas, aparecen algunos errores tipográficos.

Después de escuchar las respuestas a las interrogantes, si los aspirantes las realizan correctamente, solicito al Tribunal no poner objeción para que se otorgue Washington Javier Verdezoto Acurio el Título Académico de Ingeniero Electromecánico.

Fecha de elaboración: 20 de enero de 2011

Firma: \_\_\_\_\_



UNIVERSIDAD DE GRANMA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

ACTA DE DISCUSIÓN DE LOS TRABAJOS DE DIPLOMA

Título del trabajo: Evaluación de un reactor VASB y producción  
de biogás de los residuos líquidos del beneficiado  
business de café.

Nombre del alumno (a): Washington Javier Verdegoto Acurio

Año académico: \_\_\_\_\_

Tipo de Curso: \_\_\_\_\_

Curso: \_\_\_\_\_

Fecha: 20/01/2011

Tribunal: Presidente Dr. C. Rubén Jerez Pereira.

Vocal Jug. Alexis Álvarez Cabrera.

Secretario Msc. C. David Verónica Torres.

Índices evaluados:

1. Calidad del trabajo (uso de la metodología de la investigación científica, actualización científico técnica, uso de las estrategias curriculares, entre otros). 5
2. Capacidad creadora, originalidad e independencia en el desarrollo del trabajo. 5
3. Calidad de la exposición, respuestas a las preguntas y dominio del tema. 4
4. Opinión del tutor. 5
5. Opinión del Oponente. 5
6. Opinión de la entidad laboral. 5

Calificación otorgada según los índices evaluados: Excelente (5 puntos)

Presentación en eventos científicos: \_\_\_\_\_

Firma del presidente: \_\_\_\_\_



Firma del alumno(a): \_\_\_\_\_

24 MAR. 2011



UNIVERSIDAD DE GRANMA

*Facultad de Ingeniería*

*Departamento Ciencias Técnicas*

## INFORME DEL Oponente

### DATOS DEL Oponente:

Nombre y apellidos: Yoandro Rodríguez Ponce.

Grado científico: Doctor en Ciencias.

Categoría docente: Profesor auxiliar.

Especialidad: Ingeniero Mecánico.

Centro de trabajo: Departamento Ciencias Técnicas. Facultad de Ingeniería.  
Universidad de Granma.

### DATOS SOBRE LA TESIS:

Título: Evaluación de un reactor UASB y producción de biogás de los residuales líquidos del beneficiado húmedo del café.

Aspirante: Guillermo Ismael Vique Salazar.

Tutor: Ing. Yans Guardia Puebla.



### CONTENIDO DE LA Oponencia:

El tratamiento a los residuales generados a partir de las actividades productivas del hombre es uno de los temas más preocupantes hoy en día debido a los altos impactos negativos provocados sobre el medio que han sido ubicados los sistemas productivos.

El residual líquido producto del proceso de beneficiado del café constituye uno de los principales contaminantes de los recursos hídricos de las zonas cafetaleras.

Hacia estas cuestiones se han promovido investigaciones de carácter nacional e internacional pero aún existen limitaciones en el tratamiento de estos residuales sobre lo cual versa la tesis que se defiende lo que connota la **actualidad** e importancia de la misma y se demuestra por parte del autor que su elección como esencia investigativa es necesaria. **El resumen** presenta los elementos fundamentales que se abordan en la

tesis y ayuda al lector a orientarse hacia los aspectos centrales de su contenido. La tesis cuenta con una adecuada **estructura y presentación**, que satisface los requerimientos de este tipo de informe. Al realizar el análisis de la memoria escrita se hacen las siguientes valoraciones.

Logra *reflejar de manera implícita* en la memoria escrita como **novedad** la viabilidad del uso de reactores UASB para el tratamiento de los residuales líquidos del beneficiado húmedo del café, quedando establecidos los parámetros de trabajo del reactor para este tipo de residuales a nivel de planta piloto a escala de laboratorio, y que al interpretarse de esta manera se pueden introducir los **resultados** en la práctica social sistematizando el tránsito con calidad.

Las **conclusiones** son generalizadoras, precisan los aportes teóricos de la tesis y el cumplimiento del objetivo de la investigación al darle solución al problema científico que se había planteado, las **recomendaciones** son adecuadas, marcan nuevas brechas epistemológicas que permitirán favorecer el desarrollo científico .

Utiliza una variada **bibliografía**, de un total de 28 títulos el 32,5% corresponde a la última década, en ella se incluye la consulta de textos, tesis de doctorado y de maestrías, lo que prueba la preocupación del autor por encontrar los fundamentos epistemológicos más recientes para realizar su investigación y por ello garantiza su actualidad.

El **resumen** cumple con los requisitos establecidos y expresa una correspondencia con el informe de tesis. Se manifiesta una apropiada relación entre cada una de sus partes y su lectura permite apropiarnos de los aportes fundamentales de la tesis, aparecen algunos errores tipográficos.

En correspondencia con los **méritos e insuficiencias** de la tesis se precisa que satisface los requerimientos de este tipo de informe. Desde el *comienzo de la investigación* los autores, aseguran revelar su problema científico, así como los demás elementos del diseño teórico, en tal sentido le preguntamos: **Atendiendo a la inconsistencia teórica de su investigación, explique:**



1. *¿por qué se decidió a utilizar reactores UASB para el tratamiento del residual? , ¿a qué se debe que hallan decidido la recirculación del 50 % del efluente del sistema? y ¿cuál sería el efecto esperado?*
2. *En la figura 4.5 página 38 se observa una caída brusca en los valores de la remoción de los sólidos totales del efluente. Explique por qué ocurrió este fenómeno.*
3. *Según el estudio, se reportó que por cada 1.0 m<sup>3</sup> de agua residual, del beneficio húmedo del café, tratada por digestión anaerobia se obtiene 0.168 m<sup>3</sup> de biogás. ¿Es rentable este tipo de tecnología en los países productores como alternativa de tratamiento?*

En general la *redacción* se realiza con un lenguaje científico apropiado de acuerdo con lo que se exige y existe un adecuado uso de las reglas ortográficas, aparecen algunos errores tipográficos.

Después de escuchar las respuestas a las interrogantes, si los aspirantes las realizan correctamente, solicito al Tribunal no poner objeción para que se otorgue a Guillermo Ismael Vique Salazar el Título Académico de Ingeniero Electromecánico.

Fecha de elaboración: 20 de enero de 2011

Firma: \_\_\_\_\_



UNIVERSIDAD DE GRANMA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

ACTA DE DISCUSIÓN DE LOS TRABAJOS DE DIPLOMA

Título del trabajo: Evaluación de un reactor VASB y producción de biogás de los residuos líquidos del beneficiado húmedo de café.

Nombre del alumno (a): Guillermo Ismael Vique Salazar

Año académico: \_\_\_\_\_

Tipo de Curso: \_\_\_\_\_

Curso: \_\_\_\_\_

Fecha: 20/01/2011

Tribunal: Presidente Dra. Rubén Tereza Pereira.

Vocal Juz. Alexis Alvarez Labrada.

Secretario Msc. David Verdecia Torres.

Índices evaluados:

1. Calidad del trabajo (uso de la metodología de la investigación científica, actualización científico técnica, uso de las estrategias curriculares, entre otros). 5
2. Capacidad creadora, originalidad e independencia en el desarrollo del trabajo. 5
3. Calidad de la exposición, respuestas a las preguntas y dominio del tema. 4
4. Opinión del tutor. 5
5. Opinión del Oponente. 5
6. Opinión de la entidad laboral. 5

Calificación otorgada según los índices evaluados: Excelente (5 puntos)

Presentación en eventos científicos: \_\_\_\_\_

Firma del presidente: \_\_\_\_\_



Firma del alumno(a): \_\_\_\_\_

Guillermo Ismael Vique Salazar

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente a Dios por la vida que nos ha concedido para llegar a alcanzar las metas propuestas ya que es uno de los principales logros anhelados en nuestra vida como profesionales.

A mis padres y familia toda, que contribuyeron con su incondicional apoyo para fortalecer mis esfuerzos.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi por habernos puesto a nuestro alcance las oportunidades de realizarnos como profesionales de la república del Ecuador.

Al Ing. Yans Guardia Puebla quien con sus conocimientos y experiencias ha sabido orientar y conducir en el desarrollo de la tesis.

A todos mis amigos quienes me ayudaron de muchas maneras y creyeron en mí, y también a los que no lo hicieron.

Muchas Gracias

## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermanos que en todo momento y circunstancias de la vida me han brindado su apoyo invaluable, espero haber llenado sus expectativas.

A todas las personas que de muchas maneras me supieron ayudar con humildad en mis distintas etapas de mi formación integral y profesional.

A mis amigos y familiares, y porque no, a los que ya no están que de alguna manera supieron valorar mis esfuerzos.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
CARRERA DE INGENIERIA EN CIENCIAS Y APLICADAS  
Latacunga – Ecuador

---

**TEMA: “EVALUACIÓN DE UN REACTOR UASB Y PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LOS RESIDUALES LÍQUIDOS DEL BENEFICIADO HÚMEDO DE CAFÉ”**

**Autores:**

Washington Javier Verdezoto Acurio

Guillermo Ismael Vique Salazar

**RESUMEN**

Los residuales líquidos del beneficiado de café constituyen unos de los principales contaminantes de los recursos hídricos de las zonas cafetaleras; por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales producidas durante el beneficio húmedo de café en un reactor UASB recirculando el 50 % del flujo. Se evaluaron tres diferentes valores de carga orgánica volumétrica (COV), lo que provocó una disminución del tiempo de retención hidráulico (TRH). El arranque del reactor se realizó incrementando semanalmente la demanda bioquímica de oxígeno (DQO) hasta alcanzar el primer valor de COV de evaluación; este proceso se realizó en 4 semanas. Se comprobó que con una COV de  $2.91 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  y ajustando el pH de entrada a 7.0 con bicarbonato de sodio, se obtienen eficiencias de remoción de la carga contaminante superiores al 80% y valores de alcalinidad a índice de alcalinidad de  $2000 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$  y superiores a 0.5, respectivamente. Las concentraciones de ácidos grasos volátiles totales como la suma de los ácidos acético, propiónico y butírico fueron de  $184 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; la concentración de sólidos totales en el efluente del reactor mantuvo valores cercanos a  $170 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . De este estudio se concluyó que se pueden obtener  $0.168 \text{ m}^3$  de biogás por cada  $1.0 \text{ m}^3$  de aguas residuales de café tratado de forma anaerobia con una concentración de metano ( $\text{CH}_4$ ) de 61%. Este trabajo evidencia que la digestión anaerobia es una opción adecuada en el tratamiento de éstos residuales.

## ABSTRACT

The liquid sewage of the processing of coffee constitutes one of the main polluting agents of the hydric resources of the coffee zones; that's why the objective of this work was to evaluate the anaerobic biodegradability of wastewaters produced during the wet processing of coffee in a reactor UASB recirculating 50% of the flow. Three different values from organic loading rate (OLR) were evaluated, which brought about a diminution of the hydraulic retention time (HRT). The start-up of reactor was realized weekly increasing the chemical demand of oxygen (COD) until reaching the first value of evaluation OLR; this process was realized in 4 weeks. It was verified respectively that with a OLR of  $2,91 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  and fitting the pH of entrance to 7,0 with sodium bicarbonate, efficiencies of removal of the polluting load are obtained upon 80% and alkalinity values of  $2000 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$  and alkalinity index of 0,5. The totals volatile fatty acid concentrations like the sum of acids acetic, propionic and butyric were of  $184 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; the total solid concentration in the effluent of the reactor maintained values near to  $170 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . From this study one concluded that  $0.168 \text{ m}^3$  of biogas by each  $1.0 \text{ m}^3$  wastewater can be obtained of coffee treated about anaerobic form with a concentration of methane ( $\text{CH}_4$ ) of 61%. This work shows that the anaerobic digestion is an appropriated option in the treatment of this sewage.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	118
2. ESTADO ACTUAL DEL TEMA.....	22
2.1 El proceso de Digestión Anaerobia .....	22
2.2 Historia de la tecnología.....	23
2.3 Importancia de los procesos anaerobios en el tratamiento de aguas residuales .....	24
2.4 Etapas de la Digestión Anaerobia .....	25
2.5 Factores que influyen en la Digestión Anaerobia de las aguas residuales .....	299
2.6 Reactores anaerobios metanogénicos .....	332
2.7 Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB) .....	33
2.9 La Industria cafetalera .....	34
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	37
3.1. Descripción de los experimentos.....	37
3.2. Variables medidas .....	40
3.3 Cálculos .....	443
3.4 Análisis estadístico .....	44
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1. Remoción de la carga contaminante.....	45
4.2 Efecto del pH y alcalinidad .....	47
4.3 Remoción de AGV .....	50
4.4 Remoción de sólidos .....	50
4.5 Producción y composición del biogás.....	53
5. CONCLUSIONES .....	56
6. RECOMENDACIONES .....	57
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	58
8. ANEXOS.....	61

## **SIMBOLOGÍA**

AGV: Ácidos grasos volátiles

COV: Carga orgánica volumétrica

DQO: Demanda bioquímica de oxígeno

TRH: Tiempo de retención hidráulico

UASB: Reactor de flujo ascendente con manto de lodos

ST: Sólidos totales

OPHA: Bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno

SSV: Sólidos suspendidos volátiles

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La producción de café representa una actividad de gran importancia en varios países tropicales, con una producción anual de más de 5,5 millones de quintales (*Houbron et al., 2003*). El café maduro presenta una composición en la cual el grano, que es la parte aprovechable para el proceso, representa el 20% del volumen total de la fruta. El procesamiento de extracción del fruto (beneficiado) genera aproximadamente un 80% del volumen procesado en calidad de desecho (*Orozco et al., 2005*). Existen dos tipos de proceso de beneficiado: seco y húmedo. El beneficiado húmedo es el método de procesamiento de café más utilizado en Centroamérica, Colombia, México y Cuba; se utiliza agua como medio facilitador o como medio de transporte.

El método surgió como una alternativa para solucionar el problema de la fermentación inmediata y excesiva del café en las zonas tropicales. Luego de la cosecha de la cereza se eliminan los componentes externos; después los frutos son depositados en despulpadoras para eliminar el epicarpio o pulpa. Seguidamente se utilizan tanques de fermentación para obtener la hidrólisis de mucílago mediante la acción de enzimas propias del grano y microorganismos en el agua en donde el tiempo de fermentación es variable; posteriormente se realiza la etapa de lavado (*Bello et al., 1993; Cervantes, 1998*).

El proceso consume grandes cantidades de agua, la cual posteriormente es retornada, en la mayoría de los casos, a fuentes de agua superficial, generalmente ríos, arrastrando mucílago y pulpa (*Bello-Mendoza y Castillo-Rivera, 1998*); provocando un importante impacto ambiental, entre los que se encuentran: i) disminución del oxígeno disuelto; ii) disminución del pH; iii) contaminación visual y del aire; iv) turbidez por materia disuelta y suspendida (*Bello-Mendoza y Castillo-Rivera, 1998*;

Houbron *et al.*, 2003; Narasimba *et al.*, 2004; Devi *et al.*, 2008). La concentración del agua residual del efluente dependerá del manejo del agua en la planta, el tipo de tecnología utilizada, así como de las técnicas para la remoción de los sólidos (Fernandez y Foster, 1993).

Cuba es un país que cuya economía ha estado sustentada por la agricultura y dentro de ésta, el café desempeña un papel de importancia capital. Sin embargo, a la vez que reporta cuantiosos beneficios, crea serios problemas ambientales. El proceso de beneficiado húmedo de café utiliza por cada 1kg de café cereza, aproximadamente, 4 y 10 L de agua para el despulpe y lavado, respectivamente (Fernandez, 2005). Las características físico-químicas de las aguas residuales, y su contaminación orgánica, con un buen grado de biodegradabilidad y presente en forma disuelta, señalan al los métodos biológicos como los más apropiados para su tratamiento (Rodríguez *et al.*, 2000).

Reactores, conocidos como digestores de alta tasa, pueden manejar residuos a altas COV, grandes velocidades de flujo ascendente y bajos TRH; por eso, menos volumen de reactor y espacio es requerido y al mismo tiempo grandes volúmenes de biogás es producido. Un ejemplo es el UASB. El reactor UASB ha sido ampliamente utilizado en el tratamiento de varios tipos de aguas residuales. El éxito del concepto del UASB se basa en la entrada del agua residual por un denso lecho de lodo sedimentado en la parte inferior del reactor en donde el proceso biológico toma lugar, siendo capaz de retener altas concentraciones de biomasa con alta actividad específica y buenas reducciones de DQO (Kwan-Chow y Zhenxiang, 1991; Rajeshwari *et al.*, 2000). El lecho de lodos está formado por densos agregados que tienen buenas propiedades de sedimentación; la turbulencia natural, provocada por el flujo de entrada y la producción de biogás, provee un buen contacto entre la biomasa y el agua residual (Heertjes y Meer, 1978).

Teniendo en cuenta la necesidad de encontrar alternativas de tratamiento con vistas fundamentalmente a reducir la carga orgánica contaminante de estos efluentes, contribuyendo al desarrollo de tecnologías limpias y a su vez promover la obtención de productos con mayor valor añadido que permitan valorizar las tecnologías propuestas; se desarrolló el siguiente trabajo, para aportar a la solución del problema.

### ***Problema Científico***

Las aguas residuales del beneficio húmedo de café poseen una alta carga orgánica contaminante, que si son vertidos al medio sin tratamiento previo, provocan un importante impacto ambiental a los cuerpos de aguas superficiales.

### ***Objeto de la Investigación***

El tratamiento anaerobio de las aguas residuales del beneficio de café.

### ***Hipótesis***

Con el uso de un reactor UASB para la digestión anaerobia de las aguas residuales del beneficiado húmedo de café y recirculando el 50% del flujo, permitirá una reducción eficiente de la carga orgánica contaminante y la obtención de un subproducto de valor agregado como el biogás.

### ***Aporte metodológico***

Se establece, a partir de una evaluación detallada de la digestión anaerobia, los parámetros de diseño y operación de un reactor UASB, así como de la conversión a

biogás, un sistema adecuado para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio húmedo de café.

### ***Valor Práctico***

Aplicar una tecnología efectiva para tratar, a escala de laboratorio, las aguas residuales del beneficio húmedo de café, contribuyendo a minimizar el impacto ambiental de los residuales y producir biogás como fuente de energía.

## ***OBJETIVO GENERAL***

Evaluar la biodegradación anaerobia de las aguas residuales del beneficiado húmedo de café en un reactor de flujo ascendente con manto de lodos (UASB) recirculando el 50% del flujo.

## ***OBJETIVOS ESPECÍFICOS***

- Evaluar la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficiado húmedo del café en un sistema con recirculación en un reactor UASB recirculando el 50% del flujo.
- Determinar los mejores parámetros de operación del reactor anaerobio UASB para el tratamiento de las aguas residuales del beneficiado húmedo del café.

## **2. ESTADO ACTUAL DEL TEMA**

Los microorganismos juegan un importante papel en los ciclos biogeoquímicos. Como sugiere este término tanto los procesos químicos como los biológicos están involucrados en el reciclaje y transformación de los nutrientes, los cuales son esenciales tanto para los microorganismos, como para las plantas y los animales. La descomposición de los contaminantes presentes en las aguas residuales puede ser aceleradas mediante el control del medio ambiente en el que se desarrollan los microorganismos responsables del proceso depurador.

El tratamiento biológico consiste en un consorcio de micro y macroorganismos que remueven los materiales orgánicos e inorgánicos transformando al líquido en ambientalmente aceptable evitando así que estos lleguen a ríos o a otras fuentes de abastecimiento. El proceso de tratamiento biológico controla el medio ambiente donde se desarrollan los microorganismos, de modo tal que se consigan condiciones de crecimiento óptimas.

### **2.1 El proceso de Digestión Anaerobia**

La digestión anaerobia es un proceso biológico por el cual, a través de una compleja serie de reacciones bioquímicas, la materia orgánica se descompone por la actividad metabólica de los microorganismos en ausencia de oxígeno, produciéndose un gas con alto contenido energético (biogás) y un lodo residual que presenta, en muchos casos un alto poder fertilizante (Paez y Baz, 1999; Rodríguez y col, 2003).

Por ello, la digestión anaerobia aplicada al tratamiento de efluentes industriales permite reducir su contenido orgánico, al tiempo que se produce un gas combustible (60-80% de metano). El que se incremente uno de estos objetivos dependerá de las necesidades de descontaminación del medio y el origen del residuo.

## **2.2 Historia de la tecnología**

El proceso anaerobio ocurre de forma espontánea en la naturaleza para degradar la materia orgánica, produciendo, por ejemplo, el gas de los pantanos, el gas natural de yacimientos subterráneos o incluso el gas metabólico producido en el estómago de los rumiantes. En el siglo XVIII Volta investigó e identificó el gas de los pantanos. Dalton, en 1804, estableció la composición química del ( $\text{CH}_4$ ). Hasta mediados del siglo XIX no se tuvo certeza de la participación de organismos vivos unicelulares en el proceso, siendo Beauchamp, en 1868, quien estableció la presencia de microorganismos en los procesos de producción de metano. Pasteur descubrió que mediante la temperatura se podía favorecer el desarrollo de los microorganismos más interesantes. Propoff, en 1875, descubrió que la formación de biogás sólo se producía en condiciones anaerobias. En 1884, Pasteur investigó sobre la producción de biogás a partir de residuos animales, proponiendo la utilización del biogás para la iluminación de las calles.

En los países industrializados la historia de la tecnología de biometanización ha sido diferente y el desarrollo ha estado motivado más por motivaciones medioambientales que puramente energéticas, pero a partir de la crisis energética de 1973, y durante la década de los ochenta, volvió a adquirir cierta importancia como forma de recuperación energética en explotaciones agropecuarias y agroindustriales.

Con la bajada de los precios del petróleo, a finales de los años ochenta, el interés por la tecnología de digestión anaerobia volvió a decaer, aunque en algunos países industrializados se han desarrollado importantes programas de desarrollo de plantas anaerobias a escala industrial, teniendo como objetivos principales la gestión de residuos, principalmente ganaderos, la estabilización e higienización de los mismos, y el fomento de las energías renovables, para disminuir la emisión neta de gases de efecto invernadero. El principal exponente es Dinamarca, donde, en 1985, comenzó un programa de demostración, desarrollado conjuntamente por los ministerios de agricultura, energía y medio ambiente, en un esfuerzo por demostrar el potencial de grandes plantas de digestión anaerobia como productores de energía eléctrica. Así, en 1997 se contabilizaban 19 grandes plantas que tratan conjuntamente residuos de origen industrial, residuos urbanos, lodos de depuradora y residuos ganaderos, aunque en el año 2000 los objetivos eran duplicar la producción, y continuar aumentando hasta el año 2030.

### **2.3 Importancia de los procesos anaerobios en el tratamiento de aguas residuales.**

Aunque tradicionalmente se han empleado procesos de tipo químico-físicos en el tratamiento primario de aguas residuales (sedimentación, coagulación-floculación, etc.) y de tipo biológico aerobio (proceso de lodos activados) en el tratamiento secundario, en las últimas décadas se ha puesto de manifiesto el interés por los procesos biológicos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales con altos niveles de carga orgánica (Van Lier *et al.*, 2001).

El mayor uso de los procesos de biodegradación anaerobia para el tratamiento de aguas residuales se debe a que los tratamientos químico-físicos no son muy aconsejables desde el punto de vista económico, al necesitar el aporte continuo de reactivos y un espacio de operación casi siempre muy grande, y en el caso de los

procesos aerobios, estos requieren de un aporte constante de oxígeno al agua residual; lo cual, además de encarecer el proceso, por los gastos energéticos que conlleva la aireación, provoca que los microorganismos, al obtener mucha energía del proceso de respiración, tengan un crecimiento rápido obteniéndose así un exceso de lodos no estabilizados. En cambio, en el proceso anaerobio, los microorganismos crecen en ausencia de oxígeno y tiene un metabolismo mucho mas lento que en el caso aerobio, con lo cual, la producción de los lodos es mucho menor; evitándose así problemas de exceso de lodos y su posterior estabilización. Este crecimiento más lento implica además una reducción de la cantidad necesaria de nutrientes en el medio. Otras ventajas adicionales son la posibilidad de tratamiento directo de corrientes con alta carga orgánica, y la generación de un gas con alto contenido energético (Speece,1996).

A pesar de todo esto, la digestión anaerobia también presenta algunos inconvenientes relacionados fundamentalmente con la puesta en marcha, la cual puede durar un tiempo largo, debido a la baja velocidad de crecimiento de las bacterias anaerobias y a las estrictas condiciones físico-químicas que hay que mantener. Sin embargo, una vez pasada esta etapa, los procesos anaerobios son muy estables y robustos (Kleerebenzem y Macarie, 2003).

## **2.4 Etapas de la Digestión Anaerobia**

La digestión anaerobia es un proceso altamente complejo, tanto en la naturaleza como en los reactores anaerobios. Los sustratos que deben degradarse son complejos y están compuestos por diferentes tipos de polímeros (proteínas, carbohidratos, lípidos) que los microorganismos deben metabolizar para su uso, como fuente de energía y para biosintetizar todos sus componentes celulares (Lowe, 1993).

La digestión anaerobia de la materia orgánica a metano se efectúa por la acción combinada de una amplia variedad de bacterias y a pesar de que el proceso no es una secuencia de reacciones independientes, sino que está caracterizado por un complejo de interacciones mutuas entre diferentes especies microbianas, puede ser agrupado en tres etapas fundamentales (McInerney y Bryant, 1981) las cuales se producen consecuentemente durante el proceso de biodegradación anaerobia (Figura 2.1).

### *Etapa de hidrólisis y fermentación*

En esta etapa los polímeros naturales, tales como las proteínas, grasas, polisacáridos o compuestos de más bajo peso molecular (aminoácidos, sacáridos, compuestos aromáticos, etc.) son inicialmente hidrolizados por enzimas extracelulares, por ser demasiado grandes para penetrar a través de la membrana celular. Estas enzimas extracelulares son producidas dentro de las bacterias hidrolíticas y excretadas al exterior de la célula, donde pueden hidrolizar los sustratos poliméricos hasta sus monómeros que pueden atravesar fácilmente la membrana celular de las bacterias fermentativas, que metaboliza estos monómeros a alcoholes, AGV e hidrógeno.

El resultado total de la fermentación es la conversión de sustratos neutros en ácidos orgánicos relativamente fuertes. Por ello el término acidificación es también un modo adecuado para denominar a la fermentación. Las bacterias responsables de esta etapa pertenecen a diferentes tipos de grupos y pueden ser anaerobias facultativas o estrictas. Es importante destacar que en esta etapa, si no se controla bien el reactor puede ocurrir una desestabilización del proceso completo, ya que en caso de una sobrecarga, la hidrólisis de la materia orgánica provoca una sobreproducción de ácidos que acidificarán el medio e inhibirán el proceso. Además es posible una producción excesiva de hidrógeno, lo que también inhibe la metanogénesis.

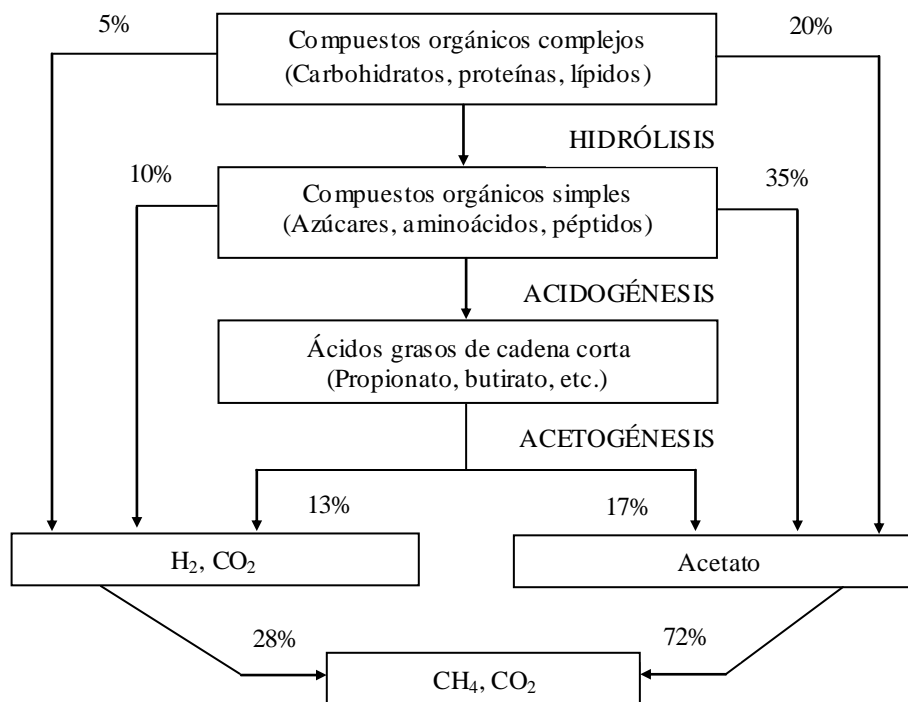


Figura 2.1 Etapas que siguen los compuestos contaminantes al ser degradados por digestión anaerobia (Speece, 1996).

### *Etapa de acetogénesis*

En esta etapa los productos de la fermentación son degradados a ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, por un grupo de bacterias denominadas bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno ó OHPA en inglés (obligate hydrogen producing acetogen). La particularidad de estas bacterias, es que son inhibidas por el hidrógeno que producen, por lo que es necesario que este no se acumule en el medio. Por esta razón las bacterias OHPA tiene estrecha relación con las bacterias denominadas hidrogenofílicas que por lo general son bacterias metanogénicas, pero si el medio contiene sulfatos en concentraciones apreciables, las bacterias sulfato-reductoras sustituirán a las metanogénicas. Esta relación sintrófica entre bacterias productoras de hidrogeno y bacterias hidrogenofilicas, y que procura una ventaja para los donadores de hidrogeno recibe el nombre de transferencia interespecie de hidrógeno.

Una sobrecarga al reactor o una inhibición de las bacterias hidrogenofílicas, puede conducir a una sobreproducción de hidrógeno cuya acumulación va a inhibir la digestión anaerobia, lo que conduciría finalmente al fallo del reactor.

### ***Etapa metanogénica***

Es la última etapa del proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica, y se lleva a cabo por el grupo de las bacterias metanogénicas. Al igual que las bacterias de la etapa anterior, las metanogénicas son anaerobias estrictas. Las bacterias metanogénicas oxidan un número reducido de compuestos: acetato,  $\text{CO}_2/\text{H}_2$ , formiato, metanol, etc.

Básicamente estas bacterias se pueden dividir en dos grupos tróficos: las bacterias hidrogenofílicas: obtienen su energía de la oxidación del hidrógeno en presencia de dióxido de carbono como aceptor de electrones y las bacterias acetoclásticas: producen metano a partir del grupo metilo del acetato, éstas son de suma importancia, dado que aproximadamente el 70% del metano producido por la digestión anaerobia proviene del acetato, el resto proviene mayoritariamente del  $\text{CO}_2$  y del  $\text{H}_2$ .

La velocidad de crecimiento de las bacterias acetoclásticas es baja. Esta es la razón por la cual los sistemas de tratamiento anaerobios requieren un elevado tiempo de retención de la biomasa. Las bacterias hidrogenofílicas tienen mayor velocidad de crecimiento que las bacterias acetoclásticas. Estas no son consideradas un grupo crítico, sin embargo su habilidad de mantener la presión de hidrógeno muy baja, es la base para que las condiciones termodinámicas sean favorables y proceda una esencial etapa de conversión de sustrato premetanogénica.

## **2.5 Factores que influyen en la Digestión Anaerobia de las aguas residuales**

Los principales factores que influyen en un proceso anaerobio para el tratamiento de aguas residuales están relacionados con aquellos parámetros cuyo control permite un buen crecimiento de la biomasa y por consiguiente, una mayor eficiencia en la remoción de la materia orgánica y en la producción de biogás. Por lo que es importante su conocimiento, para poder evitar cualquier falla en el proceso y tomar las medidas necesarias cuando así se requiera.

Entre los factores de mayor importancia se tienen:

### ***Temperatura***

El efecto de la temperatura es de gran importancia para el desarrollo de la digestión anaerobia, ya que esta altera la actividad de las enzimas y por tanto, varía la velocidad de crecimiento de los microorganismos.

El rango de temperatura para la digestión anaerobia varía entre 10 y 60°C. Sin embargo, las temperaturas óptimas, son la mesófila (30 - 45)°C y la termófila (45 - 60)°C. Casi todos los digestores funcionan dentro de los límites de temperatura mesófila, siendo la óptima 35°C (Zabranzca y col, 2000).

### ***pH***

El pH óptimo para la digestión anaerobia se sitúa entre 6.8 y 7.2, lográndose mantener el equilibrio ecológico requerido. Fuera de estos valores óptimos la digestión puede continuar aunque de forma ineficientemente hasta un pH de 6.2 en donde las bacterias metanogénicas son severamente afectadas (Rozzi, 1984).

### *Nutrientes*

La digestión anaerobia por ser un proceso biológico requiere ciertos nutrientes inorgánicos esenciales para el crecimiento de la biomasa. La ausencia o limitación de estos nutrientes son por lo tanto un factor limitante para el proceso.

Los requerimientos de nutrientes para la población microbiana no se refiere solamente a las necesidades de nitrógeno, fósforo y azufre, sino también la presencia de elementos traza como níquel, cobalto, hierro y molibdeno; los cuales a ciertas concentraciones aumentan la eficiencia del proceso (Mai y col, 2002).

### *Sustancias tóxicas*

Las bacterias metanogénicas y otros microorganismos anaerobios, pueden ser inhibidos en su actividad microbiana por la presencia de sustancias tóxicas. Los compuestos que se consideran tóxicos en un sistema anaerobio se pueden agrupar en tres categorías (Bello, 1995): compuestos cuya toxicidad esta relacionada con el pH (amoníaco, ácido sulfúrico, AGV) (Pind, 2003); compuestos de toxicidad inmediata (compuestos clorados) (Speece, 1996); compuestos que con un pequeño aumento en la concentración pueden volverse tóxicos (metales pesados) (Montalvo y Guerrero, 2003).

La magnitud del efecto tóxico de una sustancia puede ser reducido significativamente por aclimatación de la población de microorganismos al tóxico. La aclimatación implica una reorganización de los recursos metabólicos para vencer los obstáculos metabólicos producidos por el substrato tóxico, más que mutación o selección de las poblaciones.

Los AGV son los más importantes intermediarios del proceso anaerobio, siendo, por ello, fundamental conocer su evolución. Juegan un papel muy importante en la monitorización y control de reactores anaerobios, mostrando una rápida respuesta a las variaciones en el sistema, por ejemplo en el caso de sobrecargas orgánicas, o en el caso de la introducción de tóxicos.

El aumento de su concentración está relacionado con la disminución en la producción de biogás. Además, los ácidos grasos volátiles pueden inhibir algunos de los procesos que tienen lugar en un reactor anaerobio, aunque hay cierta dispersión en la bibliografía. Con concentraciones de ácidos grasos volátiles por debajo de 50 mM, equivalente a 3000 mg acético·L<sup>-1</sup>, no produce ninguna disminución de la producción de metano; es el ácido propiónico el primero que afecta al proceso, mientras que el butírico y el acético han de acumularse por encima de 100 mM (6000 mg·L<sup>-1</sup>) para afectar a la tasa de producción de metano.

### ***Velocidad de carga orgánica (VCO) y tiempo de retención hidráulico (TRH)***

El TRH es un parámetro muy importante, que dependerá típicamente del tipo de reactor utilizado. El TRH, junto con la VCO, determinada por el tipo de substrato, son los principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del digestor. La fracción de materia orgánica degradada aumenta al aumentar el TRH, sin embargo la producción volumétrica de metano (producción por unidad de reactor) disminuye, una vez superado el óptimo. Es por tanto necesario determinar para cada tipo de residuo y de digestor el tiempo de retención que optimiza el proceso.

La carga orgánica es la relación de la cantidad de materia orgánica, expresada normalmente en unidades de DQO o de SV, por unidad de reactor y unidad de tiempo; siendo directamente dependiente de la concentración del substrato y del TRH. Altas cargas orgánicas, en ausencia de inhibidores, proporcionan altas producciones

volumétricas de biogás, pues la resistencia a ciertos inhibidores puede aumentar con la carga orgánica. Sin embargo la inestabilidad aumenta también con el aumento de carga, especialmente en el caso de “sobrecargas” puntuales, que conllevan la acumulación de AGV (Speece, 1996).

## 2.6 Reactores anaerobios metanogénicos

Por mucho tiempo, la digestión anaerobia se consideró como un proceso inestable y problemático el cual, a pesar de sus ventajas, solo podía ser aplicado en casos contados, hasta la década del 80 en que hubo una evolución de los mismos.

La evolución de los procesos anaerobios puede caracterizarse en tres tipos de reactores:

*1. Reactores de primer tipo:* Son aquellos en que la biomasa se encuentra sedimentada o en suspensión, con un mínimo de contacto con el sustrato. En estos se incluyen los digestores convencionales y los reactores de flujo mezclado.

*2. Reactores de segundo tipo:* Se caracterizan porque los microorganismos que son retenidos en el reactor, ya sea por la presencia de un soporte al que se adhieren (arcilla, zeolita, perlas de vidrio, aros de bambú o de algún plástico) o por sedimentación. En este grupo se encuentran los Filtros Anaerobios y el reactor de Flujo Ascendente con Manto de Lodos, este último es conocido por sus siglas en inglés como **UASB** (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

3. *Reactores de tercer tipo*: Contienen los microorganismos en forma de aglomerados o biopelículas adheridas a soportes, los cuales son expandidos o fluidificados.

El estado actual de la biotecnología para el tratamiento de aguas residuales, señala a los de segunda generación como la alternativa más atractiva de tratamiento. Esto se debe a que los primeros requieren de grandes volúmenes de operación y no todos tienen eficiencias aceptables. Por su parte, los de tercera se encuentran aún en etapa de desarrollo a escala de laboratorio y existen pocas instalaciones industriales. Dentro de este grupo los reactores anaerobios que más se han aplicado y se comercializan para el tratamiento de aguas residuales a nivel mundial son el UASB (65%) y el Filtro Anaerobio (10%) (Montalvo y Guerrero, 2003). Estos reactores son altamente eficientes y debido a sus bajos TRH permiten procesar en poco tiempo grandes volúmenes de residual.

## **2.7 Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB)**

La tecnología UASB se perfila como la más adecuada para el tratamiento de una gran variedad de aguas residuales industriales y domésticas, debido a sus bajos costos de construcción, operación y mantenimiento, además de poseer los más altos rendimientos de producción de biogás y altos porcentajes de remoción (Bermúdez y col, 2003).

Estos reactores UASB basan su funcionamiento en la formación de un manto flotante de bacterias dentro del reactor. Este manto constituye un auténtico filtro en el que se produce la metanogénesis y se separa de forma eficiente el gas de la matriz sólida en dependencia de la carga orgánica diaria. Se caracterizan porque operan con

lodos granulares o floculentos de alta velocidad de sedimentación (Hulshoff y col, 2004). Poseen aditamentos muy sencillos en su interior (separadores gas-sólido-líquido) que permiten una eficiente separación de las burbujas de gases y la sedimentación de las partículas que son arrastradas hacia la salida (Figura 2.2).

La no-utilización de empaquetadura resuelve las desventajas de los filtros anaerobios, y el separador de tres fases evita el arrastre de flóculos hasta la tubería de descarga. Por otra parte, como el lodo no está fijo a ningún soporte, las burbujas de gases realizan un efecto de mezclado, que unido a un mezclado producto de las velocidades ascensionales del flujo aceleran el proceso de digestión.

Como única desventaja de este proceso se tiene la complejidad para lograr la aclimatación de los lodos, más aún cuando no se dispone de un inóculo procedente de un reactor similar, como es el caso de muchos países en donde la tecnología no es utilizada. Se ha llegado incluso a comercializar lodos granulares para el arranque de reactores anaerobios, conocidos como “semillas o inóculos”

## **2.9 La Industria cafetalera**

El café como producto agrícola es uno de los principales rubros económicos de muchos países tropicales; el mismo se cultiva en todas las regiones de Cuba: en 9 provincias con 38 Municipios, abarcando un área de 10221.3 caballerías, centrada la producción en la región oriental con un 83%, luego la región central con un 12% y por último la occidental con un 5%. El procesamiento del grano del café, conocido como “beneficio”, se realiza en 343 centros de despulpe de beneficio húmedo, 31 plantas de beneficio seco y 4 centros de exportación; generando una producción de 22727.2 toneladas anuales de café oro, del cual el 80% pertenece a la región oriental; provocando esto, aproximadamente, 56818 toneladas anuales de pulpa de café (como principal residual sólido) y unos 280000 m<sup>3</sup> anuales de agua de lavado y despulpe (Bermúdez y col 1999a).

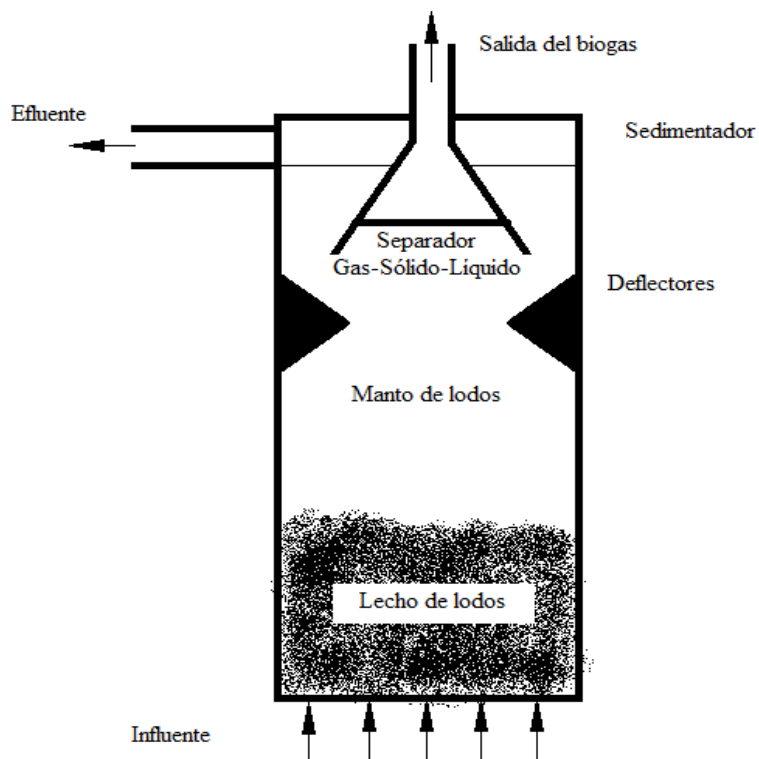


Figura 2.2 Componentes principales del reactor UASB

La importancia de la industria del café para la economía es evidente, sin embargo a la vez que reporta cuantiosos beneficios, también se engendran serios problemas ambientales debido a que los subproductos derivados son potenciales contaminantes.

Para que se tenga una idea, de 1 kilogramo de café cereza, alrededor del 40% de su peso seco representa pulpa de café, 3% cascarilla de café y 22% mucílago, generándose además 4 L de agua de despulpe y 10 L de agua de lavado. Aunque en la actualidad existe la tendencia a la disminución del agua empleada en el proceso, usando las llamadas “Despulpadoras ecológicas”, que logran reducir los volúmenes de aguas residuales entre 2 y 4 litros por kilogramo de café.

Sin embargo estos residuales constituyen una importante fuente de energía, mediante su tratamiento anaerobio y conversión en biogás, pudiendo ser utilizable en los mismos procesos de beneficio, en sustitución del Gas-Oil empleado por las maquinas despulpadoras (aproximadamente 410 toneladas anuales) y como fuente de energía para la utilización en las comunidades cafetaleras aledañas, como combustible para cocción de alimentos en comedores de albergues o en casas particulares aledañas; además de eliminar un foco de contaminación ambiental considerable y producir bioabonos de primera calidad (Bermúdez y col, 1999b).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción de los experimentos.

Los experimentos de laboratorio se realizaron en un reactor UASB de vidrio, con diámetro interno de 76,2 mm y alturas de 430 mm, con volúmenes útiles de 2,5 L; operando en condiciones controladas de mesofilia ( $37\pm 2$  °C). El reactor se ubicó en el laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El inóculo utilizado fue lodo granular proveniente de un reactor UASB que trata aguas residuales en una empresa productora de jugos enlatados, con una concentración de  $73,56 \text{ gSSV}\cdot\text{L}^{-1}$ ; el volumen de lodo inoculado fue de 0,40 L. El reactor fue alimentado con agua residual proveniente de una planta de procesamiento húmedo de café localizada en la comunidad de Ixhuatlán, en el estado de Veracruz, México (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Composición promedio de las aguas residuales del procesamiento del café

Parámetro	Valor
DQO ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	2503±108
pH	3.76±0.10
ST ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	1358
STV ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	1076
SST ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	282
SSV ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	259

El experimento fue evaluado durante 89 días; se operó con relación de recirculación del 50 % del flujo en la entrada (Tabla 3.2; Tabla 3.3; Figura 3.1; Figura 3.2).

Tabla 3.2 Características de reactor UASB

Diámetro (mm)	70.0
Altura (mm)	650.0
Volumen reactor L	2.5
Volumen inóculo (L)	0.40

Tabla 3.3 Parámetros operacionales

Parámetros	Arranque				Condiciones de evaluación		
	1	2	3	4	C1	C2	C3
TRH total (h)	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	18.5	15.5
Q (L·h <sup>-1</sup> )	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.16
COV (kgDQO·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	1.30±0.04	1.69±0.06	2.35±0.10	2.93±0.08	2.91±0.10	3.32±0.20	3.86±0.12

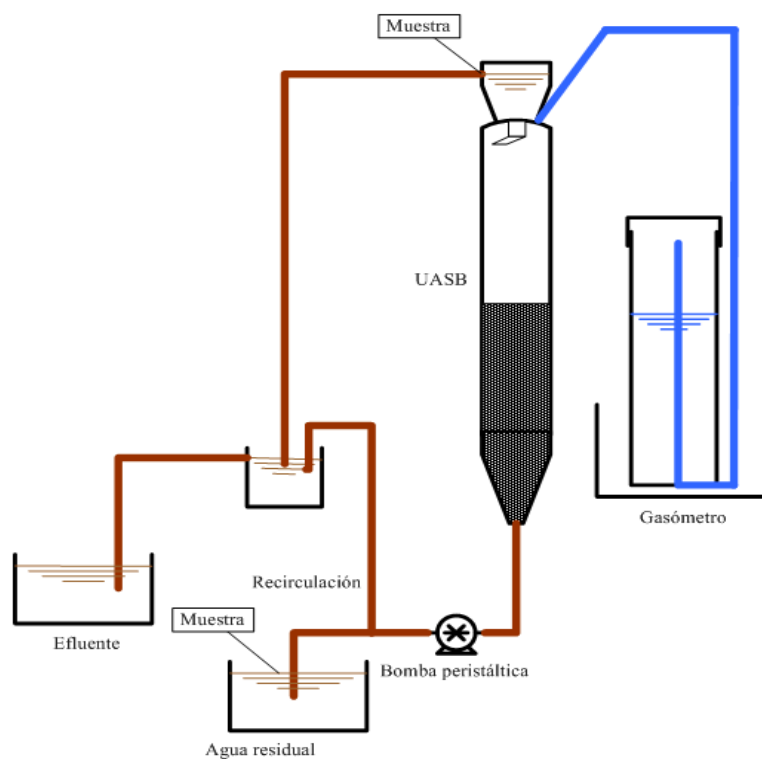


Figura 3.1 Esquema del arreglo experimental



Figura 3.2 Sistema UASB, con recirculación de 50 % del flujo

El experimento fue realizado continuamente iniciando con la arrancada de los reactores, donde se fue incrementando semanalmente la DQO del flujo de entrada, para así incrementar la COV hasta la de diseño; esta etapa tuvo un período de 4 semanas. Se utilizaron las siguientes COV:  $1.30 \pm 0.04$ ;  $1.69 \pm 0.06$ ;  $2.35 \pm 0.10$ ;  $2.93 \pm 0.08 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , respectivamente. Terminada la etapa de arrancada se procedió la evaluación de 3 diferentes condiciones operacionales, en cada sistema los períodos fueron de 3 semanas cada uno, incrementando la COV de los reactores; las condiciones operacionales se muestran en la Tabla 3.3.

### 3.2. Variables de medidas

#### *Demanda Bioquímica de Oxígeno*

Soluciones:

- *Ácido sulfúrico con plata.* Se añadieron 10.12 g de sulfato de plata ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ), en polvo (grado analítico) por cada litro de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) concentrado al 98.7% y posteriormente se disolvió durante dos días a temperatura ambiente.

- *Solución estándar de dicromato de potasio 0.25N.* Se disolvieron 12.25 g de dicromato de potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), previamente secado a  $103^\circ\text{C}$  por dos horas, en 500 mL de agua destilada con un matraz volumétrico y posteriormente se aforó a 1000 mL.

- *Solución indicadora de ferroína.* Se disolvieron 1.485 g de 1,10-fenantrolina monohidratada y 695 mg de sulfato férrico ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) en 80 ml de agua destilada y posteriormente se aforó a 100 mL.

- *Solución FAS (sulfato ferroso amoniacal).* Se disolvió 39.2 g de  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  en 600 ml de agua destilada y se agregaron cuidadosamente 20.0 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, se enfrió y posteriormente se aforó a 1000 mL con agua destilada.

- *Sulfato mercúrico (HgSO<sub>4</sub>).*

En tubos de 20.0 x 150.0 mm, se adicionaron 5.0 ml de muestra o de su dilución y un “blanco caliente”, en la cual se adicionó agua destilada en lugar de la muestra. Se agregaron 3.0 ml de dicromato de potasio, una pequeña porción de sulfato mercúrico y 7.0 ml del reactivo de ácido sulfúrico; posteriormente se pusieron a digerir durante 2 horas. Posteriormente se agregaron dos gotas del indicador de ferroína y tituló con la solución FAS agitando constantemente, hasta tomar un color de indicador azul-verdoso a café rojizo.

### ***pH y alcalinidad***

Se calibró el potenciómetro con las soluciones buffer de pH 7.0 y 4.0. Tomaron 25 mL de la muestra problema y se midió el pH inicial; se tituló con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 0.2 N agitando suavemente la muestra hasta alcanzar un valor de pH a 5.75 y se continuó la titulación hasta alcanzar un pH de 4.30.

Se calculó la alcalinidad con la siguiente fórmula:

$$\text{Alcalinidad} = \frac{(5000)(N)(Vol.)}{mL \text{ de muestra}}$$

Donde:

*N*; Normalidad del ácido utilizado

*Vol.*; Cantidad de ácido utilizado en mL para alcanzar pH 4.30.

Relación de alcalinidades ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{mL \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ 0.2N hasta pH 5.75}}{mL \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ 0.2N hasta pH 4.30 (totales)}}$$

### ***Ácidos grasos volátiles (AGV)***

Preparación de la muestra:

Se tomaron 2.0 mL de muestra con una jeringa y se depositaron en un tubo Eppendorf, se agregaron 2 gotitas de ácido clorhídrico (solución 1:1), posteriormente se centrifugó por 30 minutos a una velocidad de 3500 revoluciones por minuto en una microcentrifuga Eppendorf. Al término de la centrifugación se extrajo el sobrenadante y se filtró, colocando el filtrado en otro tubo Eppendorf. Las muestras fueron preservadas en refrigeración a 4°C.

#### ***Preparación del estándar***

Se tomaron 5.0 mL de ácido acético, 2.0 mL ácido propiónico y 2.0 mL de ácido y se aforó a 1000 mL en un matraz volumétrico. Las concertaciones finales son de 449.0; 198.0; 198.0 para ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico, respectivamente. Las muestras fueron preservadas en refrigeración a 4°C.

Se determinó la concentración de ácidos grasos volátiles por cromatografía de gases (Cromatógrafo SRI modelo 8610, con detector de flama, columna Zebron, con gas acarreador Helio a 30psi.

#### ***Producción y composición del biogás***

El volumen de biogás producido en el reactor, se midió por desplazamiento del líquido en probetas de 100 mL. La composición de CH<sub>4</sub> se determinó por Cromatografía de Gases (Cromatógrafo: Fisher Gas Partitioner Modelo 1200, con detector de conductividad térmica, de doble columna Porapak Q y malla molecular SA), gas acarreador Helio a 25 mL/min, para la cual se procedió primeramente a realizar una curva estándar de CH<sub>4</sub>. Para la curva se tomaron en una jeringa proporciones de CH<sub>4</sub>, como se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Proporciones de CH<sub>4</sub> inyectados

Tubos	CH <sub>4</sub> (mL)	CH <sub>4</sub> (%)
1	1	10
2	2	20
3	3	30
4	4	40
5	5	50
6	6	60
7	7	70
8	8	80
9	9	90
10	10	100

Finalmente se realizó una regresión lineal entre los porcentajes de CH<sub>4</sub> inyectados y los centímetros medidos de las lecturas del cromatógrafo (Anexo 1).

### 3.3 Cálculos

Los parámetros de eficiencia considerados en este estudio fueron:

- *Disminución del contaminante (R)(%)*

$$R = \frac{S_0 - S}{S_0}$$

Donde:

S<sub>0</sub>; Concentración del contaminante en la entrada.

S; Concentración del contaminante en la salida.

### **3.4 Análisis estadístico**

EL análisis de las eficiencias de remociones del residual empleado se efectuó con un ANOVA para un modelo por bloques completos (*Montgomery, 1991*), pues se controlaba sistemáticamente la variabilidad producida; no se tomó en consideración la variabilidad producida por el volumen, forma y velocidad del flujo de entrada. El paquete estadístico empleado fue el STATGRAPHICS (*Statgraphics, 2000*). Una vez que se detectaron diferencias significativas entre las variables, se realizó pruebas de rangos de medias por el método de Duncan ( $p < 0.1$ ).

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

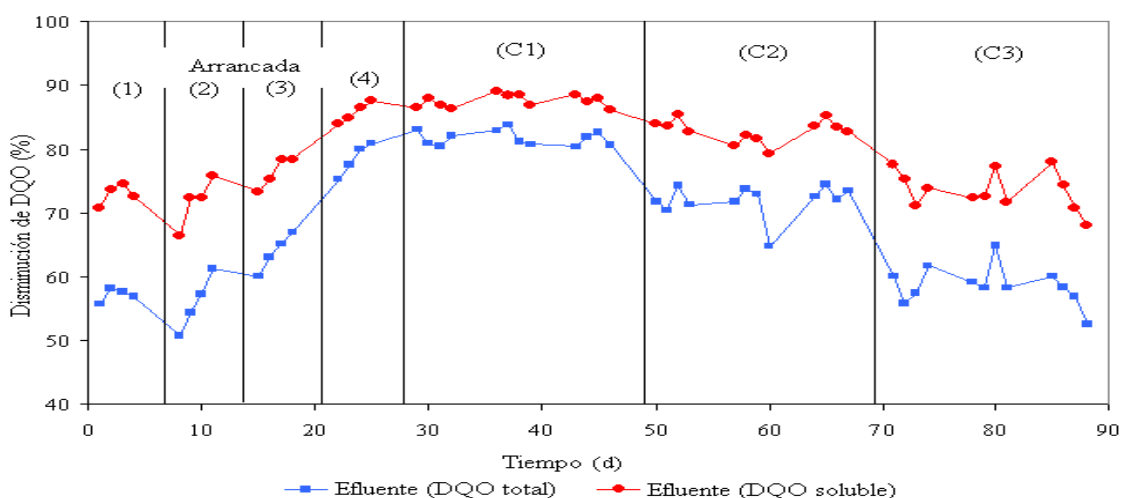
### **4.1. Remoción de la carga contaminante**

El agua residual del procesamiento húmedo del café es por naturaleza ácida, por lo que es necesaria la adición de álcali para prevenir la caída de pH, así que en este estudio se utilizó bicarbonato de sodio en el agua residual que entra en el reactor. A partir de los datos obtenidos en cada uno de los sistemas evaluados durante la investigación se pudo comprobar que las aguas residuales del procesamiento húmedo del café pueden ser tratadas por digestión anaerobia.

La Figura 4.1 muestra la variación en la remoción de la carga contaminante para los niveles de COV evaluados. La etapa de arranque se caracterizó por un incremento en los niveles de remoción de la DQO, evidencia de la respuesta favorable del reactor a la estrategia empleada; aunque al elevar la COV al iniciar la segunda semana de arranque se observó una leve caída del proceso pero se recuperó rápidamente en los próximos días. En la evaluación de C1 se observó un comportamiento estable en los niveles de remoción de la carga contaminante, pero al evaluar a C2 y C3 se observó un deterioro continuo del proceso evidencia del efecto de la disminución de TRH.

Se encontraron diferencias significativas en el análisis de varianza (ANOVA) del porcentaje de remoción de la DQO entre las COV evaluadas siendo C1 la de mejor comportamiento, para  $p < 0.1$  % según la prueba de rangos de media de Duncan (Tabla 4.1), con un valor promedio de 81.68%; estos valores son altos en comparación con los obtenidos por (Dinsdale *et al.*, 1997b) y (Bello-Mendoza y Castillo-Rivera, 1998) en donde obtuvieron un 63.0 y 77.2 % en la remoción de la DQO total, respectivamente; y se corresponden con éstos obtenidos por (Houbron *et al.*, 2003) donde obtuvo un 85 % de eliminación de la DQO en un sistema con separación de fases, aunque es de señalar que se aplica recirculación del 50 % del flujo; esta medida provee una dilución del flujo de entrada, retorno de la alcalinidad producida en el reactor lo que produce un aumento del pH en el efluente del reactor (Costello, 1989; Romli *et al.*, 1994).

La disminución en la eficiencia en la remoción en C2 y C3 se relaciona con el aumento del TRH en el reactor; este parámetro, en conjunto con la COV y la velocidad del flujo ascendente, tiene un importante efecto en el desempeño del reactor pues un incremento en sus valores produce una disminución en la eficiencia de remoción, lo que concuerda con otros trabajos (Lier *et al.*, 2001; Mahmoud *et al.*, 2003; Arrhá *et al.*, 2006).



(1), (2), (3), (4), períodos de arranque de los reactores; (C1), (C2), (C3), períodos de evaluación de las COV.

Figura 4.1 Variaciones en la eficiencia de eliminación de la DQO.

Tabla 4.1 Contraste múltiple de rangos entre los sistemas y efecto de las COV evaluadas

	Sistema	Media	Contraste	Diferencia
UASB	C1	81.68	C1-C2	9.73*
	C2	71.95	C1-C3	23.08*
	C3	58.60	C2-C3	13.35*

\*Indica diferencia significativa a 0.1%

## 4.2 Efecto del pH y alcalinidad

El arranque del reactor se realizó ajustando el pH de entrada a un 7.0 (neutro). El comportamiento pH se mostró generalmente cercano o superior a 8.0 en la etapa de arranque, manteniendo esos valores en la evaluación de C1 y parte de C2; el día 64 se procedió a disminuir el pH de entrada a 6.5 descendiendo el pH del efluente a un rango de valores entre 6.6 y 7.1 con una media de  $6.89 \pm 0.21$  (Figura 4.2).

La capacidad de amortiguamiento es referida como la alcalinidad en la digestión anaerobia, el cual es un equilibrio entre el dióxido de carbono y los iones bicarbonato lo que provee resistencia a los cambios significativos y rápidos en el pH y es proporcional a la concentración de bicarbonato. Incrementando la baja capacidad de amortiguamiento es la mejor forma enfrentar los impactos provocados por los factores ambientales y de operación por la adición de bases fuertes para convertir el dióxido de carbono del medio a bicarbonato, un ejemplo es la adición directa de bicarbonato de sodio (*Guwy et al., 1997*); la adición directa de bicarbonato es lo más adecuado para mantener un pH constante (*Gunaseelan, 1995*), aunque una excesiva

alcalinidad puede llevar a la desintegración del gránulo y a la falla del proceso (Sandberg y Ahring, 1992).

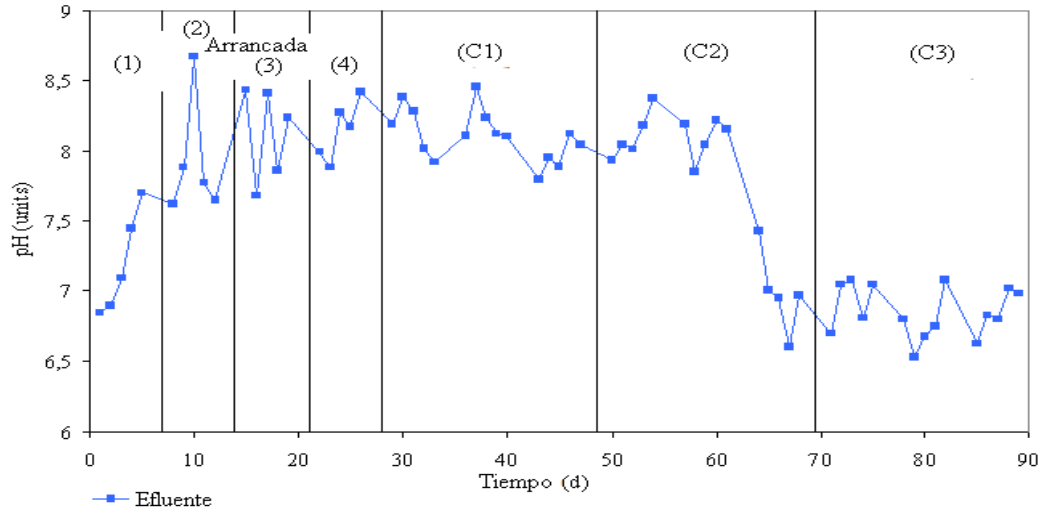
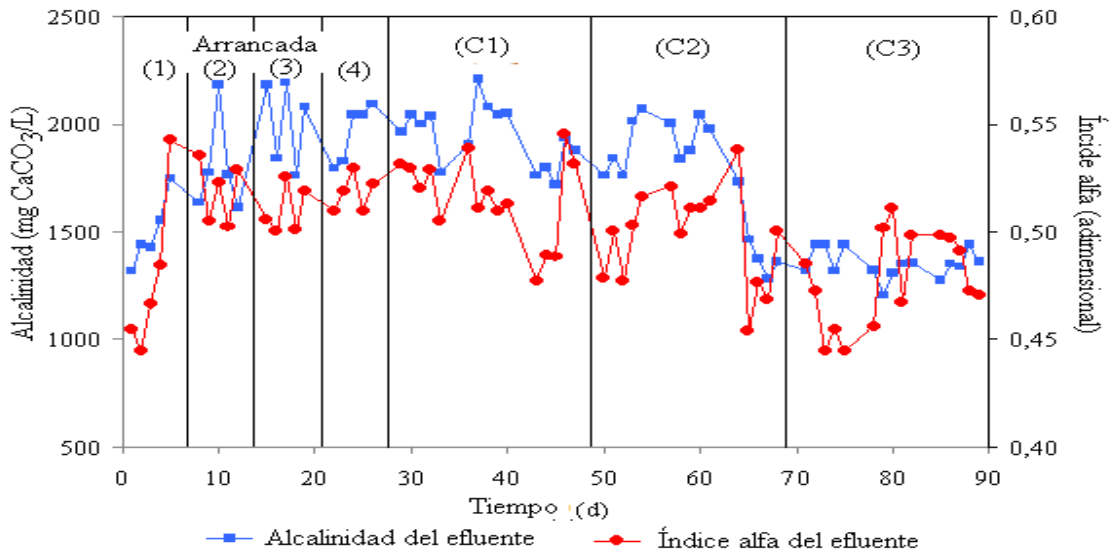


Figura 4.2 Comportamiento del pH en el sistema

En la Figura 4.3 se muestra la conducta seguida por la alcalinidad. Se observó un rápido incremento en la alcalinidad en la etapa de arrancada fluctuando entre 2200 y 1700  $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$  con una media de  $2000\pm 45 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ , similar comportamiento se mantuvo hasta que el pH en el flujo de entrada fue controlado a 7.0; cuando se reajustó el pH, la alcalinidad descendió manteniendo un valor de  $1355\pm 67 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ .



(1), (2), (3), (4), períodos de arranque de los reactores; (C1), (C2), (C3), períodos de evaluación de las COV.

Figura 4.3 Variación de la alcalinidad e índice de alcalinidad.

En este estudio se puede observar que es fundamental el ajuste de pH para el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del procesamiento húmedo del café; el bicarbonato de sodio permite generar suficiente capacidad amortiguadora para estabilizar el sistema. Estos resultados se corresponden a los realizados por (Pérez y Torres, 2008) y (*Field et al., 1995*) en donde consideran al bicarbonato de sodio como el principal suplemento de la alcalinidad bicarbonática y el único producto que cambia suavemente el equilibrio del medio para lograr un valor deseado sin alterar el balance físico-químico de la delicada comunidad microbológica.

Entre más alto sea el índice  $\alpha$  mejor es la capacidad de amortiguamiento del sistema (Pérez y Torres, 2008). Teniendo en cuenta los valores recomendados por (*Jenkins et al., 1983*), en donde recomienda valores del índice  $\alpha$  superiores a 0.5; en el arranque se garantizaron valores superiores a 0.5, aunque cuando se reajustó el pH del flujo de entrada sufrió una caída, permaneciendo fluctuando alrededor de 0.49 pero se debe de considerar que en esta etapa se evaluó el mayor TRH. Según (*Lettinga et al., 2000*) los procesos anaerobios se recuperan casi inmediatamente una vez que el pH es ubicado en el rango óptimo y en el caso de un repentino cambio, el proceso depende de la extensión y duración de la carga impuesta además de la concentración de los AGV producidos durante el evento; ésta afirmación quizás se corresponda si el pH del flujo de entrada se hubiera reajustado a 7.0, que fue donde se mostró la mejor respuesta.

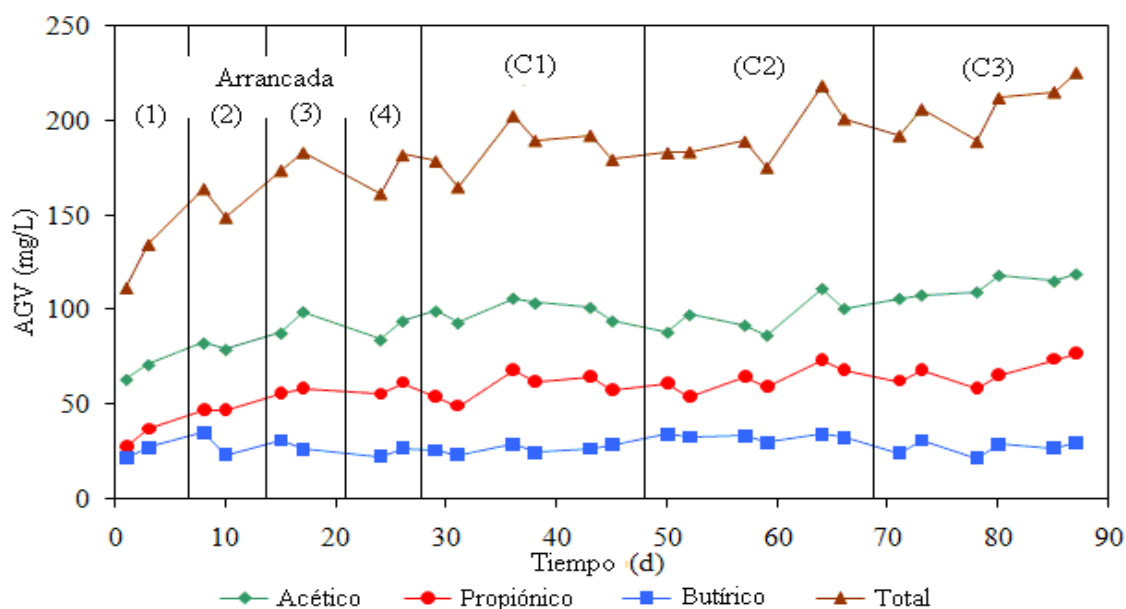
### **4.3 Remoción de AGV**

En la Figura 4.4 se muestran los niveles de los ácidos acético, propiónico y butírico en el período de evaluación. Como se esperaba, la mayor remoción de AGV, considerando la concentración como la suma de los niveles de ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico, la mostró la menor COV evaluada con un valor promedio de  $184.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , aunque no se reportaron diferencias significativas entre C1 y C2 (Tabla 4.2).

### **4.4 Remoción de sólidos**

Cuando la eficiencia de remoción en los reactores de flujo ascendente está relacionada con la velocidad de la carga orgánica, se reduce el TRH y altas velocidades de flujo, lo que provocará una reducción en la eficiencia de remoción de sólidos por el lavado de sólidos del flujo de entrada y de la biomasa activa, problema común que presentan los reactores UASB.

En la Figura 4.5 se observan las concentraciones de ST del efluente del reactor. En la primera semana de arrancada se observa un pico máximo producto del arrastre de las partículas floculentas del lodo anaerobio, pero en las próximas semanas se observaron niveles estables en la remoción de sólidos fluctuando entre los valores de 170 y  $180 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de ST.



(1), (2), (3), (4), períodos de arranque de los reactores; (C1), (C2), (C3), períodos de evaluación de las COV.

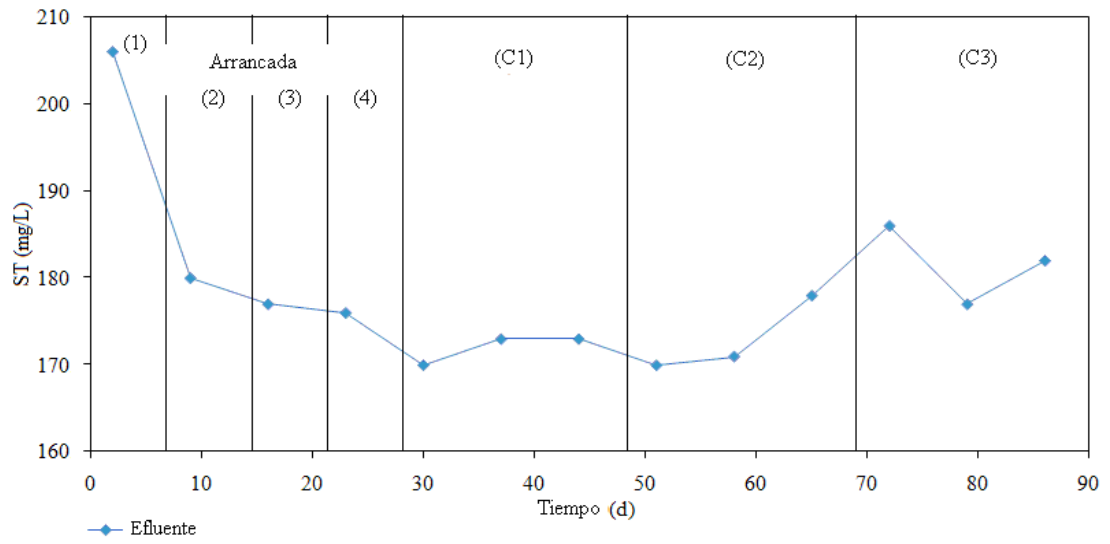
Figura 4.4 Comportamiento de los AGV en el sistema

Tabla 4.2 Contraste múltiple de rangos entre las producciones de AGV

	Sistema	Media	Contraste	Diferencia
UASB	C1	184.67	C1-C2	-8.17
	C2	192.83	C1-C3	-21.83*
	C3	206.50	C2-C3	-13.67

\*Indica diferencia significativa a 0.1%

En la evaluación de C3 se muestra una disminución en los niveles de remoción provocado por la disminución del TRH y el aumento de las velocidades del flujo ascendente; aunque los niveles de remoción, en comparación con otras investigaciones realizadas enfocada a la eliminación de sólidos en los reactores UASB, se corresponde a una susceptibilidad del reactor al incremento en la velocidad del flujo y que si se incrementen podrían provocar la falla del proceso por el lavado de lodo activo.



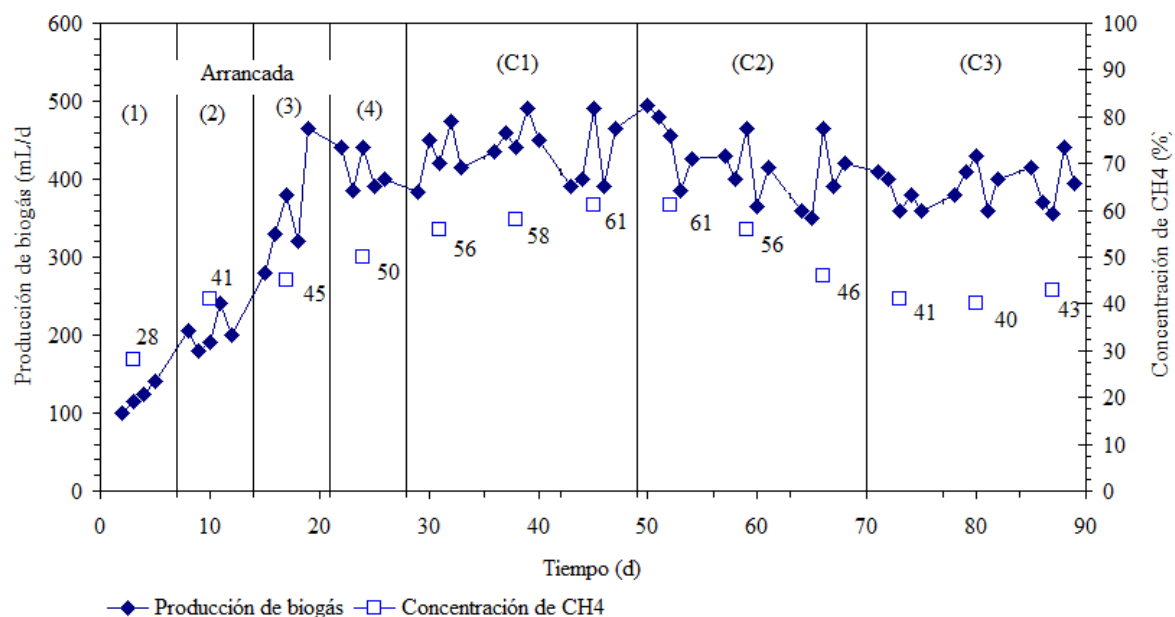
(1), (2), (3), (4), períodos de arranque de los reactores; (C1), (C2), (C3), períodos de evaluación de las COV.

Figura 4.5 Sólidos totales en el efluente.

## 4.5 Producción y composición del biogás

La producción de biogás se muestra en la Figura 4.6. No se encontraron diferencias significativas en la producción de biogás fluctuando éste entre 500 y 390 mL·d<sup>-1</sup> con un valor medio de 420 mL·d<sup>-1</sup> por cada 2.5 L de agua residual tratada en 24 horas lo que evidencia que el efecto del TRH en la conversión a biogás no es significativa, en cambio si mostró impacto en la composición del gas en donde se observó un decremento en los porcentajes a medida que se disminuía el TRH; los mayores valores de concentración se observaron en la evaluación de C1.

Se han realizado algunas investigaciones para el uso de los residuos de la industria del café, principalmente en la pulpa y cáscara de café para la producción de biogás mediante la digestión anaerobia, aunque se debe destacar que en las experiencias de tratamiento anaerobio con diversos tipos de residuales del café, se han presentado dificultades para lograr una operación estable, dadas por la composición del mismo, que contiene compuestos tóxicos e iones que pueden resultar inhibidores del proceso (Fernández, 2005); aunque en este trabajo el efecto de la recirculación tuvo un impacto positivo en la estabilidad del mismo ya que mantuvo un adecuado contacto sustrato microorganismo, reutilización de la alcalinidad generada en el sistema y dilución de la carga orgánica que entra al reactor.



(1), (2), (3), (4), períodos de arranque de los reactores; (C1), (C2), (C3), períodos de evaluación de las COV.

Figura 4.6 Producción y composición del biogás.

De acuerdo a los estimados por estudios realizados, una tonelada de pulpa de café equivale a  $131.0 \text{ m}^3$  de biogás que puede ser producida en la digestión anaerobia, la cual es equivalente a 100 L de petróleo; de este estudio se concluyó que se pueden obtener  $0.168 \text{ m}^3$  de biogás por cada  $1 \text{ m}^3$  de aguas residuales de café tratado de forma anaerobia. Se ha reportado la utilización de biogás para generar electricidad, con un factor de conversión de 0.60 a  $0.70 \text{ m}^3$  por kilowatt hora, un ejemplo de uso de combustible en forma de biogás para la generación eléctrica es en Estados Unidos en donde cerca del 1% de la producción eléctrica se realiza por esta vía.

Un caso de estudio realizado en Tanzania, África, en donde se evaluó la factibilidad de utilizar residuos agroindustriales entre ellos los residuos sólidos del café, utilizaron el biogás para la generación de electricidad, como forma de contribuir

a la demanda del país. Los residuos sólidos de las clases de café Robusta y Arábica generaron 650 y 730 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por tonelada de residuos sólidos, respectivamente.

El uso de la digestión anaerobia es una opción adecuada para el tratamiento de los residuales líquidos y sólidos del beneficiado de café, además de generar un subproducto de valor agregado como es el biogás.

Este biogás puede sustituir 1.1 toneladas del diesel, que se emplea en las máquinas despulpadoras, ya que se conoce que 1 m<sup>3</sup> de biogás equivale a 0.55 kg de diesel (Bermúdez y col, 1999b) recuperando el costo de inversión del reactor en poco tiempo por motivos solo de sustitución del combustible.

## 5. CONCLUSIONES

Se comprobó que es posible degradar de forma anaerobia las aguas residuales del beneficiado húmedo del café, logrando valores de eficiencia de remoción de la carga contaminante, expresados como DQO, superiores al 80% empleando lodos granulares.

El arranque del reactor UASB se realizó de forma rápida, logrando condiciones de operación estables a las 4 semanas, evidencia de la acertada estrategia de arranque que consistió en el gradual aumento de la COV.

Los mejores valores de remoción del reactor UASB con recirculación del 50% del flujo en la entrada se obtienen ajustando los parámetros de operación COV y pH a  $2.91 \text{ kgDQO}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  y 7.0, respectivamente.

Mediante la digestión anaerobia de las aguas residuales del beneficio de café se obtiene  $0.168 \text{ m}^3$  de biogás por cada  $1 \text{ m}^3$  de agua residual tratada, con una concentración de  $\text{CH}_4$  de 60%, por lo que presenta condiciones adecuadas para ser utilizado como gas combustible.

## **6. RECOMENDACIONES**

Estudiar las poblaciones microbianas presentes en el lodo utilizado, teniendo en cuenta las potencialidades que ha mostrado el mismo durante la experimentación.

Realizar ensayos en continuo con estas aguas residuales con separación en dos etapas (Acidogénesis y Metanogénesis).

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arrhá, R., Haandel, A. v., Zeeman, G. y Lettinga, G. (2006). "The effects of operational and enviromental variations on anaerobic wastewater treatment system: A review." *Bioresour. Technol.* **97**: 1105-1118.
- Bello-Mendoza, R. y Castillo-Rivera, M. (1998). "Start-up of an anaerobic hybrid (UASB/Filter) reactor treating wastewater from a coffee processing plant." *Anaerobe* **4**(an980171): 219-225.
- Bello, R., Calvo, L., Sánchez, J., Lau, G. y Cuevas, R. (1993). Diagnóstico de la contaminación en las aguas residuales de los beneficios húmedos de café en el Soconusco XVI Congr. Lat. Cafecultura, Managua, Nicaragua.
- Cervantes, S. (1998). Nuevas tendencias de producción en beneficios cafetaleros. Confederación mexicana de productores de café.
- Costello, D. (1989). Modelling, optimization and control of high-rate anaerobic reactors, University of Queensland. **Ph.D. dissertation.**
- Devi, R., Singh, V. y Kumar, A. (2008). "COD and BOD reduction from coffee processing wastewater using Acavado pell carbon." *Bioresour. Technol.* **99**: 1853-1860.
- Dinsdale, R., Hawkes, F. y Hawkes, D. (1997b). "Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion with thermophilic pre-acidification of instant coffee production wastewater." *Wat. Res.* **31**: 1931-1938.
- Fernandez, M. (2005). Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia de los residuales líquidos de la industria cafetalera. Centro de Estudios de Biotecnología Industrial (CEBI). Santiago de Cuba, Universidad de Oriente. **Tesis de maestría.**

- Fernandez, N. y Foster, C. (1993). "A study of the operation of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a syntetic coffee waste." *Bioresour. Technol.* **45**: 223-227.
- Field, J., Sierra, R. y Lettinga, G. (1995). Effect wastewater characteristic and enviromental factors. Curso Internacional de tratamiento anaerobio de aguas residuales. Universidad del Valle/Wageningen Agricultural University/International Institute for Infraestructural, Hydraulic and Enviromental Engineering. Cali, Colombia.
- Gunaseelan, V. (1995). "Effect of inoculum substrate ratio and pretreatment on methane yield from Parthenium." *Biomass & Bioenergy* **8**: 39-44.
- Guwy, A., Hawkes, F., Wilcox, F. y Hawkes, D. (1997). "Neural network and on-off control of bicarbonate alkalinity in a fluidised-bed anaerobic digestion." *Wat. Res.* **31**: 2019-2025.
- Heertjes, P. y Meer, R. v. d. (1978). "Dynamics of liquid flow in an up-flow reactor used for anaerobic treatment of wastewater." *Biotechnology and Bioengineering.* **20**: 1577-1594.
- Houbron, E., Larrinaga, A. y Rustrian, E. (2003). "Liquefaction and methanization of solid and liquid coffee wastes by two phase anaerobic digestion process." *Wat. Sci. Tech.* **48**(6): 255-262.
- Jenkins, S., Morgan, J. y Sawyer, C. (1983). "Measuring anaerobic sludge digestion and growth by simple alkalimetric trititation." *Journal of the Water Pollution Control Federation* **55**(5): 448-453.
- Kwan-Chow, L. y Zhenxiang, Y. (1991). "Technical review on the UASB process." *J. Enviromental Studies* **39**: 203-222.
- Lettinga, G., Hulshoff, L. y Zeeman, G. (2000). *Biological wastewater treatment Part 1: Anaerobic wastewater treatment.* Wageningen University. Wageningen, The Netherlands: p. 200.
- Lier, J. v., Tilche, A., Ahring, B., Macarie, I., Moletta, R., Dohanyos, M., Hulshoff, L., Lens, P. y Verstraete, W. (2001). "New perspective in anaerobic digestion." *Wat. Sci. Tech.* **43**(1): 1-18.

- Mahmoud, N., Zeeman, G., Gijzen, H. y Lettinga, G. (2003). "Solids removal in upflow anaerobic reactors, a review." *Bioresour. Technol.* **90**: 1-9.
- Montgomery, D. (1991). *Diseño y análisis de experimentos*, Grupo Editorial Iberoamérica S.A. de C.V.
- Narasimba, K., D'Sa, A. y Kapur, G. (2004). *An effluent treatment-cum-electricity generation at coffee estates: is it financially feasible?* International Energy Initiative. Bangladesh, India.
- Orozco, C., Barrientos, H., Lópezlena, A., Cruz, J., Selvas, C., Osorio, E., Osorio, E., Chávez, R., Miranda, J., Arellano, J. y Giesseman, B. (2005). "Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas." *Hig. Sanid. Ambient.* **5**: 123-131.
- Pérez, A. y Torres, P. (2008). "Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de las aguas residuales fácilmente acidificables." *Ingeniería Sanitaria* **10**(2): 41-52.
- Rajeshwari, K., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K. y Kishore, V. (2000). "State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **4**: 135-156.
- Rodríguez, S., Pérez, R. y Fernández, M. (2000). "Estudio de la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café." *Interciencia* **25**(008): 386-390.
- Romli, M., Greenfield, P. y Lee, P. (1994). "Effect of recycle on a two-phase high-rate anaerobic wastewater treatment system." *Wat. Res.* **28**(2): 475-482.
- Sandberg, M. y Ahring, B. (1992). "Anaerobic treatment of fish-meal process wastewater in a UASB reactor at high pH." *Applied Microbiology and Biotechnology* **36**: 800-804.
- Speece, R. (1996). *Anaerobic biotechnology: For industrial wastewater*. Tennessee, USA.
- Statgraphics, P. (2000). "Edición profesional." *Statistical Graphics Corp.* USA.

## 8. ANEXOS

### Anexo 1

Curva estándar para la determinación de la concentración de CH<sub>4</sub>.

