

# TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

## **“CINÉTICA DE LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DE AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ”**

### **REPORTE TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL**

Presenta:  
Carlos Amir Lugo Suárez

Número de control:  
09270022

Carrera:  
Ingeniería Bioquímica

Asesor interno:  
M.C. José Humberto Castañón González

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; Diciembre 2014

## Índice

<b>CAPÍTULO I. GENERALIDADES</b> .....	<b>6</b>
1.1 Justificación.....	6
1.2 Objetivo General.....	7
1.3 Caracterización del área en que participó .....	8
1.3.1 Historia del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez .....	8
1.3.2 Misión .....	9
1.3.3 Visión.....	9
1.3.4 Datos generales de la institución .....	9
1.4 Problemas a resolver .....	12
1.5 Alcances y limitaciones.....	12
<b>CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
2.1 Generalidades del café ( <i>coffea arabica</i> ) .....	13
2.2 Componentes del café .....	13
2.3 Etapas de transformación .....	15
2.4 Aguas residuales del beneficio húmedo del café .....	16
2.4.1 Características físicas de las aguas residuales .....	16
2.4.2 Compuestos orgánicos agregados del agua residual .....	18
2.4.2.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) .....	19
2.4.2.2 Demanda química de oxígeno (DQO).....	19
2.4.2.3 Carbono orgánico total (COT).....	20
2.4.3 Relaciones entre DBO, DQO y COT .....	20
2.5 Tratamiento de aguas residuales .....	21
2.5.1 Tratamientos para la eliminación de materia en suspensión .....	22
2.5.2 Tratamientos para la eliminación de materia disuelta.....	22
2.5.3 Tratamientos biológicos .....	23
2.5.3.1 Tratamiento anaerobio .....	23
2.5.3.1.1 Microbiología y bioquímica del proceso.....	24
<b>CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS</b> .....	<b>27</b>
3.1 Diseño y construcción de sedimentador, filtro y reactor. ....	27

3.1.1 Sedimentador de placas inclinadas .....	27
3.1.2 Reactor .....	33
3.1.3 Filtro lento de arena modificado .....	36
<b>3.2 Recolección de las aguas residuales del beneficio húmedo del café .....</b>	<b>39</b>
<b>3.3 Estabilización de lodos.....</b>	<b>40</b>
<b>3.4 Caracterización del agua residual del beneficio húmedo del café .....</b>	<b>40</b>
<b>3.5 Sistema de neutralización .....</b>	<b>41</b>
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1 Características físico químicas del agua residual.....</b>	<b>42</b>
4.1.1 Caracterización del agua residual del beneficio húmedo del café .....	43
4.1.2 Estabilización de los lodos .....	45
<b>4.2 Sedimentador .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3 Reactor .....</b>	<b>50</b>
<b>4.4 Remoción de DQO y sólidos dentro del filtro lento de arena modificado .....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.1 Neutralización del pH de las aguas residuales del beneficio húmedo del café .....</b>	<b>58</b>
<b>4.5 Sistema continuo .....</b>	<b>61</b>
4.5.1 Comparación con otros sistemas de tratamiento de agua residual proveniente del beneficio húmedo del café.....	62
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>65</b>
<b>CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>

## INTRODUCCIÓN

Chiapas es un estado sustentado históricamente en la agricultura, y dentro de esta, se encuentra el café que ha sido el cultivo de mayor importancia social y económica. La calidad del café chiapaneco ha sido apreciada y reconocida por los consumidores de café en el mundo como una de las mejores dentro de los cafés Arábica, dicho café es generalmente procesado por vía húmeda, lo que le otorga características moderadas en amargo y cuerpo y acidez y aroma pronunciado. Sin embargo dichos beneficios se contraponen a los costos ambientales.

La industria cafetalera está considerada como una de las más sucias del mundo con alteraciones ambientales negativas, debido a que la parte aprovechable para el proceso representa sólo el 20% del volumen total de la fruta, de manera tal que, el procesamiento de extracción del fruto (beneficio) genera un 80% del volumen procesado en calidad de desechos (Orozco *et al.*, 2005). Esta problemática es similar en los países productores de café donde se utiliza como proceso de beneficio la vía húmeda, y no se cuenta con un sistema de tratamiento eficiente en todos los casos. Esta situación se agrava si tenemos en cuenta que los centros de despulpe de café se encuentran ubicados en zonas de montañas donde están los ecosistemas más frágiles, y que el proceso de beneficio se realiza en los meses de sequía, durante los cuales los ríos disminuyen el caudal aumentando la concentración de las sustancias contaminantes.

El proceso del café por la vía húmeda consiste en que al fruto después de ser cosechado se le eliminan los componentes externos, después los frutos son depositados en despulpadoras para eliminar el epicarpio o pulpa, seguidamente se utilizan tanques de fermentación para propiciar la hidrólisis del mucílago mediante la acción de enzimas propias del grano y de microorganismos por lo que el tiempo de fermentación es variable (Cervantes 1998, Bello *et al* 1993). El mucílago está fuertemente adherido a la cáscara del grano de café; desde el punto de vista físico, el mucílago es un sistema coloidal líquido y liofílico o hidrogel, contiene agua, pectinas, azúcares y ácidos orgánicos, durante la maduración del grano de café el pectato de calcio (localizado en la laminilla media) y la protopectina de la pared celular son convertidos en pectinas (Braham & Bressani 1978, Elías 1972, Brezan *et. al*, 1972).

Las aguas residuales que se generan en el proceso de despulpado y lavado del café, comúnmente conocida como *agua miel* se consideran como una de las mayores contaminaciones orgánicas en el sector cafetalero, debido a que la oxidación de la materia orgánica, que es llevada a cabo por la microflora bacteriana contenida en ellas, consumen todo el oxígeno disuelto en el agua,

creando así una situación de ausencia de oxígeno que perjudica la restante flora y fauna acuática (Hernández *et al.*, 2000). A manera de hacer un dimensionamiento del problema basta mencionar que el proceso de despulpado y lavado de 1 kg café genera una cantidad de agua y material contaminante equivalente a aquella producida por 6 personas en un día (Pujol *et. al*, 2001; Hernández *et. al*, 2000).

Para poder reutilizar o devolver a los efluentes las aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café se debe cumplir con ciertos límites de contaminantes marcados por la NOM-003-SEMARNAT-1997 que regula SEMARNAT; para disminuir la contaminación es necesario llevar a cabo un proceso de tratamiento.

En un trabajo previo realizado en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez se diseñó un sistema para tratar aguas residuales de esta índole, logrando una remoción del 70% de contaminantes, pero se observó que no se alcanzaba la fase metanogénica, por lo que la finalidad del presente proyecto fue rediseñar el sistema mencionado anteriormente, de manera que se pueda alcanzar dicha fase, mediante el mejoramiento del sedimentador y filtro, esto debido a que fueron las operaciones unitarias que lograron una mayor remoción de contaminantes.

El rediseño del sistema consiste en la construcción de un reactor a pequeña escala de prueba, un sedimentador con deflectores inclinados, así como un filtro para determinar la calidad del agua al finalizar todo el proceso de tratamiento de las mismas, evaluando también el efecto de la variación de flujo sobre la calidad del agua.

El volumen del sistema continuo que simulará todo el proceso, está basado en el tiempo de retención hidráulico (TRH) por cada etapa, así como la forma del reactor para poder controlar los problemas hidráulicos que existen frecuentemente en la construcción de cualquier sistema de procesos, lo cual mejorará el sistema de transporte de las aguas de una operación unitaria a otra, propiciando la homogeneidad del proceso.

# CAPÍTULO I. GENERALIDADES

## 1.1 Justificación

El beneficio húmedo del café contribuye considerablemente a la contaminación del medio ambiente ya que genera grandes volúmenes de aguas residuales, provenientes principalmente del despulpado y lavado de los granos, además representa un riesgo a la salud para las personas que habitan en zonas cercanas a los sitios de descarga del agua residual (Haddis y Devi, 2008). La cafeticultura trae grandes beneficios económicos al estado de Chiapas; sin embargo esta actividad se ve opacada por sus efectos adversos al medio ambiente, por lo tanto, lo que se necesita es lograr que la cafeticultura sea una actividad sustentable.

Los sistemas de tratamiento utilizados actualmente resultan insuficientes, y en muchos casos inapropiados para este tipo de residual de naturaleza química compleja, por lo que se hace necesaria la búsqueda de otros sistemas más integrales y eficientes que permitan tratar la alta carga orgánica que anualmente es descargada en nuestras cuencas.

Dada esta problemática, se ha planteado revertir este hecho a partir de un sistema de tratamiento de las aguas generadas basado en un proceso biológico, principalmente a partir de la digestión anaerobia, aunada a etapas de sedimentación y filtración, esto con el fin de cumplir como un proceso de bajos costos de operación, monitoreo e instalación, así también conseguir un elevada eficiencia en la remoción de los contaminantes presentes. Otros beneficios que pudieran conseguirse con este sistema son : la posibilidad de obtener lodos activados que puedan ser empleados como fertilizantes, obtención de gas que contiene metano como combustible, así como el uso de las aguas tratadas para sistemas de riego en las plantaciones de café. Todos los beneficios adquiridos a partir del sistema de tratamiento permitirán darle un valor agregado al proceso orgánico actual del café Chiapaneco.

Cabe mencionar que, la información generada en esta investigación podrá ser utilizada en el desarrollo de nuevos sistemas de tratamientos aplicados a las aguas residuales en cuestión.

## 1.2 Objetivo General

Evaluar la cinética de remoción de la carga orgánica de las aguas residuales provenientes del BHC, implementando un sistema de tratamiento a nivel de laboratorio.

### **Objetivos específicos**

- Estandarizar un inóculo capaz de adaptarse a la DQO del agua residual del BHC.
- Establecer una etapa de neutralización para favorecer el proceso de la digestión anaerobia.
- Proponer operaciones físicas complementarias a la digestión anaerobia para mejorar el proceso de la remoción de la DQO.
- Analizar la eficiencia del sistema integral sobre la remoción de la carga orgánica.
- Evaluar la cinética de la remoción de la DQO aplicando el sistema continuo.

### 1.3 Caracterización del área en que participó

La parte experimental de este proyecto, que corresponde al tratamiento del agua residual del beneficio húmedo del café, fue realizada en el laboratorio de Biotecnología ubicado en el edificio J del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

#### 1.3.1 Historia del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

En la década de los 70's, se incorpora el estado de Chiapas al movimiento educativo nacional extensión educativa, por intervención del Gobierno del Estado de Chiapas ante la federación.

Esta gestión dio origen a la creación del Instituto Tecnológico Regional de Tuxtla Gutiérrez (ITRTG) hoy Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG).

El día 23 de agosto de 1971 el Gobernador del Estado, Dr. Manuel Velasco Suárez, colocó la primera piedra de lo que muy pronto sería el Centro Educativo de nivel medio superior más importante de la entidad.

El día 22 de octubre de 1972, con una infraestructura de 2 edificios con 8 aulas, 2 laboratorios y un edificio para talleres abre sus puertas el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez con las carreras de Técnico en Máquinas de Combustión Interna, Electricidad, Laboratorista Químico y Máquinas y Herramientas.

En el año 1974 dio inicio la modalidad en el nivel superior, ofreciendo las carreras de Ingeniería Industrial en Producción y Bioquímica en Productos Naturales.

En 1980 se amplió la oferta educativa al incorporarse las carreras de Ingeniería Industrial Eléctrica e Ingeniería Industrial Química.

En 1987 se abre la carrera de Ingeniería en Electrónica y se liquidan en 1989 las carreras del sistema abierto del nivel medio superior y en el nivel superior se reorientó la oferta en la carrera de Ingeniería Industrial Eléctrica y se inicia también Ingeniería Mecánica.

En 1991 surge la licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales.

Desde 1997 el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ofrece la Especialización en Ingeniería Ambiental como primer programa de postgrado.

En 1998 se estableció el programa interinstitucional de postgrado con la Universidad Autónoma de Chiapas para impartir en el Instituto Tecnológico la Maestría en Biotecnología.

En el año 1999 se inició el programa de Maestría en Administración como respuesta a la demanda del sector industrial y de servicios de la región.

A partir de 2000 se abrió también la Especialización en Biotecnología Vegetal y un año después dio inicio el programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica y la Licenciatura en Informática.



### 1.3.2 Misión

La misión del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez es formar de manera integral profesionales de excelencia en el campo de la ciencia y la tecnología con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a los valores éticos.

### 1.3.3 Visión

Ser una Institución de excelencia en la educación superior tecnológica, comprometida con el desarrollo socioeconómico, sostenido y sustentable de la región.

### 1.3.4 Datos generales de la institución

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez  
Carretera Panamericana Km. 1080  
C.P. 29000, Apartado Postal 599  
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México  
Teléfonos: (961) 61-5-03-80 Ext. 319 y (961) 61-5-04-61  
Fax: (961) 61-5-16-87

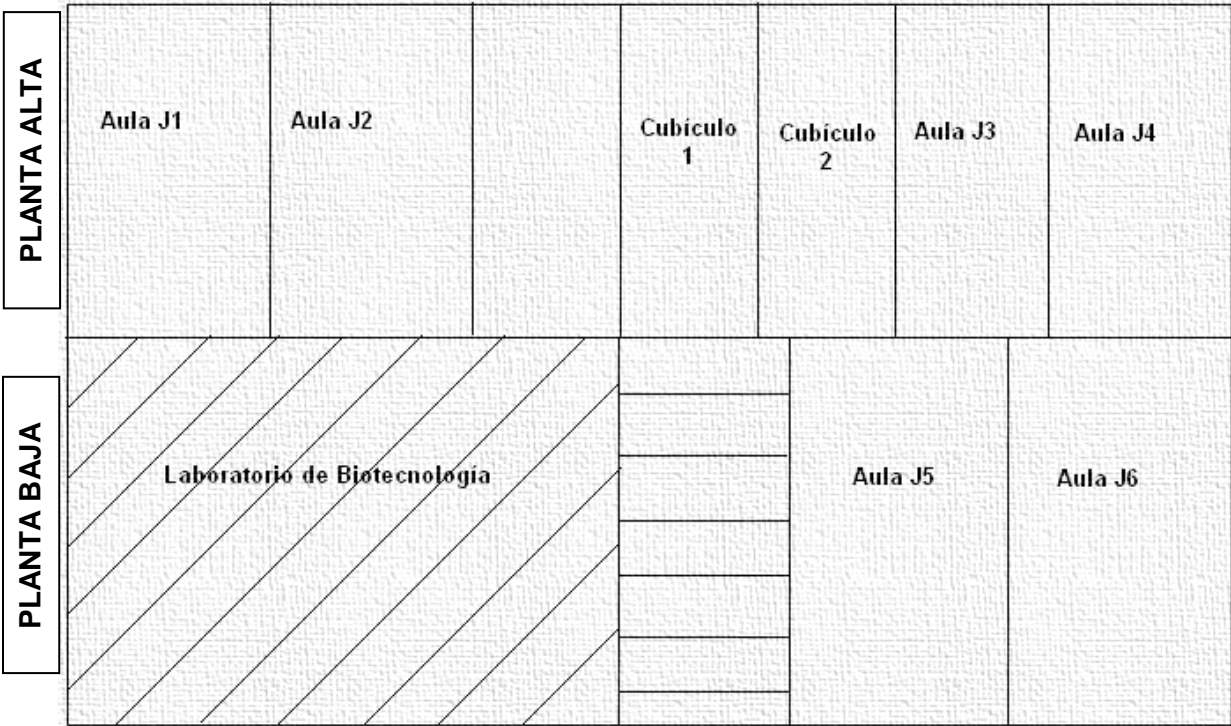


Figura 1.1 Ubicación de la Institución en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas



Figura 1.2 Instalaciones del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

**Edificio J**



**Figura 1.3** Ubicación del laboratorio de Biotecnología dentro del edificio

## 1.4 Problemas a resolver

- Mediante la realización de este estudio se busca mitigar el impacto negativo al medio ambiente que se origina debido a las aguas residuales del beneficio húmedo del café
- Diseñar un sistema que sea eficiente en la remoción de la carga orgánica de las aguas residuales del beneficio húmedo del café y que al mismo tiempo cumpla con los requisitos de ser de bajo costo de construcción, monitoreo e instalación.

## 1.5 Alcances y limitaciones

El presente proyecto estuvo enfocado al tratamiento de las aguas residuales que se generan en el beneficio húmedo del café debido a que se consideran como las de mayor contaminación orgánica, incluso se consideran 10 veces más contaminadas que las aguas residuales domésticas, por lo tanto si se diseña un sistema que sea eficaz en la disminución de la carga orgánica en las ARBHC, sería también capaz de tratar aguas residuales domésticas, ya que el índice de biodegradabilidad en este tipo de aguas es mayor de 0.5, por lo que se consideran aptas para ser tratadas por métodos biológicos. Sin embargo debido a lo mencionado anteriormente las aguas residuales de otra índole como por ejemplo aguas con grandes cantidades de compuestos inorgánicos este sistema no sería apropiado para su tratamiento. Los metales no pueden ser degradados en componentes menos peligrosos, porque no son bio-degradables.

## CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Generalidades del café (*coffea arabica*)

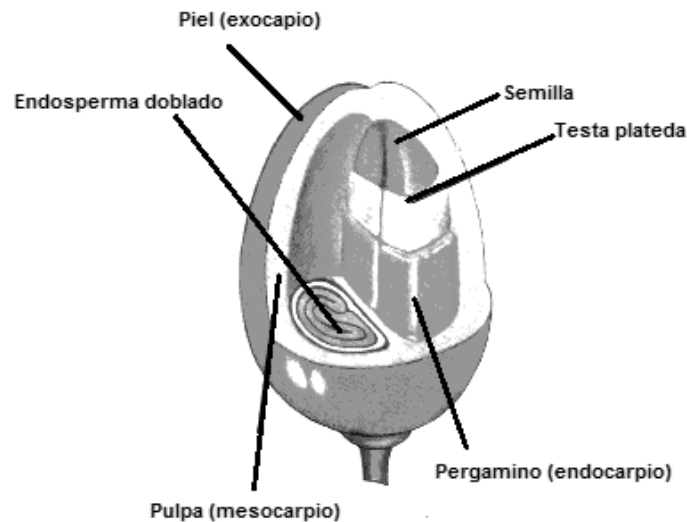
Cafeto es el nombre común de un género de árboles de la familia de las Rubiáceas y también de sus semillas y de la bebida que con ellas se prepara. De la treintena de especies que comprende el género *Coffea* sólo son importantes tres: *arabica*, *canephora* y *liberica*. El arbusto o arbolillo, de 4.6 a 6 m de altura en la madurez tiene hojas aovadas, lustrosas, verdes, que se mantienen durante 3 a 5 años y flores blancas, fragantes, que sólo permanecen abiertas durante unos pocos días. El fruto se desarrolla en el curso de los seis o siete meses siguientes a la aparición de la flor; cambia desde el verde claro al rojo y, cuando está totalmente maduro y listo para la recolección, al carmesí. El fruto maduro, que se parece a la cereza, se forma en racimos unidos a las ramas por tallos muy cortos, suele encerrar dos semillas rodeadas de una pulpa dulce. Al fruto se le dice cereza, uva o capulín y está recubierto en una instancia de una película o cascarilla muy delgada que se llama pergamino. La semilla del café contiene una compleja mezcla de componentes químicos como la cafeína, aldehídos, cetonas, ésteres, aminas y unos compuestos de azufre llamados mercaptanos (SIAP, 2012).

### 2.2 Componentes del café

Las partes que componen al fruto del cafeto son las siguientes:

- **Epicarpio o piel:** Los colores que va tomando desde su etapa juvenil hasta su maduración, son los siguientes: verde, amarillo, rosado y rojo (algunas veces amarillo) sucesivamente. Tomando una coloración castaño oscuro cuando el grano empieza a secarse.
- **Mesocarpio:** Es la parte carnosa del grano, la cual está compuesta por sustancias pectinas y azúcares, comúnmente se les denomina mucílago o baba.
- **Endocarpio o pergamino:** Esta es la capa protectora de la semilla, compuesta por material celulósico, cuando el proceso ha sido el correcto para la cereza, este es de color amarillo pajizo.
- **Perisperma o película plateada:** Es un tejido delgado que cubre a la semilla, su color es gris plateado, rojizo o negro.

- **Endospermo o semilla:** Es el grano desprovisto de todas sus capas (cubiertas); es denominada café verde u oro cuando éste ya ha sido procesado.
- **Embrión o germen:** Es la planta en estado latente la cual se encuentra alojada en una de las extremidades de la semilla.



**Figura 2.1** Conformación del grano de café (von Enden et.al, 2004).

Es importante mencionar que, 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, de manera tal que, el procesamiento de extracción del fruto (beneficiado) genera un 80% del volumen procesado en calidad de desechos, cada uno en un grado diferente constituyendo un riesgo para el medio ambiente si no se reutiliza de una manera inteligente para otros propósitos utilizando los principios de producción más limpia (Orozco et. al, 2005).

### 2.3 Etapas de transformación

Las etapas de transformación son un proceso de beneficiado del café, el cual se podría definir como el proceso mediante el cual se transforma el fruto (café en fruta) en producto comercial (café oro).

Dichas etapas se dividen en tres fases (Ortega, 2010):

**Beneficio húmedo:** Consiste en la transformación del café cereza en café pergamino.

Hay dos métodos para beneficiar el café la vía seca y la vía húmeda:

- En la vía seca: no se utiliza agua, consiste en secar los frutos maduros o cerezas al sol para obtener el café bola o capulín.
- En la vía húmeda: el café cereza es despulpado, fermentado, oreado y secado, hasta obtener café pergamino, con 12% de humedad, que se pueda almacenar.

Una vez que se ha efectuado el corte del café, con una madurez idealmente homogénea, se procede a separar los granos defectuosos de los “buenos”.

Posteriormente se procede a efectuar el beneficio húmedo, donde la cereza se coloca en tolvas “sifones” llenas de agua, con el fin de evitar fermentaciones prematuras o mermas en el peso.

El café colocado en las tolvas se hace pasar a una máquina en el cual el grano es liberado de la cáscara y pulpa que lo cubre. Esta práctica consiste en friccionar el fruto entre dos discos de metal para separar la cáscara y la pulpa del grano, usando agua para facilitar la tarea, a esta operación se le conoce con el nombre de despulpado y debe realizarse inmediatamente después de la recepción de la cereza, para evitar que ésta se fermente.

Resultado del beneficiado húmedo es el café pergamino, nombre que se le da por la película o mucílago que todavía lo envuelve y que no es soluble en agua, por lo que debe fermentarse durante 24 horas en tanques de agua.

En seguida se somete al grano a un oreador o presecado, el cual se puede hacer en patios de cemento en los que se tiende el café por un período de cinco días aproximadamente,

Una vez que el grano se ha secado, se realiza el:

**Beneficio seco:** Es la transformación del café pergamino en oro. Inicia cuando el café pergamino es molido, y consiste en quitar el mucílago seco por medio de máquinas trilladoras, de donde se obtiene el café oro o verde. Consiguiendo un porcentaje de humedad del 12%, el cual es indicado para su almacenamiento, evitando así que se formen hongos y decoloraciones en el grano para poder continuar con el proceso.

Una vez que el café haya sido molido se procede a clasificarlo. La finalidad de clasificación es separar y seleccionar los granos buenos de los malos, los que tienen algún defecto o han sido mordidos o quebrados en alguna de las operaciones anteriores; además de que un café clasificado alcanza un mayor precio en el mercado; incluso, si el grano va a ser vendido como café pergamino, puede hacerse una clasificación para que esta presentación alcance un precio mucho más alto.

**Industrialización:** Consiste en el tostado y molido del grano

#### 2.4 Aguas residuales del beneficio húmedo del café

El beneficiado húmedo del café Arábica (*Coffea arabica*) produce una calidad superior y recibe precios más altos en el mercado mundial en comparación con el café elaborado mediante el método seco. Sin embargo, el procesamiento del café húmedo produce grandes cantidades de efluentes, que tienen el potencial de dañar el medio ambiente.

En el estado de Chiapas, para beneficiar un quintal de café (245 kg de café cereza) se gastan aproximadamente 1400-1500 L de agua (COMCAFE, 2010). Esto quiere decir que si en la cosecha 2011-2012, se produjeron 528,932 toneladas de café cereza, durante su beneficio se generaron 3'130,414 m<sup>3</sup> de agua residual, que fueron descargadas a los cuerpos de aguas superficiales sin recibir un tratamiento previo.

##### 2.4.1 Características físicas de las aguas residuales

Los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. Las principales características físicas de un agua residual, son su contenido de sólidos, distribución de partículas por tamaño, turbiedad, color, transmitancia/absorbancia, olor, temperatura, densidad y conductividad (Crites y Tchobanoglus, 2000).



El agua residual contiene una variedad de materiales sólidos que varían desde hilachas hasta materiales coloidales. La clasificación de los diferentes sólidos identificados es la siguiente (Crites y Tchobanoglous, 2000).

- Sólidos Totales (ST). Residuo remanente de que la muestra ha sido evaporada y secada a una temperatura específica (103-105 °C).
- Sólidos volátiles totales (SVT). Sólidos que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los ST son calcinados (500 ± 50 °C)
- Sólidos fijos totales (SFT). Residuo que permanece después de incinerar los ST (500 ± 50 °C)
- Sólidos suspendidos totales (SST). Fracción de ST retenido sobre un filtro con un tamaño de poro específico medido después de que ha sido secado a una temperatura específica. El filtro más utilizado para la determinación de SST es el filtro Whatman de la fibra de vidrio que tiene un tamaño nominal de poros de aproximadamente 1.58 µm
- Sólidos suspendidos volátiles (SSV). Estos sólidos pueden ser volatilizados e incinerados cuando los SST son calcinados (500 ± 50 °C)
- Sólidos suspendidos fijos (SSF). Residuo remanente después de calcinar SST (500 ± 50 °C)
- Sólidos disueltos totales (SDT) (ST-SST). Sólidos que pasan a través del filtro y luego son evaporados y secados a una temperatura específica. La medida de SDT comprende coloides y sólidos disueltos. Los coloides son de tamaño 0.001 a 1 µm.
- Sólidos disueltos volátiles. Sólidos que pueden ser volatilizados o incinerados cuando los SDT son calcinados (500 ± 50 °C).
- Sólidos disueltos fijos (SDF). Residuo remanente después de calcinar los SDT (500 ± 50 °C)
- Sólidos sedimentables. Sólidos suspendidos, expresados como mililitros por litros, que se sedimentarán por fuera de la suspensión dentro de un periodo de tiempo específico.

La medida del tamaño de partícula es un análisis que permite establecer la distribución de partículas según su tamaño. La información del tamaño de partículas orgánicas biodegradables es de importancia desde el punto de vista de tratamiento, debido a que la velocidad de degradación biológica de estas partículas depende de su tamaño.

El color en aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color acusado por sólidos suspendidos se llama color aparente, mientras que el color debido a sustancias disueltas y coloidales se denomina color verdadero. El color verdadero se obtiene sobre una muestra filtrada. Dado que la medida depende del tamaño del poro del filtro, se debe especificar el tipo de filtro usado y tamaño del poro. Cualitativamente, el color puede ser usado para estimar la condición general del agua residual. Si el color es café claro, el agua residual lleva aproximadamente seis horas después de su descarga. Un color gris claro es característico de aguas que han sufrido algún grado de descomposición o que han permanecido un tiempo corto en los sistemas de recolección. Si el color es gris oscuro o negro, se trata en general de aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacteriana bajo condiciones anaerobias (Crites y Tchobanoglous, 2000).

El olor del agua residual fresca es en general inofensivo, pero una gran variedad de compuestos malolientes son liberados cuando se produce la degradación biológica, bajo condiciones anaerobias, de las aguas residuales. El principal compuesto de olor indeseable es el sulfuro de hidrógeno. Otros compuestos como indol, eskatol y mercaptanos, formados bajo condiciones anaerobias, pueden causar olores mucho más inofensivos que el sulfuro de hidrógeno.

La densidad es una característica física de gran importancia a la hora de establecer la formación potencial de corrientes de densidad en sedimentadores, humedales artificiales y otras unidades de tratamiento. La densidad del agua residual doméstica que no contiene cantidades significativas de desecho es prácticamente igual a la del agua a una misma temperatura (Crites y Tchobanoglous, 2000).

#### **2.4.2 Compuestos orgánicos agregados del agua residual**

Durante todo el proceso de recolección de aguas residuales, estas adquieren muchísimos componentes extras. Los compuestos orgánicos agregados al agua residual son muy variados.

El principal contaminante en el agua del café proviene de los residuos del conjunto de materia orgánica libre durante el beneficiado, cuando el mesocarpio es removido y la textura del mucílago que rodea el pergamino está parcialmente desintegrada (von Enden *et. al*, 2004).

El agua que contiene la pulpa, consiste principalmente en azúcares que son fermentados rápidamente, así como los componentes de mucílago. La pulpa y mucílago contienen una cantidad elevada de proteínas y azúcares, y el mucílago en particular de pectinas (carbohidratos polisacáridos).

La diferencia que existe entre un agua residual tratada y otra no tratada, es la cantidad de compuestos orgánicos agregados presentes en las muestras. Este parámetro es de mucha ayuda cuando se trata de analizar el desempeño de los procesos de tratamiento y estudiar su comportamiento en las fuentes receptoras.

Hoy en día existen distintos métodos para el cálculo de dicho parámetro.

Estos son:

- a) Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO<sub>5</sub>).
- b) Demanda Química de Oxígeno (DQO).
- c) Carbono Orgánico Total (COT).

#### **2.4.2.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**

Es la cantidad de oxígeno que utilizan los microorganismos para llevar a cabo la reducción de la materia orgánica. En la prueba estándar de DBO se vierte una pequeña muestra de agua residual en una botella (300 mL. de volumen). Dicha botella se completa a volumen usando agua saturada con oxígeno y con los nutrientes requeridos para crecimiento biológico.

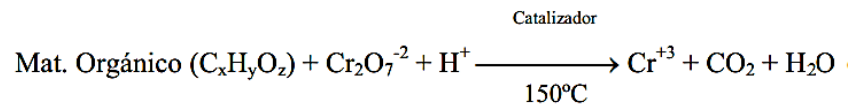
Antes de tapar la botella se mide la concentración de oxígeno. La botella se incuba durante 5 días a 20 °C para posteriormente volver a medir la concentración de oxígeno disuelto, expresado en miligramos por litro, dividido por la fracción decimal del volumen de muestra usada.

#### **2.4.2.2 Demanda química de oxígeno (DQO)**

La Demanda Química de Oxígeno ó DQO, es la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el material orgánico. Difiere de la DBO en que en esta última prueba solo se detecta el material orgánico degradado

biológicamente o que es biodegradable. En la determinación de DQO todo el material orgánico - biodegradable y no biodegradable - es químicamente oxidado por el dicromato de potasio en medio ácido en la presencia de un catalizador.

Para esto se emplea una mezcla de ácido sulfúrico y dicromato de potasio ( $\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$ ) con iones plata como catalizador. En estas condiciones, en un tiempo de dos horas de digestión, a una temperatura de  $150^\circ\text{C}$ , el Cromo (VI) pasa al estado de oxidación Cromo (III) oxidando la materia orgánica.



Parte de los materiales orgánicos no se pueden degradar biológicamente porque resultan ser tóxicos a los microorganismos o porque su reducción llega a ser tan lenta que son considerados como no biodegradables. Estos materiales son los pesticidas, insecticidas y herbicidas. Para conocer la cantidad de este tipo de materiales orgánicos no biodegradables se hace la prueba de Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Junto con la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se puede calcular la cantidad de orgánicos biodegradables presentes en el agua. Esto se puede lograr restando el valor de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) al valor de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

#### **2.4.2.3 Carbono orgánico total (COT)**

Esta prueba es usada para la medición de carbono orgánico total presente en una muestra acuosa. Los métodos para la prueba del COT utilizan oxígeno y calor, radiación ultravioleta, oxidantes químicos o alguna combinación de éstos para convertir el carbono orgánico en dióxido de carbono, el cual es medido con un analizador infrarrojo o por otros medios. El COT del agua residual puede ser utilizado para medir el nivel de polución en el agua y, además, ha sido posible relacionar este parámetro con la DBO y la DQO. Por otro lado, este ensayo toma de 5 a 10 minutos para ser completado, lo que le da una ventaja a su favor.

#### **2.4.3 Relaciones entre DBO, DQO y COT**

Dependiendo de la relación existente entre estos tres parámetros se puede hacer un análisis del tipo de tratamiento que se ha llevado a cabo en el agua residual. Así, por ejemplo tenemos que si la relación DBO/DQO para aguas no

tratadas es mayor que 0.5, los residuos se consideran fácilmente tratables mediante procesos biológicos. Si la relación DBO/DQO es menor de 0.3, el residuo puede contener constituyentes tóxicos o se pueden requerir microorganismos aclimatados para su estabilización. A continuación se muestra una tabla de las relaciones anteriormente mencionadas:

**Tabla 2.1** Comparación de varios parámetros utilizados para caracterizar aguas residuales.

<b>TIPO DE AGUA RESIDUAL</b>	<b>DBO/DQO</b>	<b>DBO/COT</b>
<b>No tratada.</b>	0.3-0.8	1.2-2.0
<b>Después de Sedimentación primaria.</b>	0.4-0.6	0.8-1.2
<b>Efluente final.</b>	0.1-0.3	0.2-0.5

Fuente: *Ron Crites y George Tchobanoglous*, "Tratamiento de aguas Residuales", USA 2000.

## 2.5 Tratamiento de aguas residuales

Los pasos básicos para el tratamiento de aguas residuales incluyen (Rodríguez *et al.*, 2006):

1. Pretratamiento: remoción física de objetos grandes.
2. Deposición primaria: sedimentación por gravedad de las partículas sólidas y contaminantes adheridos.
3. Tratamiento secundario: digestión biológica usando lodos activados o filtros de goteo que fomentan el crecimiento de microorganismos.
4. Tratamiento terciario: tratamiento químico (por ejemplo, precipitación, desinfección).

Una de las formas más utilizadas para clasificar los tratamientos unitarios más convencionales para el tratamiento de aguas residuales, es en función de los contaminantes presentes en la misma, o también en función del fundamento del tratamiento (químico, físico o biológico).

### **2.5.1 Tratamientos para la eliminación de materia en suspensión**

La materia en suspensión puede ser de muy diversa índole, desde partículas de varios centímetros y muy densas (normalmente inorgánicas), hasta suspensiones coloidales muy estables y con tamaños de partícula de hasta unos pocos nanómetros (normalmente de naturaleza orgánica).

La eliminación de esta materia en suspensión se suele hacer mediante operaciones mecánicas, aunque, en muchos casos se utilizan aditivos químicos, denominándose en este caso tratamientos químico-físicos.

Algunas de las operaciones unitarias más habituales (Rodríguez *et. al*, 2006), son desbaste, sedimentación, filtración, flotación y coagulación-floculación: pero las más relevantes para esta investigación son las siguientes:

- **Sedimentación:** Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador.
- **Filtración:** Operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0.15 y 0.3 mm.

### **2.5.2 Tratamientos para la eliminación de materia disuelta**

La materia disuelta puede tener características y concentraciones muy diversas: desde grandes cantidades de sales inorgánicas disueltas (salmueras) orgánicas (materia orgánica biodegradable en industria de alimentación) hasta extremadamente pequeñas cantidades de inorgánicos (metales pesados) y orgánicos (pesticidas) pero necesaria su eliminación dado su carácter peligroso.

Los métodos más comunes (Rodríguez *et. al*, 2006) son los siguientes: precipitación, procesos electroquímicos, intercambio iónico, adsorción y desinfección. La más relevante en la presente investigación es:

**Adsorción:** Consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del

sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. La necesidad de una mayor calidad de las aguas está haciendo que este tratamiento esté en auge. El sólido universalmente utilizado en el tratamiento de aguas es el carbón activado.

### **2.5.3 Tratamientos biológicos**

Todos los procesos biológicos de tratamiento aprovechan la notable capacidad de las bacterias para utilizar diversos componentes de aguas residuales para proporcionar la energía necesaria para el metabolismo microbiano y los bloques de construcción para la síntesis celular. Esta actividad metabólica puede eliminar los contaminantes que son tan variados como las materias primas, subproductos y productos generados en los diversos procesos y/o industrias.

Las principales ventajas sobre el tratamiento químico son (de Mes *et. al*, 2003; Schultz, 2005):

- Bajo capital y bajos costos operativos en comparación con los procesos de oxidación química.
- Destrucción de compuestos orgánicos, frente a la separación de fase simple en el proceso químico.
- La oxidación de una amplia variedad de compuestos orgánicos.
- Remoción y reducción de los compuestos inorgánicos, tales como sulfuros y amoníaco, y la eliminación de nitrógeno total posible a través de desnitrificación.
- Flexibilidad operativa para manejar una amplia gama de caudales así como diversas aguas residuales con diferentes características.
- Reducción de la toxicidad acuática

#### **2.5.3.1 Tratamiento anaerobio**

En el tratamiento anaerobio, el sustrato contenido en las aguas residuales se mezcla con grandes cantidades de microorganismos, pero aquí, el aire no forma parte del proceso. Bajo estas condiciones los microorganismos que crecen son aquellos capaces de convertir los desechos orgánicos a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y gas metano (CH<sub>4</sub>). La oxidación anaeróbica para la conversión a gas metano, representa poca energía para los microorganismos, por lo tanto, su tasa de crecimiento es lenta y sólo una pequeña porción de los residuos se convierte en nuevas células, la mayor parte de los residuos son degradados a gas metano.

Dicha conversión a gas metano representa un medio de estabilización, ya que este gas es insoluble y se escapa en cada etapa. El proceso no es completamente operacional hasta que todos los grupos formadores de metano son finalmente establecidos. Esto puede tomar varias semanas si el proceso se comenzó sin el beneficio "semilla" de lodo que contiene los formadores de metano requeridos para por la presencia de ácidos específicos (McCarty, 1964). Estos procesos pueden ser extremadamente eficientes debido a su bajo consumo de energía y menor producción de lodos en comparación con los procesos aerobios.

#### **2.5.3.1.1 Microbiología y bioquímica del proceso**

El proceso principal dentro del tratamiento de aguas residuales es la digestión anaerobia. La cual se lleva dentro de un reactor que se basa en el proceso de biodegradación llamado metanogénesis.

La metanogénesis, consta de cuatro reacciones principales: La hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, que se describe a detalle en la Figura 5.

Los pasos principales de las reacciones, se describen a continuación:

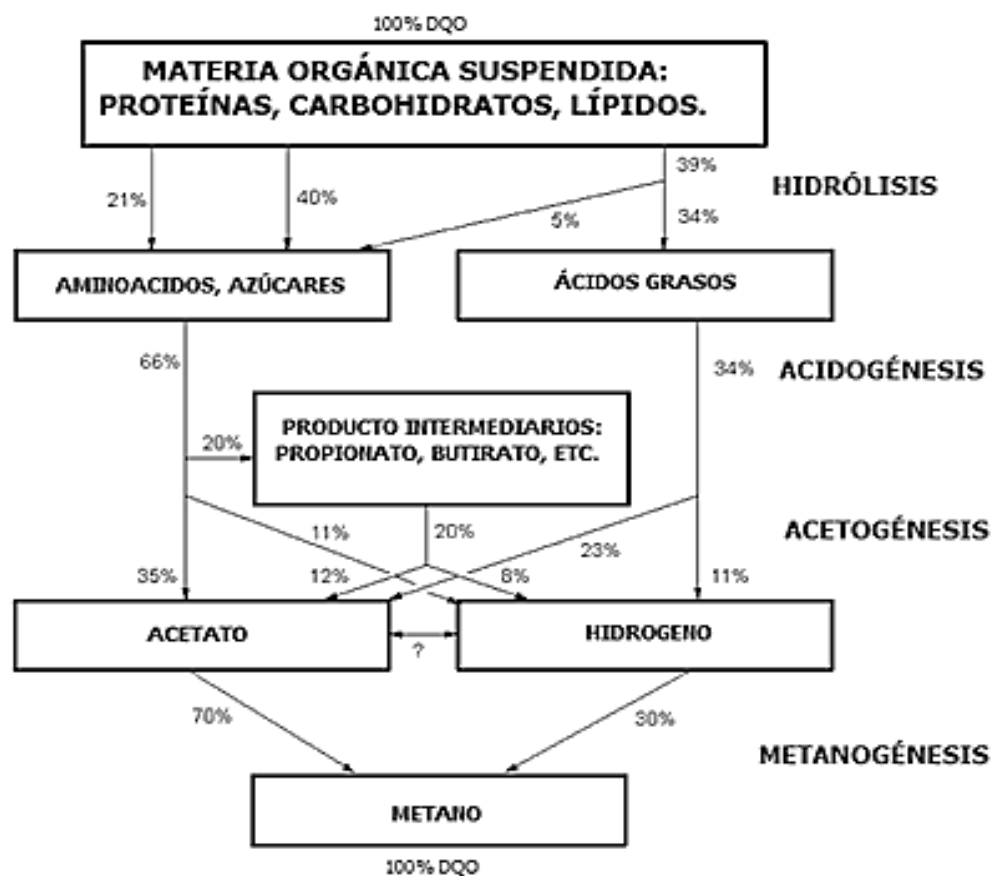
1.- La hidrólisis por medio del sistema enzima-mediador de carbohidratos, proteínas, y/o lípidos, resultando en compuestos monómeros tales como aminoácidos, azúcares, y ácidos grasos.

2.- La fermentación de ácidos orgánicos por bacterias asistidas, a través del cual de pueden obtener los ácidos orgánicos (acético, propiónico, y butírico), se denomina como el paso acidogénico.

3.- La conversión asistida por bacterias de ácidos orgánicos que contienen más de tres átomos de carbono a ácido acético e hidrógeno, se denomina paso acetogénico.

4.- La conversión de ácido acético en metano y la reducción de dióxido de carbono con hidrógeno en metano se llama paso metanogénico.

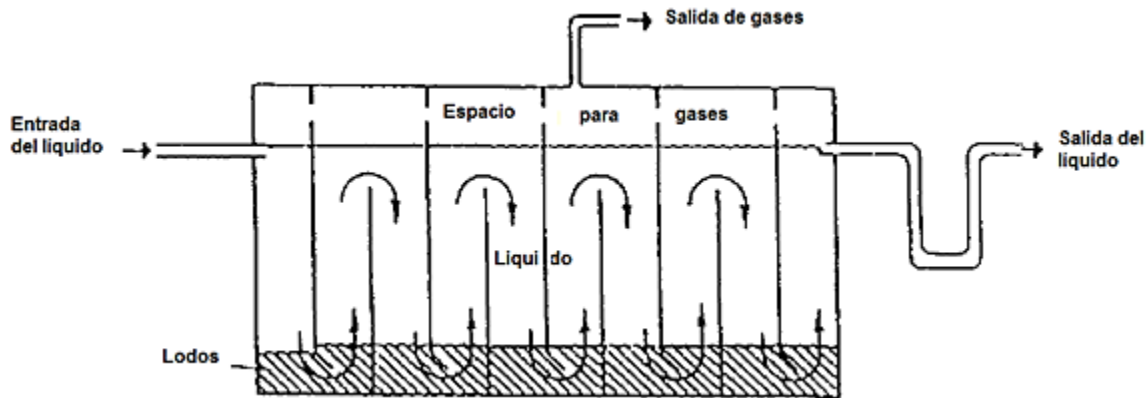




**Figura 2.2** Diagrama general de la metanogénesis llevada a cabo en el reactor anaerobio con deflectores (ABR) (Van Lier *et.al*, 2008).

Como se mencionó con anterioridad, la etapa metanogénica es llevada a cabo en un reactor, que puede ser de tipo UASB por sus siglas en inglés (reactor anaerobio de flujo ascendente), ABR por sus siglas en inglés (reactor anaerobio con deflectores), Lecho fluidizado etc.

Para fines de esta investigación el reactor continuo ABR (Anaerobic Baffled Reactor) (Figura 2.3), será analizado. Lo anterior ha sido determinado dado que las bombas para la inyección de las aguas son de bajo flujo, los cuáles en un reactor UASB o Lecho fluidizado sería complicado poder utilizarlo para romper la presión extra que ejerce el líquido por razón de la altura, dado que estos reactores son verticales. A diferencia un reactor ABR es un reactor horizontal, con el cuál no debe tener este tipo de complicaciones hidráulicas para su operación. Así también el proyecto está pensado a futuro para ser implantado en una finca cafetalera, lo cual representaría un mayor costo de operación, instalación y monitoreo es un reactor vertical.



**Figura 2.3** Esquema de un reactor ABR para la digestión anaeróbica (Kennedy *et. al*, 2007).

El consorcio de microorganismos anaerobios que trabajan juntos para llevar a cabo la conversión los residuos a partir de los lodos orgánicos se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Organismos responsables de la hidrólisis de polímeros orgánicos y lípidos a las estructuras fundamentales, como monosacáridos, aminoácidos, y compuestos relacionados. Es llevada a cabo por enzimas extracelulares, por ejemplo, *Clostridium*, que degrada compuestos que contienen celulosa y almidón, y *Bacillus* que se encarga de la degradación de proteínas y grasas.
- Bacterias anaerobias que fermentan a los productos degradados a ácidos orgánicos simples, el más común en un digestor anaeróbico es el ácido acético a través de microorganismos acidogénicos o formadores de ácidos. Estas bacterias se describen como no metanogénicas y pueden ser *Clostridium spp.*, *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium spp.*, *Desulphovibrio spp.*, *Corynebacterium spp.*, *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Aureus* y *Escherichia coli*.
- Organismos que convierte el ácido acético e hidrógeno formado por los formadores de ácido en gas metano y dióxido de carbono, designados como metanogénicos. Los microorganismos más importantes que han sido identificados son *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* y *Methanosarcina* (Gavrilescu, 2002).

# CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

El presente proyecto de investigación denominado: Rediseño de un biorreactor para el tratamiento de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café se llevó a cabo en el laboratorio de Biotecnología del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, en el Estado de Chiapas.

## 3.1 Diseño y construcción de sedimentador, filtro y reactor.

### 3.1.1 Sedimentador de placas inclinadas

Dado que se buscaba optimizar el sistema desarrollado por Tacias (2012) que reportó la remoción de DQO en un sedimentador del  $48 \pm 3.3\%$ , se propuso el rediseño empleando placas inclinadas, esto debido a que, Cheng *et al.* (2009) Reportaron un porcentaje de remoción de entre 50-70% a una separación entre placas de 50-50 mm a 100-100 mm con una inclinación de  $60^\circ$ , señalaron también que, el espacio entre las placas inclinadas afecta la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos, puesto que cuanto menor sea el espacio entre placas, menor será la distancia de sedimentación de sólidos en suspensión, y la remoción de partículas suspendidas podría ser mejor. Yaksic y Ramírez (2005) también señalaron que las placas inclinadas aumentan el porcentaje de eliminación de sólidos en suspensión y que las placas inclinadas podrían acortar la distancia de la sedimentación e incrementar la velocidad de sedimentación.

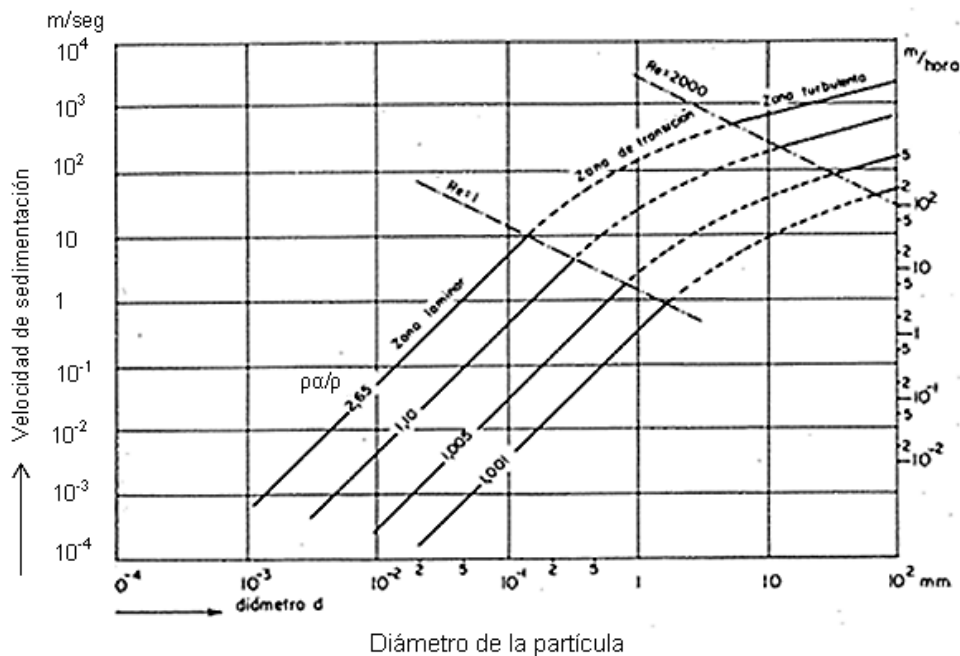


Figura 3.1 Gráfica de sedimentación de acuerdo al tamaño de partícula (Kubesch *et al.*, 2009)

El sedimentador tiene por objeto separar del agua cruda partículas inferiores a 0.2 mm y superiores a 0.05 mm, en un régimen laminar, tal y como se refleja en la Figura 3.1 y la ecuación que lo gobierna es la Ley de Stokes (ecuación 1).

$$V_s = \frac{1}{18} * g * \left( \frac{\rho_s - 1}{\eta} \right) * d^2 \quad (1)$$

Dónde:

- $V_s$ : velocidad de sedimentación (m/s)
- $G$ : Gravedad ( $m/s^2$ )
- $\rho_s$ : Densidad de la partícula ( $kg/m^3$ )
- $\eta$ : Viscosidad de la partícula ( $kg/m*s$ )
- $d$ : Diámetro de la partícula (m)

Dado que estos tipos de datos, principalmente la densidad, viscosidad y diámetro promedio no son conocidos por su variabilidad, los datos de la Tabla 3.1 son ideales para obtener la velocidad de sedimentación, en base a lo expresado con anterioridad sobre los diámetros de partícula deseables a ser removidos en esta etapa.

**Tabla 3.1** Relación del diámetro de partícula con la velocidad de sedimentación.

Diámetro partícula (mm)	Velocidad de sedimentación (m/h)
<b>0.15</b>	40-50
<b>0.20</b>	65-75
<b>0.25</b>	85-95
<b>0.30</b>	105-120

Para llevar a cabo el dimensionamiento del sedimentador, es necesario contar con los datos presentados en la Tabla 3.1 y con el flujo de alimentación del sistema, para conocer el área superficial del sistema (ecuación 2).

Con el área superficial se propone el ancho del sedimentador (B), y con esto se establecen las relaciones para obtener las dimensiones del sistema; longitud (L) (ecuación 3) y altura (H) (ecuación 4). Con lo anterior se puede calcular el volumen total ocupado por las aguas (V) (ecuación 5):

$$A_s = \frac{Q}{V_s} \quad (2)$$

Dónde:

- $A_s$ : Área de sedimentación ( $m^2$ )
- $Q$ : Caudal ( $m^3/s$ )
- $V_s$ : Velocidad de sedimentación ( $m/s$ )

$$3 < \frac{L}{B} < 6 \quad (3)$$

$$5 < \frac{L}{H} < 20 \quad (4)$$

$$V = L * H * B \quad (5)$$

Esto representa las tres cuartas partes del volumen total del sistema (VT) de acuerdo a reglas heurísticas, y debe de ser aumentado un 25% para obtener el volumen total del sistema, este volumen corresponde a la altura del sistema.

Para conocer el tiempo de retención hidráulica del sistema (TRH) se lleva a cabo un análisis sobre la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (6)$$

Dónde:

- TRH: Tiempo de retención hidráulica (h)
- V: Volumen del sedimentador (m<sup>3</sup>)
- Q: Flujo volumétrico (m<sup>3</sup>/h)

Con base a la ecuación 7 y los datos de la Tabla 6.2 se puede conocer el porcentaje de remoción aproximado:

$$R = \frac{t}{a + b * t} \quad (7)$$

Dónde:

- R: Porcentaje de remoción esperado DBO<sub>5</sub> o STT (%)
- t: Tiempo de retención hidráulica (h)
- a y b: Constantes empíricas

**Tabla 3.1** Constantes empíricas para la ecuación de porcentaje de remoción aproximado

R	a	b
<b>DBO<sub>5</sub></b>	0.018	0.020
<b>SST</b>	0.0075	0.014

El dimensionamiento del sedimentador, se llevó a cabo a partir de la Ley de Stokes, se determinó una velocidad de sedimentación (Vs) de  $2.7 \times 10^{-4}$  cm/s, así también se tomó en cuenta el flujo de alimentación más elevado propuesto (0.34 L/h).

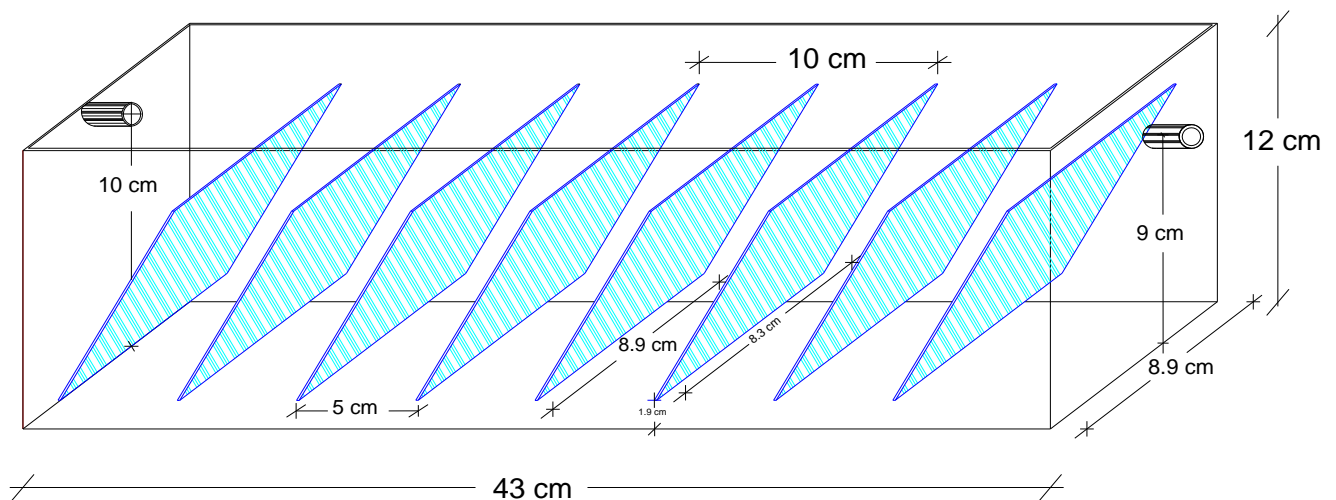
Se procedió al cálculo del área superficial a partir de la ecuación 2, dando como resultado:

$$A_s = \frac{3.36 \times 10^{-4} \left( \frac{m^3}{hr} \right)}{9.77 \times 10^{-3} \left( \frac{m}{hr} \right)} = 0.0344 m^2$$

Con el área superficial se propuso un ancho del sedimentador (B) de 8.2 cm, y en base a las relaciones  $L/B = 4$  se obtuvo una longitud (L) de 40.6 cm. Con la longitud anterior se calculó la altura (H) en base a la relación  $L/H = 5$ , obteniéndose una altura de 10.2 cm, siendo el volumen total ocupado por las aguas residuales (V) de 3.4 L. Se debe de tener un volumen de seguridad del 75%, obteniéndose un volumen final de 4.6 L con las siguientes dimensiones:

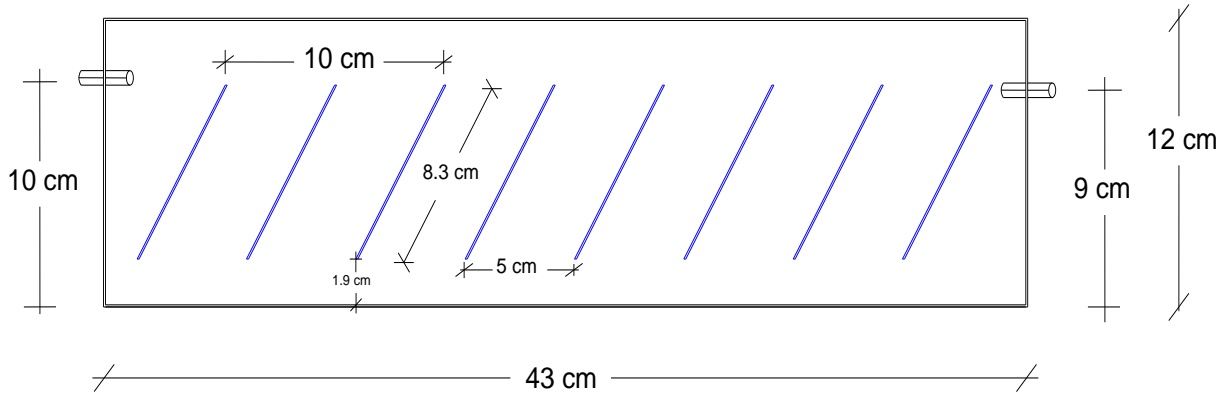
- Longitud: 43 cm
- Ancho: 8.9 cm
- Altura: 12 cm

El ancho de las 8 placas es de 8.9 cm de ancho x 8.3 cm de largo. En la Figura 3.2 se presenta el esquema en alzado del sistema.



**Figura 3.1** Esquema en alzado del sedimentador con placas inclinadas

En la Figura 3.3 se presenta el esquema transversal del sedimentador con placas inclinadas.



**Figura 3.2** Esquema transversal del sedimentador de placas inclinadas

Se evaluaron 3 factores, 2 factores con 3 niveles y 1 factor con 2 niveles (diseño factorial  $3^2 \times 2$ ) sobre la variable de respuesta que fue el porcentaje de remoción de DQO:

- Variación de flujos: 0.34, 0.23 y 0.17 L/h para cumplir con los tiempos de retención hidráulica (TRH) de 10, 15 y 20 h respectivamente.
- Ángulos de inclinación de los deflectores: 55, 60 y 65 °
- Distancia de la separación entre deflectores: 5 y 10 cm.

El diseño se corrió por triplicado, dando un total de 54 unidades experimentales. Se realizó un ANOVA simple para hacer una comparación de medias con el programa STATGRAPHICS CENTURION XVI.II.

Se realizó una estimación del porcentaje de la  $DBO_5$  y los sólidos suspendidos totales (SST) que serán removidos en base a la ecuación 6.7 y la Tabla 6.2 con los tiempos de retenciones hidráulicas obtenidas con anterioridad:

- TRH 10 h:  $DBO_5 = 45.87 \%$ ,  $SST = 67.80 \%$
- TRH 15 h:  $DBO_5 = 47.16 \%$ ,  $SST = 68.97 \%$
- TRH 20 h:  $DBO_5 = 47.85 \%$ ,  $SST = 69.57 \%$



### 3.1.2 Reactor

Para disminuir la carga orgánica contenida en el agua residual, se ha diseñado un reactor anaerobio de flujo pistón con placas horizontales. Para el dimensionamiento han sido utilizadas las ecuaciones 8 al 13. El tiempo de retención hidráulica para dimensionar el reactor fue de 36 horas. El reactor fue construido utilizando una placa de metal y acrílico transparente de 3 cm de espesor, las piezas fueron pegadas con silicón transparente.

$$V_T = Q * TRH \quad (8)$$

$$V_C = \frac{V_T}{N_C} \quad (9)$$

$$A_A = \frac{Q}{V} \quad (10)$$

$$A_A \text{ 2:1 } A_D \quad (11)$$

$$1.2 < \frac{L}{B} < 2 \quad (12)$$

$$2 < \frac{L}{H} < 3 \quad (13)$$

Dónde:

- $V_T$ : Volumen total ( $m^3$ )
- $Q$ : Caudal ( $m^3/h$ )
- $TRH$ : Tiempo de Residencia Hidráulica (h)
- $V_C$ : Volumen de compartimiento ( $m^3$ )
- $N_C$ : No. de compartimientos
- $A_A$ : Área de ascenso ( $m^2$ )
- $A_D$ : Área de descenso ( $m^2$ )
- $L$ : Longitud (m)
- $B$ : Ancho (m)
- $H$ : Altura (m)

Para tiempos de retención medio, se recomienda un valor mayor al de 4 h (Kennedy y Barriault, 2007), esto con la finalidad de completar la metanogénesis, y llevar a cabo un porcentaje de remoción de carga orgánica elevado. Así también un tiempo de retención medio muy elevado, únicamente puede representar un desperdicio de tiempo y dinero en costos operacionales, ya que no aumenta el porcentaje de remoción de la carga orgánica.

De acuerdo a la ecuación 8 el volumen del reactor es de:

$$V = Q * TRH = 0.336(L/hr) * 36(hr) = 12.096L$$

Conteniendo cinco compartimientos del mismo volumen cada uno, con la finalidad de especializar los microorganismos al paso del tiempo y elevar la eficiencia del sistema.

Las dimensiones del reactor son las siguientes:

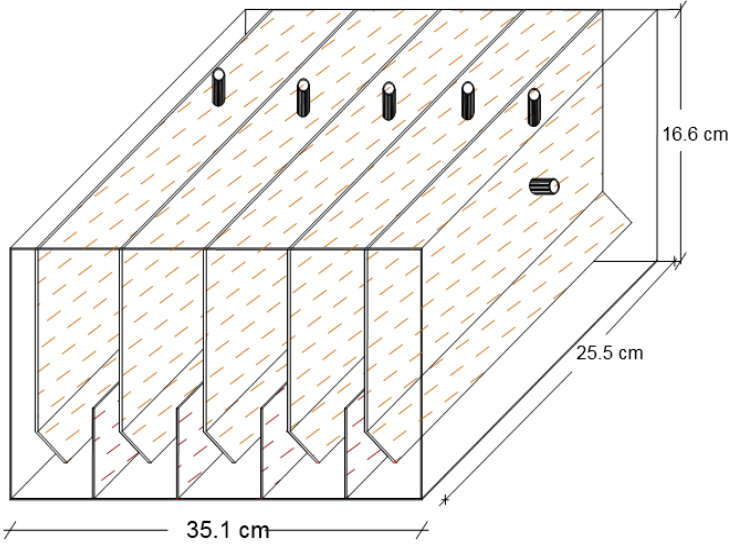
$$L = 35.1cm$$

$$H = 16.6cm$$

$$B = 25.5cm$$

$$V_c = \frac{V}{N_c} = \frac{12.096(L)}{5} = 2.42(L)$$

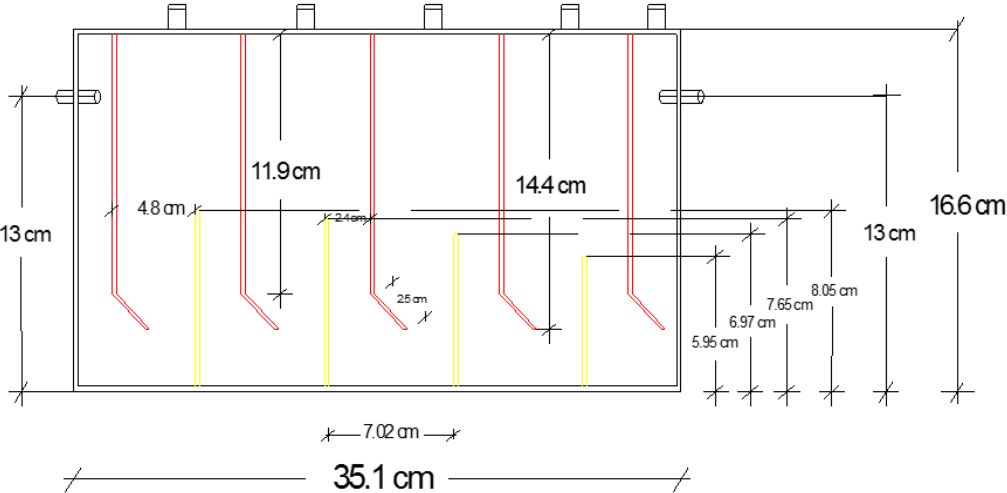
En la Figura 3.4 se presenta el esquema en alzado con las dimensiones antes calculadas para su conformación.



**Figura 3.4** Esquema en alzado del reactor anaerobio con placas horizontales

El inóculo previamente adaptado se colocó en el fondo, dentro del reactor anaerobio con placas horizontales en un volumen equitativo para cada uno de los pasos dentro del sistema.

En la Figura 3.5 se presenta el esquema transversal.



**Figura 3.5** Esquema transversal del reactor

La variable a evaluar dentro del reactor fue la siguiente:

- Variación de tiempos de retención hidráulica (TRH) de 12, 24 y 36 h respectivamente.

Dando un total de 9 unidades experimentales contando las 3 repeticiones. Se tuvo como variable de respuesta el porcentaje de remoción de la DQO a la salida del sistema. Se realizó un ANOVA simple para hacer una comparación de medias con el programa STATGRAPHICS CENTURION XVI.II.

### 3.1.3 Filtro lento de arena modificado

En lo reportado por Tacias (2012) señala que la remoción en el filtro fue de aproximadamente el 9% ya que el tiempo de residencia era mínimo, tan pequeño que no se tomó en cuenta para el TRH de diseño del reactor, es por esta razón que para hacer más eficiente el sistema se incrementó la cantidad de carbón activado y el TRH, buscando también dar solución al problema de que los efluentes presentaban aún coloración. Para llevar a cabo el dimensionamiento del filtro se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$A_s = \frac{Q}{N * V_f} \quad (14)$$

$$K = \frac{2 * N}{N + 1} \quad (15)$$

$$L = \sqrt{A_s * K} \quad (16)$$

$$B = \sqrt{\frac{A_s}{K}} \quad (17)$$

$$V_{FR} = \frac{Q}{2 * L * B} \quad (18)$$

Con dichas ecuaciones se ha calculado el tamaño del filtro:

$$A_s = \frac{3.36 \times 10^{-4} (\text{m}^3/\text{hr})}{1 * 0.0305 (\text{m}/\text{hr})} = 0.011025 \text{m}^2$$

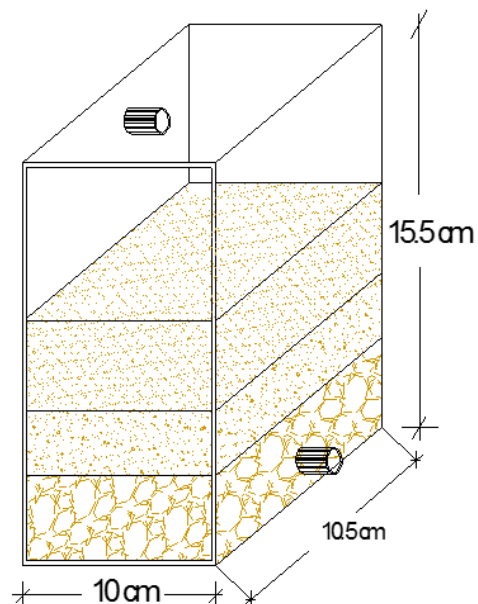
$$K = \frac{2 * 1}{1 + 1} = 1$$

$$L = \sqrt{0.011025 (\text{m}^2) * 1} = 0.105 \text{m}$$

$$B = \sqrt{\frac{0.011025 (\text{m}^2)}{1}} = 0.105 \text{m}$$

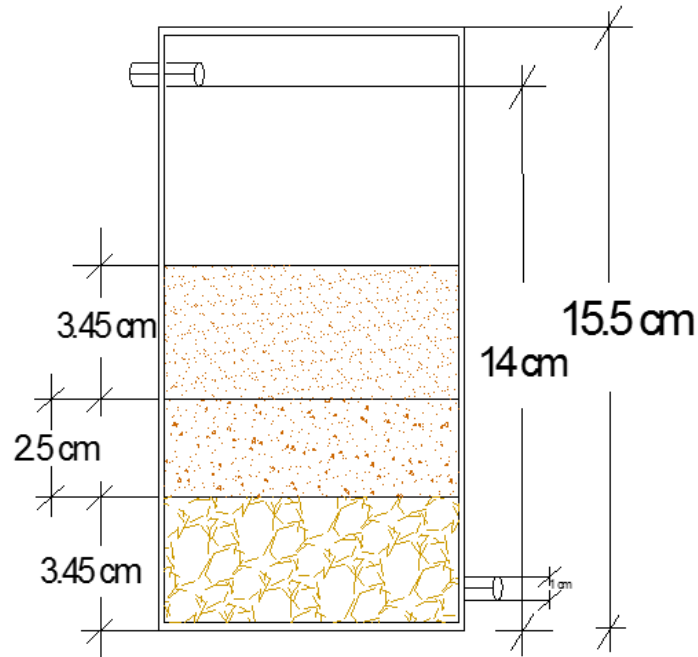
$$V_R = \frac{3.36 \times 10^{-4} (\text{m}^3/\text{hr})}{2 * 0.105 (\text{m}) * 0.105 (\text{m})} = 0.01524 (\text{m}/\text{hr})$$

Esquema en alzado se presentan en la Figura 3.6 Un recipiente plástico con las dimensiones requeridas para el filtro ha sido utilizado, perforado en la parte superior e inferior del sistema para la alimentación y salida del flujo.



**Figura 3.6** Esquema en alzado del filtro lento de arena

El sistema de filtración se presenta en la Figura 3.7 de modo transversal para poder observar la configuración del mismo, teniendo la grava como soporte, el carbón activado por granulometría, y finamente la arena.



**Figura 3.7** Esquema transversal del filtro lento construido

El filtro fue evaluado a partir de los siguientes parámetros:

- Flujos de alimentación: 0.34 y 1 L/h
- Porcentaje (%) de la relación carbón activado-arena-grava de río del volumen total ocupado: 15-75-10, 20-70-10 y 25-65-10.

Dando un total de 27 unidades experimentales contando las 3 repeticiones.

Se tuvo como variable de respuesta el porcentaje de remoción de la DQO a la salida del sistema. Se realizó un ANOVA simple para hacer una comparación de medias con el programa STATGRAPHICS CENTURION XVI.I

### 3.2 Recolección de las aguas residuales del beneficio húmedo del café

Las muestras de agua residual del beneficio húmedo del café (ARBHC), que fueron objeto de estudio en este proyecto fueron obtenidas de un beneficio ubicado en Paredón, municipio de Jitotol, Chiapas (Figura 11). Cuyas coordenadas son las siguientes: Latitud 17°6'37.69" (Norte) Longitud -92°45'41.54" (Oeste). Se recolectaron 17 garrafones con capacidad de 20 litros cada uno (340 L en total), los cuales fueron transportados a un cuarto de refrigeración, para ser preservados a una temperatura de 4 °C, hasta su uso.

Es muy importante señalar que las aguas que se recolectaron no son de la misma procedencia que las empleadas por Tacias, 2012. Por lo que es una variable que debe considerarse más adelante.



**Figura 3.8** Ubicación del beneficio

### 3.3 Estabilización de lodos

Para esta operación el agua residual (previamente neutralizada) con bicarbonato de sodio(solido),fue inoculada con los lodos activos a una proporción 1:1 (v lodo/v agua).

Los pasos a seguir fueron los siguientes:

- Se midió el volumen total de lodos dando como resultado 750 ml
- Se midió el pH de agua residual el cual fue de 3.8
- Se procedió a neutralizar el pH del agua residual; para ello se agregaron 13.3 g de bicarbonato de sodio
- Se mezclaron 750 ml de lodos con 750 ml de agua residual
- Se monitoreó el inóculo cada 3 días midiendo DQO hasta que se observó una variación de  $\pm 20\%$

### 3.4 Caracterización del agua residual del beneficio húmedo del café

El influente a tratar en los reactores fue analizado de acuerdo a los parámetros descritos en la norma oficial mexicana NOM-CCA-027-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria del beneficio del café, determinando (Tabla 3.3).

**Tabla 3.3** Determinaciones hechas a las aguas residuales del beneficio húmedo del

Determinación	Norma
<b>pH</b>	NMX-AA-008-SCFI-2000. Método potenciométrico
<b>Demanda química de oxígeno</b>	NMX-AA-030-SCFI-2001. Método espectrofotométrico
<b>Sólidos sedimentables</b>	NMX-AA-004-SCFI-2000
<b>Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Disueltos Totales y Sólidos Totales</b>	NMX-AA-034-SCFI-2001



### 3.5 Sistema de neutralización

La ostra como producto dominante de las explotaciones de moluscos es notable desde el punto de vista en el desarrollo económico. Sin embargo, esta industria tiene un grave problema sobre la eliminación de conchas como residuos. Si estos residuos son dejados sin tratamiento durante mucho tiempo, puede ser una fuente de olor desagradable como consecuencia de la descomposición de la carne remanente unida a las ostras o la descomposición microbiana de sales en gases tales como  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y aminas.

Desde principios de la década de 1980, investigadores japoneses han investigado posibles reúsos para este desecho.

El contenido de la salinidad en conchas de ostras es de aproximadamente 0.35%, derivado de la proporción del peso total de la ostra con relación a la cantidad total de iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ). Como puede observar en la tabla 3.4 las conchas de ostra están compuestas principalmente de  $\text{CaCO}_3$  (aproximadamente 96%) de otros minerales en menor cantidad (Gil-Lim *et. al*, 2002).

**Tabla 3.4** Composición química de la concha de ostión (Gil-Lim *et. al.*, 2002).

<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub>(%)</b>	<b>MgO(%)</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(%)</b>	<b>SrO(%)</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(%)</b>	<b>Na<sub>2</sub>O(%)</b>	<b>SO<sub>3</sub>(%)</b>	<b>Total (%)</b>
<b>95.994</b>	0.696	0.694	0.419	0.33	0.204	0.984	0.724	100.0

Debido al alto contenido de  $\text{CaCO}_3$  y un porcentaje de porosidad del 54.99%, puede ser utilizado para elevar el pH del agua cuando contengan valores bajos, o en su defecto neutralizarla, ya que tiene una superficie de contacto similar a la del carbón activado.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Características físico químicas del agua residual

Este proceso ha sido diseñado para obtener una eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. A continuación se observa las siguientes características en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Características de las operaciones unitarias diseñada

CARACTERÍSTICA	SISTEMA	DIMENSIÓN/CONDICION DE OPERACIÓN
TRH diseño (h)	Sedimentador	10
Flujo diseño (mL/min)		5.6
Largo (cm)		43
Ancho (cm)		8.9
Alto (cm)		12
Volumen (L)		4.6
TRH diseño (h)	Reactor	36
Flujo diseño (mL/min)		5.6
Largo (cm)		35.1
Ancho (cm)		25.5
Alto (cm)		16.9
Volumen (L)		15.13
TRH diseño (h)	Filtro	2
Flujo diseño (mL/min)		5.6
Largo (cm)		10.5
Ancho (cm)		10.5
Alto (cm)		15.5
Volumen (L)		1.71

El sistema de tratamiento simula una planta de tratamiento a escala laboratorio; contando con cada uno de los pasos requeridos en cualquier sistema; pre tratamiento con el sedimentador y sistema de neutralización de pH (conchas de mar), el tratamiento que consiste en el reactor anaerobio con el inóculo previamente adaptado, y finalmente el pos tratamiento que consiste en el filtro con arena, grava, carbón activado.

#### 4.1.1 Caracterización del agua residual del beneficio húmedo del café

En la tabla 4.2 se muestra la caracterización del agua residual proveniente del beneficio húmedo del café recolectado.

**Tabla 4.2** Caracterización del agua residual proveniente del beneficio húmedo del café crudo

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)</b>	48,963.35 ± 639.47
<b>Sólidos sedimentables (mL/L)</b>	578.36 ± 57.29
<b>Sólidos Totales (mg/L)</b>	5,620.24 ± 894.32
<b>Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)</b>	1,518.73 ± 914.06
<b>Sólidos Disueltos Totales (mg/L)</b>	4,562. 65 ± 792.57
<b>pH</b>	3.8 ± 0.12
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.0315 ± 0.0021

Cabe mencionar que el agua residual en cuanto a características físicas, presenta un olor a vinagre, esto puede deberse a la presencia de ácidos orgánicos como el ácido acético. El color característico café oscuro puede deberse a la presencia de pectinas, taninos así como sus derivados, formados principalmente durante el proceso de despulpado del beneficio húmedo del café, (Bello y Rivera, 1998).

Posteriormente, la demanda química de oxígeno (DQO), que se obtuvo como resultado fue de 48,963.35 ± 639.47 mg/L., esto representa un valor alto en comparación a lo que reportan otros autores, que han encontrado concentraciones de DQO de 16,684.33 mg/L, 15,000 y 20,000 mg/L (Murthy *et al.*, 2004; Tacias, 2012).

Esto puede deberse a que muchas veces el agua es reutilizada para reducir el consumo de la misma, ya que en los lugares de beneficio tienen poca disponibilidad del líquido, haciendo que la concentración de materia orgánica se eleve, así también se le atribuye la alta carga orgánica a la lenta degradación de los compuestos presentes como: celulosa, hemicelulosa y lignina principalmente.

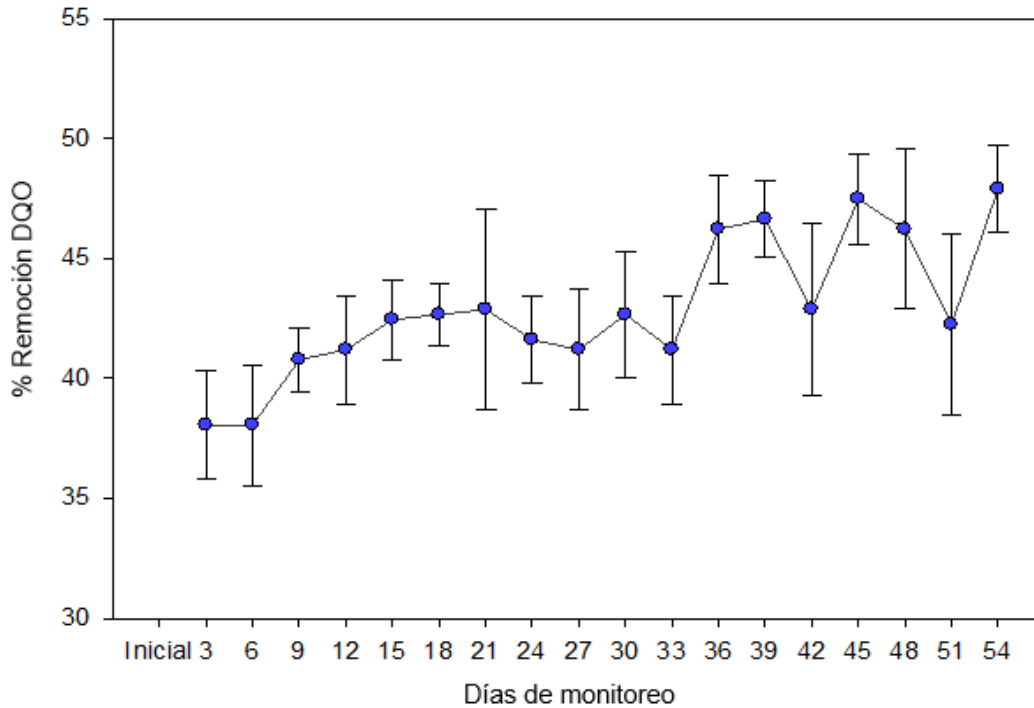
El agua residual de acuerdo a su caracterización, presenta una gran cantidad de sólidos tanto suspendidos como disueltos y totales; estos sólidos pueden deberse principalmente a la presencia de pectina, proteínas y azúcares los cuales son biodegradados de forma natural.

Los componentes orgánicos presentes en la pulpa de café (peso en seco) incluyen 63% de celulosa, 2.3% hemicelulosa, 11.5% proteínas, 2.2% grasa, fibra total 69.5%, polifenoles totales 1.5%, azúcares totales 14.4%, sustancias pécticas 6.5%, lignina 17.5%, taninos 3%, ácido clorogénico 2.4%, cafeína 1.5% (Murthy *et. al.*, 2012).

El pH del agua fue de  $3.8 \pm 0.12$ , es el característico de este tipo de residuo, debido a que dentro del proceso de beneficio la fermentación de azúcares son convertidas principalmente a alcohol y  $\text{CO}_2$ , el cual posteriormente se convierte en ácido acético, gran responsable del pH bajo, así también como otro tipo de ácidos orgánicos como el propiónico y butírico por mencionar algunos.

#### 4.1.2 Estabilización de los lodos

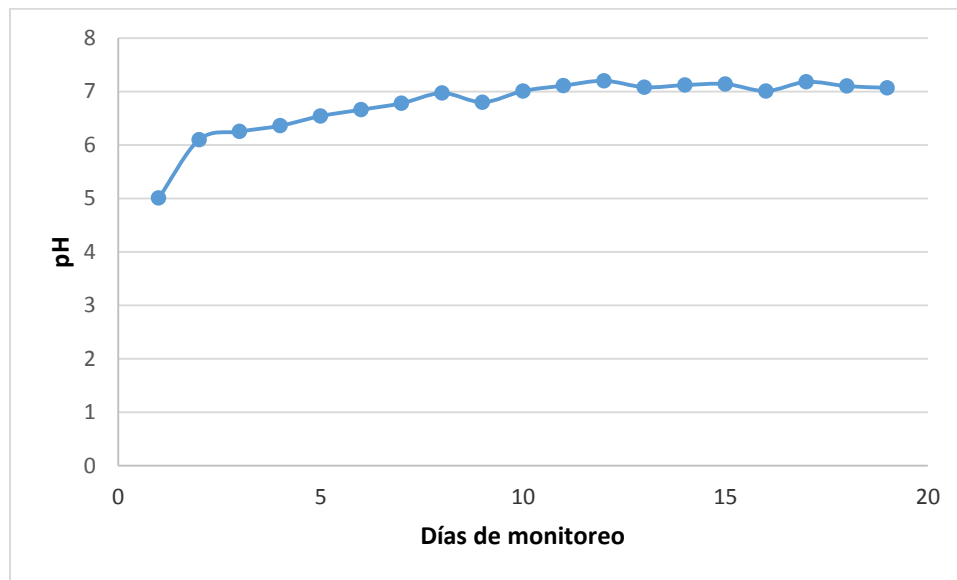
El inóculo metanogénico obtenido de una planta de tratamiento de la ciudad de Tlaxcala fue monitoreado durante un periodo de 54 días, se puede apreciar en la figura 4.1.



**Figura 4.1** Estabilización de inóculo metanogénico.

Se observa que a partir del día 30 el inóculo puede considerarse estable, ya que cumple con el requerimiento de estabilidad para lodos de aguas residuales; que es de  $\pm 20\%$  de desviación estándar respecto a la remoción de la DQO. El rango tan amplio que se permite en los sistemas de tratamiento de agua residual, se debe a que el sustrato (agua residual) nunca tiene una composición igual y provoca una alteración en el metabolismo de los microorganismos degradadores. Ha sido ampliamente reportado que los microorganismos anaerobios son capaces de soportar estos cambios. Esto debido a que su metabolismo es mucho más lento a comparación de un sistema aerobio, y la mayor parte de la degradación metabólica (más de un 80%) está destinada a la producción de biogás.

Es primordial indicar que estos microorganismos estuvieron previamente dentro de un procedimiento de degradación de vinazas, con una carga orgánica superior a la presente en el agua residual del café (por encima de los 100,000 mg/L de DQO), lo cual pudo haber representado un factor importante para su adaptación, ya que al ser sometidos a una carga menor, pudieron haberse adaptado de mejor forma. Así también, estos microorganismos fueron desarrollados dentro de un sistema RAFA, por lo que los lodos adquirieron la forma esférica característica con un diámetro promedio de 1 mm, donde se contiene todo el consorcio microbiano, lo cual influyó de gran manera a la degradación anaerobia elevada llevada a cabo.



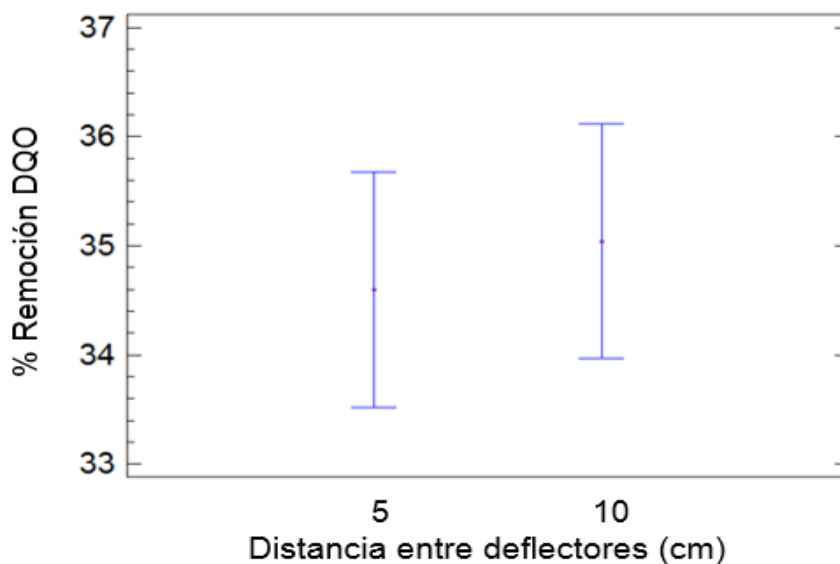
**Figura 4.2** Estabilización del pH del inóculo metanogénico a través del tiempo.

El pH juega una función primordial dentro de la degradación como se demuestra en la figura 4.2; ya que al no neutralizar el agua residual no se logra la etapa metanogénica de forma eficiente (Tacias ,2012). Se obtiene como resultado un pH del agua de 4.1; en comparación al agua residual inicial que contenía un pH de 3.8. Esto ha sido mediante neutralización con bicarbonato de sodio hasta alcanzar un pH de 5, lo cual beneficia a la degradación anaerobia; ya que se alcanzaron porcentajes de remoción del 47% y el pH del sistema completo se mantuvo en la neutralidad. Posteriormente, se debe a la producción de CO<sub>2</sub> y sales de acetato (Organización Internacional del café, 2005).

## 4.2 Sedimentador

El dimensionamiento del sedimentador fue estructurado con el propósito de disminuir la alta concentración de sólidos suspendidos contenidos en el agua cruda. Es por eso que la longitud del sistema permite tener un espacio suficiente para la deposición de sólidos. El uso de placas para sedimentación, ha sido ampliamente utilizado para elevar la cantidad de sólidos suspendidos removidos. Evaluar la separación entre placas dentro del sistema fue importante, ya que en aguas residuales de tipo urbanas si tiene un efecto sobre la remoción de sólidos como de carga orgánica.

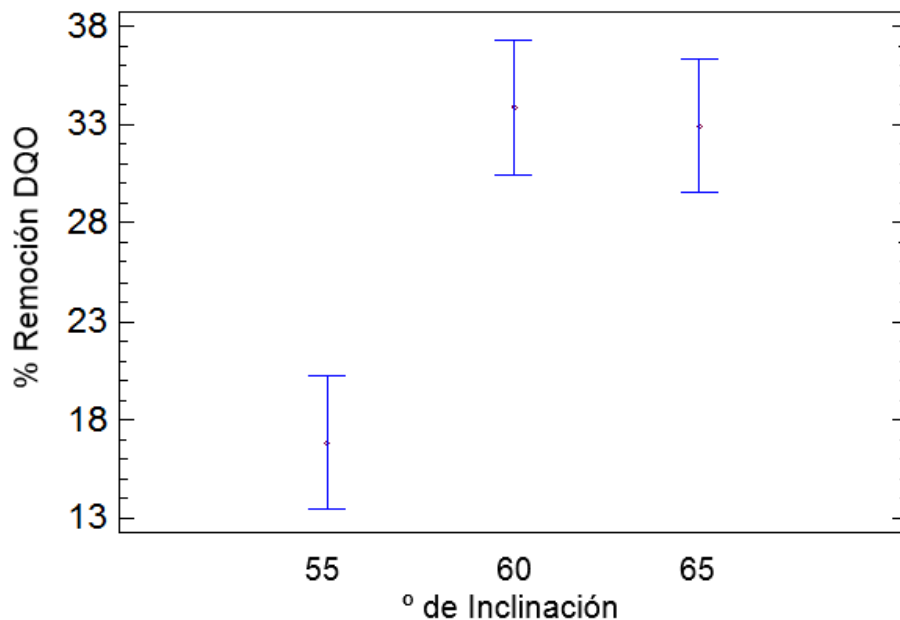
En el caso del agua residual proveniente del beneficio húmedo del café, este factor no fue importante, como se puede observar en el diagrama de Fisher en la figura 4.3. Esto puede deberse a la naturaleza propia del sólido, puesto que no existe diferencia estadística significativa entre ambas distancias.



**Figura 4.3** Análisis estadístico del porcentaje de remoción de DQO en función de separación de placas.

A cotinuacion se presenta el análisis de Fisher establecida en la figura 4.4. Para los grados de inclinación sobre el porcentaje de remoción de DQO, en donde se encuentra que no existe una diferencia estadística significativa entre 60 y 65° de inclinación, en cambio si existe una diferencia con respecto a 55°. Posteriormente concuerda con lo reportado por varios autores, donde se ha publicado que 60° es el grado de inclinación óptima para remoción de carga orgánica y sólidos

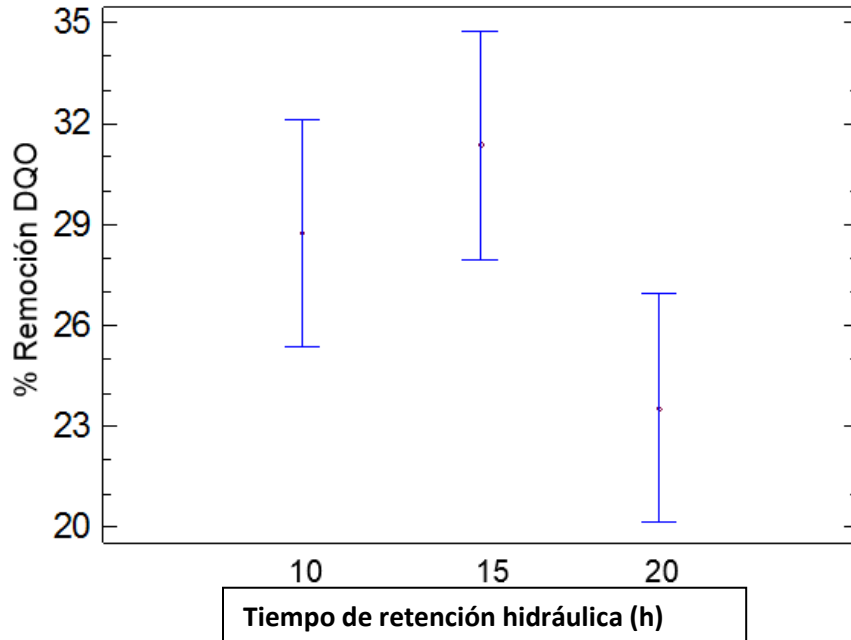
suspendidos en agua residual doméstica (Cheng *et. al*, 2009). Los sólidos del agua residual del beneficio húmedo del café se comportan de la misma forma ya establecidos en la figura ,especialmente por el efecto de coalescencia, que se refiere a una deposición en conjunto de diversas partículas, lo cual las hace más pesadas y más susceptibles a sedimentarse.



**Figura 4.4** Análisis estadístico del porcentaje de remoción de DQO en función del ángulo de inclinación.

De la misma manera se presenta el análisis estadístico de Fisher para el tiempo de retención hidráulica del sistema ubicada en la figura 4.5. En el cual se puede examinar que no existe una diferencia estadística significativa entre 10 h y 15 h, de tiempo de residencia hidráulica pero si existe una diferencia con respecto a 20 h. Además se puede estimar que a 20 h de TRH disminuye el porcentaje de remoción de DQO, esto puede deberse a la baja densidad del agua cruda que es de  $1.03 \text{ g/cm}^3$ . Por tanto puede contribuir a una resuspensión de sólidos a tiempos de retención hidráulicos elevados como 20 h. Lo anterior puede compararse con lo reportado por Tacias, 2012 en donde a un tiempo de 8 h de TRH obtuvo una remoción del 39.57% y a un TRH de 11 h, 48.03%.





**Figura 4.5** Análisis estadístico del porcentaje de remoción de DQO en función del tiempo de retención hidráulica.

La remoción de sólidos dentro del sistema es (87.55%) mayor a la expuesto por Saleh *et. al*, (1999), en el sistema planteando para el agua proveniente del beneficio húmedo, Saleh tiene como resultado una remoción del 69%, a diferencia de la remoción que se tuvo en la DQO. El sistema propuesto removió 36.72%, comparando con el autor antes mencionado, que fue del 95.53% de remoción; esto puede deberse que a pesar de existir una cantidad importante de sólidos en el agua cruda, también existen muchas sustancias disueltas que no pueden ser removidas mediante un sistema físico como la sedimentación. (Orozco *et. al.*, 2005).

Con los datos anteriores se establecieron las condiciones de operación para el sedimentador:

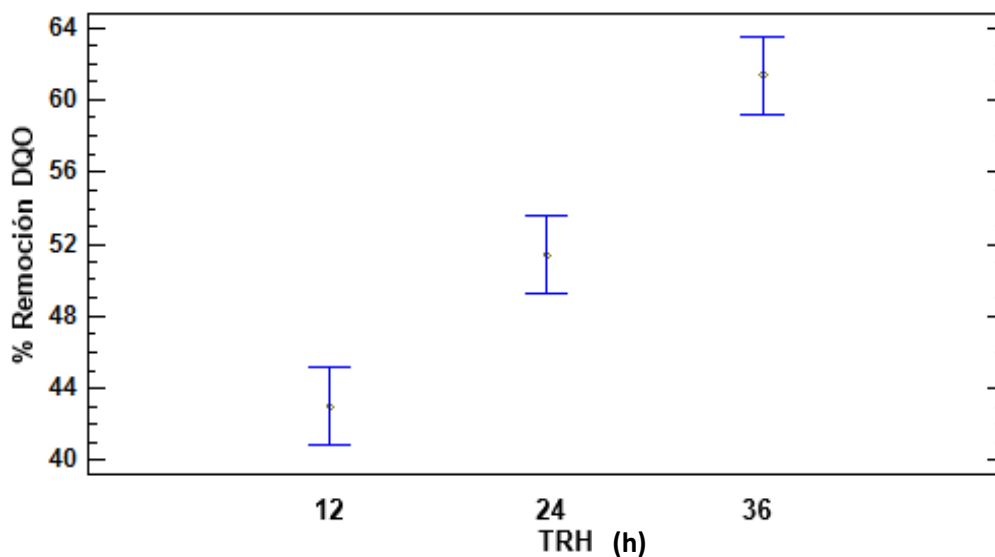
- 10 h de tiempo de retención hidráulica
- 10 cm de separación entre placas
- 60° de inclinación de las placas

Se obtienen una remoción total a estas condiciones del 36.72% de disminución en la DQO y una remoción de sólidos suspendidos totales de 87.55% con respecto al sedimentador.

### 4.3 Reactor

El reactor anaerobio con placas horizontales fue configurado con el fin de evitar el uso bombas para su alimentación. Así también la configuración interna está diseñada para el fluido continuo del líquido, buscando el contacto entre el inóculo que contienen los microorganismos y el agua con el uso las placas horizontales. El flujo del sistema se da como flujo pistón, el principio de dicho sistema son los reactores RAFA conectados en serie. Se implementaron 5 compartimientos (Foxon *et. al*, 2006) que esta cantidad favorece una mejor degradación anaerobia.

El inóculo previamente adaptado fue colocado en el fondo del reactor, en cada uno de los compartimientos, buscando tener la misma cantidad de lodos en cada uno de ellos. En el diagrama de Fisher de la figura 4.6, se puede observar que sí existe diferencia estadística significativa a diferentes tiempos de retención hidráulica.



**Figura 4.6** Análisis estadístico del porcentaje de remoción de DQO del reactor; tiempo de retención hidráulica.

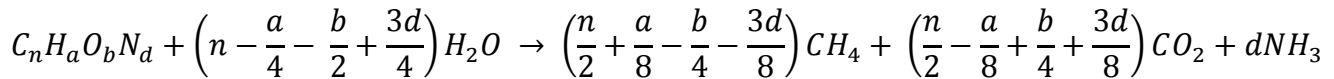
La temperatura del sistema en los tres tiempos de residencia hidráulica fue de  $33 \pm 2$  °C, lo cual indica que se mantuvo en un rango mesofílico que abarca de los 20° a 40°C (de Mes *et. al*, 2003).

Así también el pH juega un papel fundamental, ya que fuera del rango de 6.5 a 7.5 la producción de metano disminuye de manera significativa (de Mes *et. al*, 2003), en el caso del reactor el pH dentro del sistema fue de 6.9 a 7.2, se beneficia por la previa neutralización del sistema, logrando así llevar a cabo la degradación metanogénica de forma eficiente, recomendada previamente (Tacias, 2012). Además altas concentraciones de urea y proteínas dentro del agua residual, al ser degradadas producen amoníaco, lo cual eleva el pH a más de 8 (Angelidaki *et. al*, 1993; Gallert *et. al*, 1997). Al utilizar altas concentraciones de la misma (urea), esto producen una inhibición dentro de la degradación anaerobia, por lo tanto, controlar el pH dentro del sistema favoreció a una digestión anaerobia dirigida a la producción de metano, a partir de un pH 7.5 en condiciones mesofílicas como las presentadas dentro del reactor se lleva a cabo una inhibición de las bacterias metanogénicas, encargadas de la producción de metano.

Los microorganismos metanogénicos que son altamente sensibles a las altas concentraciones de amoníaco son: *Methanospirillum hungatei*, *Methanosarcina barkeri*, *Methanobacterium thermoautotrophicum*, and *Methanobacterium formicicum*. *Methanospirillum hungatei* es el más sensible (Chen *et. al*, 2007).

El aumento de pH demuestra una “intoxicación” dentro del sistema, a pesar de elevarse el pH y tener un sistema parcialmente inestable, existe aún producción de metano, pero en una cantidad menor considerable (Chen *et. al*, 2007). Mantener el sistema dentro del rango mesofílico, a pesar de tener una producción menor de gas metano, es mucho más estable dentro del sistema. Así también la pre adaptación de los microorganismos juega un papel fundamental, ya que muchas veces el sustrato (agua residual proveniente del beneficio húmedo del café) puede contener compuestos inhibidores, y los microorganismos deben de readaptarse a través de cambio internos. Una pre adaptación puede producir hasta 10 veces más metano utilizando el mismo sustrato (Chen *et. al*, 2007).

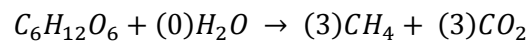
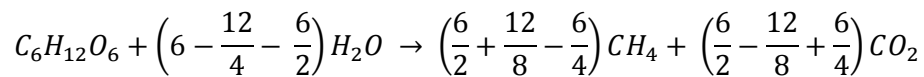
Además se puede cuantificar un aproximado de la producción de gas metano de acuerdo a la ecuación de Buswell conociendo uno de los sustratos principales contenidos dentro del agua residual proveniente del beneficio húmedo del café:



El principal componente presente dentro del agua residual proveniente del beneficio húmedo del café; es la celulosa (Murthy *et. al*, 2012, Pujol *et. al*, 2013), también contiene hemicelulosa, que es la estructura principal de las paredes celulares vegetales. La celulosa se encuentra presente en un 59.20% del total de los polisacáridos presentes en el agua residual. Con la fórmula general de la glucosa se puede hacer un balance aproximado de la cantidad de metano producido:

La carga orgánica inicial es de 48,963.35 mg/L, de este total el 24.7% pertenece a los polisacáridos (Pujol *et. al*, 2013); 12,093.95 mg/L, del cual el 62.94% está conformado por glucosa 7,611.93 mg/L. El peso molecular de la glucosa es de 180.1 g/mol, dando una concentración molar final de: 0.0423 mol/L de glucosa.

La ecuación quedaría de la siguiente forma:



Con el balance anterior, se tendría una producción aproximada de biogás al consumirse toda la glucosa de 0.1296 mol/L de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, que equivalen a una concentración de: 2.0736 g/L de CH<sub>4</sub> y 5.7024 CO<sub>2</sub> g/L, del cual la mayor parte de CO<sub>2</sub> se encuentra disuelto en el agua (Organización Internacional del café, 2005).

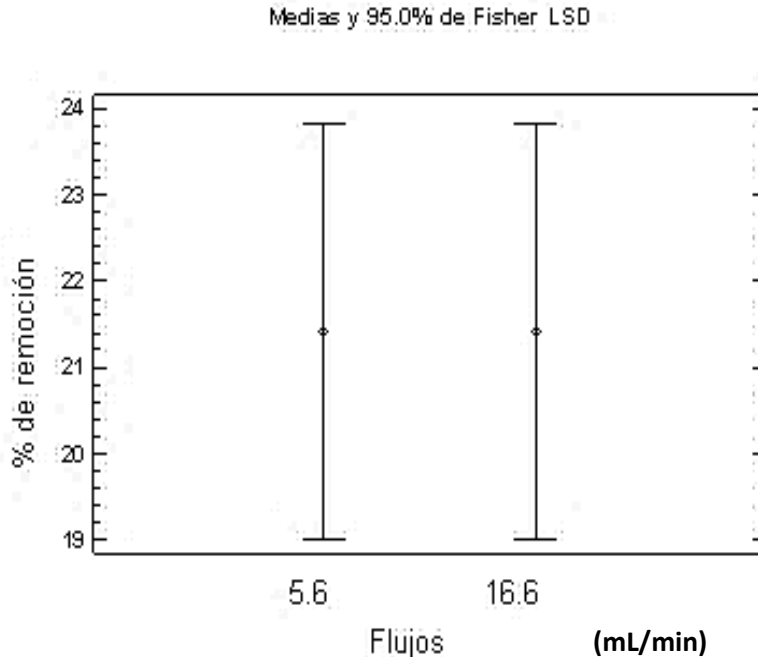
Para cuantificar de forma aproximada la cantidad real de biogás producido, se tendría que conocer cada una de las estructuras presentes dentro del agua

residual proveniente del beneficio húmedo del café, y posteriormente comparar con la cantidad de biogás real producido dentro del sistema.

El TRH dentro del sistema juega un factor primordial, los sistemas anaerobios han sido ampliamente estudiados teniendo como ventaja principal la tolerancia a los cambios bruscos en la carga orgánica, así como cambios en los flujos de alimentación, ya que la mayor parte de su metabolismo se enfoca en la producción de biogás y no en la reproducción biológica de los microorganismos Selvamurugan *et. al*, (2010), reportaron una remoción total del 61% de DQO en un reactor RAFA modificado, a un pH de 4.11, con un TRH de 18 horas. Es importante señalar que a 24 h de TRH, ellos mismos reportaron una remoción de DQO del 70%, teniendo una carga orgánica inicial de 8,480 mg/L, esta diferencia puede deberse a esta carga, ya que al ser 600 veces mayor el agua que se trabajó durante este proyecto, el tiempo requerido para degradar la alta concentración era mayor (36 h), el cual ha sido utilizado como el TRH dentro del sistema en continuo. El porcentaje de remoción con respecto al agua previamente neutralizada con bicarbonato de sodio a pH 5 fue de  $63.15 \pm 5.42$ .

#### 4.4 Remoción de DQO y sólidos dentro del filtro lento de arena modificado

Se evaluaron dos factores sobre la eficiencia del filtro, tales factores fueron: variación de flujo de alimentación y concentración de carbón activado. Para simplificar el análisis de los resultados se optó en primer lugar el evaluar la variación de flujos sobre una misma concentración de carbón activado. El porcentaje de carbón evaluado fue 15% y los flujos de alimentación que se probaron fueron 16.6 y 5.6 mL/min, obteniéndose como resultado una eficiencia de remoción del 21.42% para ambos flujos, siendo las desviaciones estándar del 4.51% y 5.12%, respectivamente. Los resultados fueron sometidos a un análisis estadístico, el cual puede observarse en la Figura 4.7.

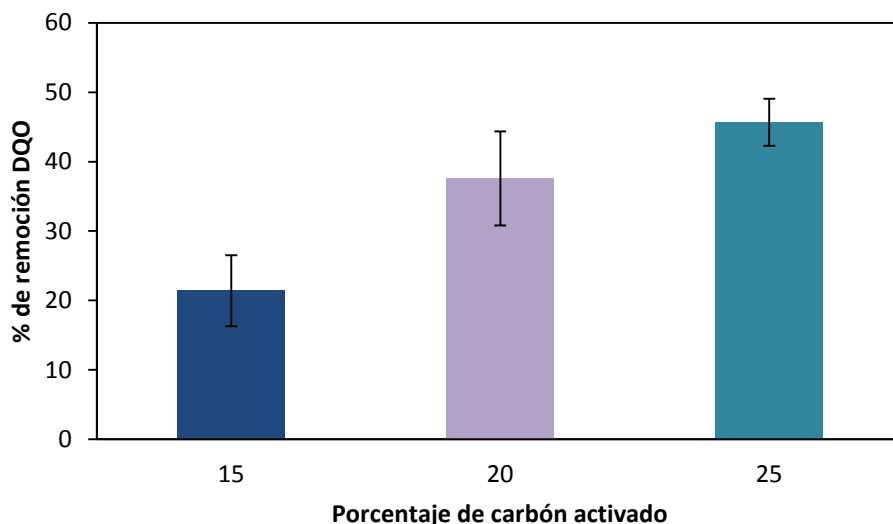


**Figura 4.7** Análisis estadístico del porcentaje de remoción de DQO para la concentración de 15% de carbón activado

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de DQO entre un nivel de flujo y otro, con un nivel del 95.0% de confianza. Esto quiere decir que el porcentaje de remoción de DQO no está en función del flujo, por lo que daría lo mismo elegir cualquiera de ellos y la remoción sería similar. Estos resultados concuerdan con Maldonado (2004) que señala que el empleo de tasas de filtración bajas no asegura y necesariamente, la producción de agua filtrada de mejor calidad y mayor volumen de agua producida por la filtración, la calidad del efluente es prácticamente la misma cuando el pretratamiento se realiza con eficiencia.

Debido a que se pretende obtener las mejores condiciones para llevar a cabo el diseño de un sistema de tratamiento continuo, y tomando en cuenta que la filtración es un tratamiento posterior a la digestión anaerobia, se deben considerar las condiciones óptimas a las que se operará el reactor anaerobio, por lo tanto, la elección se hizo en base al flujo de alimentación del reactor, el cual es de 5.6 mL/min.

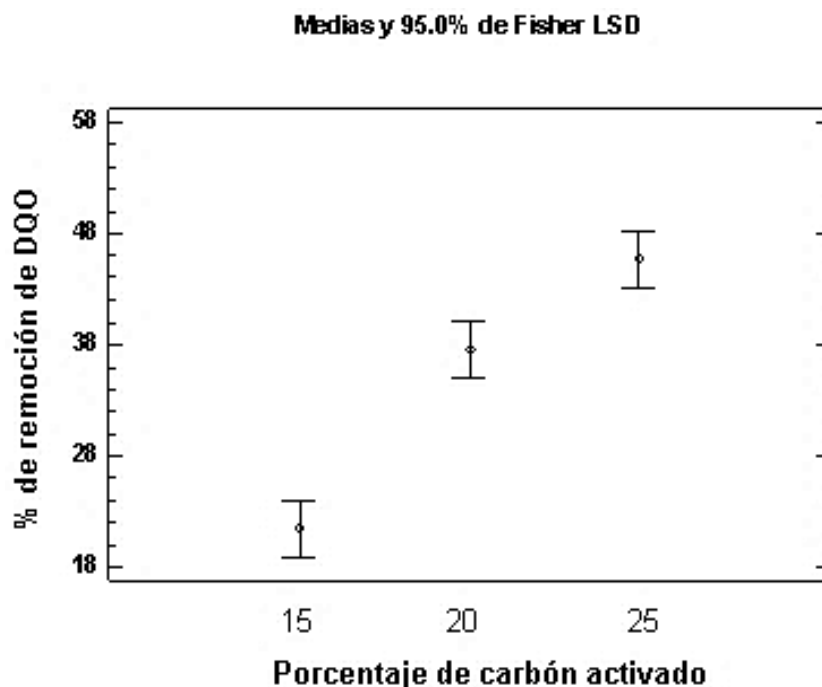
Una vez que se comprobó que el flujo no afecta la eficiencia del filtro, lo único que se varió fue la concentración del carbón activado a 20% y 25%. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.8.



**Figura 4.8** Porcentaje de remoción de DQO en el filtro variando cantidad de carbón activado

Los porcentajes de remoción de DQO que se obtuvieron fueron del  $21.42 \pm 5.12\%$ ,  $37.22 \pm 7.02\%$  y  $45.66 \pm 3.39\%$ , para 15%, 20% y 25% de carbón activado, respectivamente. Analizando la figura, es posible observar que las diferencias están muy bien definidas, ya que es evidente que al aumentar la cantidad de carbón activado la eficiencia fue mejor, a pesar de ello, fue necesario llevar a cabo un análisis estadístico con la finalidad de tener mayor certidumbre respecto a la elección de un porcentaje de carbón activado y poder determinar si existe o no alguna tendencia en los resultados.

Los resultados del análisis estadístico del porcentaje de remoción de DQO en función de la variación del carbón activado se presentan en la figura 4.9.



**Figura 4.9** Análisis estadístico del porcentaje de remoción de DQO en función del porcentaje volumétrico de carbón activado

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de DQO entre un nivel de cantidad de carbón activado y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

El análisis indicó que existe diferencia estadística significativa entre los tres niveles de carbón activado, esto quiere decir que se esperaría que al aumentar la cantidad de carbón activado se obtendría mayor remoción de DQO. Esto resulta un tanto lógico, ya que entre mayor cantidad de carbón mayor superficie de adsorción y por lo tanto mayor cantidad de sólidos se “pegan” en la superficie, esto se explica por acción de las fuerzas de Van der Waals, ya que los átomos situados en la parte exterior de la estructura cristalina del carbón activado, disponen de fuerzas de atracción libres, lo que les permite atraer compuestos existentes en su inmediato alrededor.

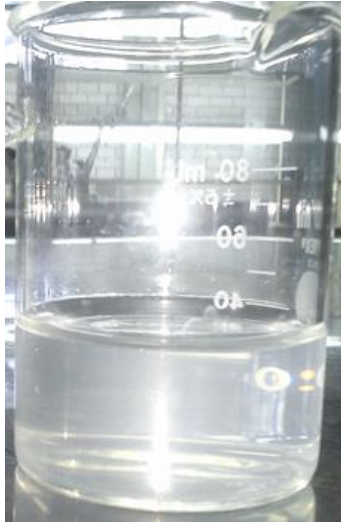


Existe una alta concentración de materia orgánica en el agua generada en el procesamiento del café tales como proteínas, azúcares y pectinas, por lo que la reducción la DQO implica que el carbón activado tiene la capacidad de adsorber estos compuestos, así lo reportó Devi (2010) llevó quien a cabo una investigación en la que probó la eficiencia del carbón activado comercial y el carbón activado hecho a base de semillas de aguacate para tratar este tipo de aguas residuales, obteniendo remociones de la DQO del 99.12%, y 98.28%, respectivamente, la razón de que la remoción no alcanzara altos porcentajes fue debido a que para una correcta adsorción se deben cumplir ciertos parámetros como el pH, agitación, carga inicial de contaminantes, cuestiones que no se cuidaron en esta investigación.

En lo referente a los sólidos suspendidos, se realizó la determinación únicamente a las muestras que mostraron mayor remoción de DQO, como ya se explicó anteriormente en la sección 7.3. El porcentaje de remoción obtenido para el flujo de 5.6 mL/min y 25% de carbón activado fue del  $33.9 \pm 37.8\%$  con respecto al agua de salida del sedimentador, quedando con un valor en SST de aproximadamente 125 mg/L.

Como se puede observar la desviación estándar es alta, esto puede deberse a que la remoción está relacionada con el grado de empaquetamiento de las camas, y no se puede asegurar el mismo en todas las corridas, puesto que en la primera se obtuvo un valor de 94 mg/L, en la segunda 207 mg/L y finalmente 74 mg/L; es evidente que en la segunda corrida la remoción fue menor debido al empaquetamiento y como consecuencia a ello el carbón activado se lavó un poco, afectando así el valor.

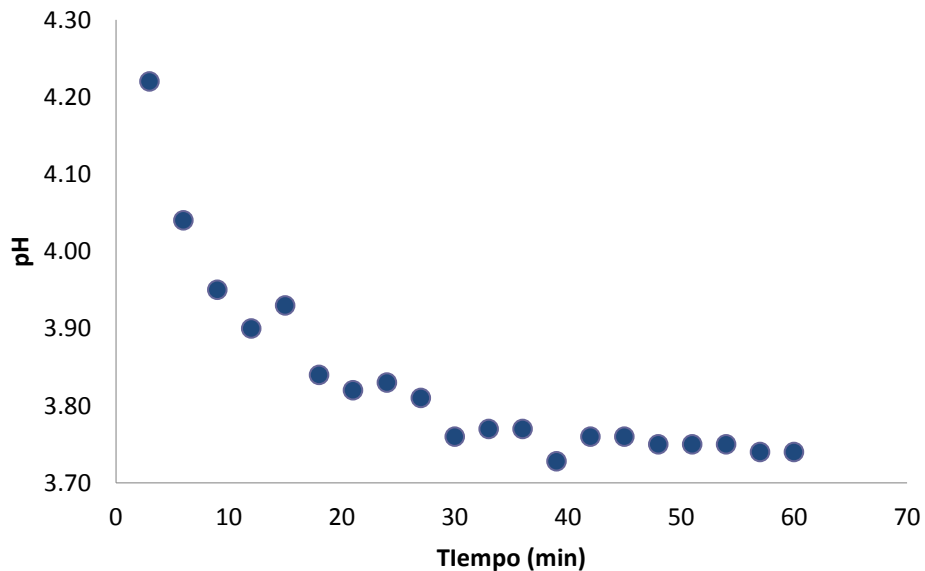
Como observaciones importantes, cabe señalar que existió una reducción importante en la coloración del agua, ya que pasó de ser un color café oscuro a un color casi transparente, dicha coloración es dada por la presencia de flavonoides, esto significa que estos compuestos se adsorbieron sobre el carbón activado, no obstante, esto no implica una reducción importante en la DQO (von Enden *et. al*, 2004), además de esto, también existió una reducción importante en el mal olor, ya que el agua de entrada al filtro proviene del tratamiento mediante digestión anaerobia y su olor es característico de este proceso. Las características visuales se presentan en la Figura 4.10.



**Figura 4.10** Agua de salida del filtro

#### 4.4.1 Neutralización del pH de las aguas residuales del beneficio húmedo del café

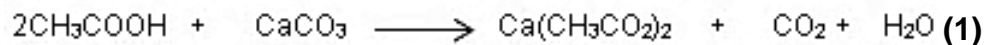
Al inicio de diseño del filtro se había planteado emplear concentraciones más altas de carbón activado, esto con la finalidad de elevar el pH de las aguas residuales, para lo cual se llevó a cabo un ensayo para conocer si únicamente con el uso del carbón activado era suficiente para que el pH se mantuviera cercano a la neutralidad y de esta manera pasara directamente a la digestión anaerobia. Los resultados se presentan en la Figura 4.11.



**Figura 4.11** Variación del pH de las ARBHC a diferentes tiempos con carbón activado

Como se puede observar, el ensayo nos señala que el ácido acético, que es el que principalmente le confiere a este tipo de aguas residuales su naturaleza ácida, al inicio se adsorbió sobre el carbón activado permitiendo que elevara el pH, no obstante, en un tiempo muy corto los centros de adsorción se saturaron por lo cual no fue posible que el ácido se siguiera adsorbiendo y como consecuencia el pH regresó a su valor inicial manteniéndose constante a partir del minuto 30. Estos resultados nos indican principalmente que existe poca afinidad entre el carbón activado y el ácido acético, y finalmente que se requeriría una gran cantidad de carbón activado para lograr elevar el valor de pH, haciendo de esta manera que se eleve el costo del proceso de tratamiento.

De estos resultados surgió la necesidad de buscar una alternativa que no requiriera de costos adicionales, para lo cual se eligió emplear las conchas de ostión ya que en su mayoría están constituidas de carbonato de calcio (Gil-Lim *et al.*, 2003), el cual da lugar a la amortiguación automática, ya que al reaccionar el carbonato de calcio con el ácido acético lo convierte en acetato de calcio elevando el pH de 3.8 a 6; la reacción que se lleva a cabo es la siguiente:



Acido acético + Carbonato de calcio  $\rightarrow$  Acetato de calcio + Dióxido de carbono + Agua

El diseño del sistema de neutralización se llevó cabo como si se tratara de un filtro, esto debido el uso de conchas de ostión no es un proceso común y por lo tanto no existen ecuaciones referentes a su dimensionamiento. Mediante ensayos se determinó que el tiempo apropiado para alcanzar un pH de 5 es de alrededor de 15 min, de lo contrario se alcanzan valores de alrededor de 6.5, que no es apropiado ya que después de la digestión anaerobia el agua sale con un pH de alrededor de 8.

El sistema de neutralización eleva el pH del agua de 3.8 a  $5.16 \pm 0.24$ . Cabe mencionar que el sistema de neutralización es posterior a la sedimentación, ya que se observó que luego de la sedimentación el agua tenía un pH ácido, lo cual nos señala que los compuestos ácidos se encuentran de forma disuelta.

La porosidad de las conchas es de un 54.99%, mientras que el carbón activado granular presenta una porosidad del 85% de acuerdo a Devi (2010). A pesar de ser una porosidad menor, es suficiente para permitir el paso del líquido a través de las conchas, lo cual, por medio del arrastre, lava el  $\text{CaCO}_3$  llevando a cabo la neutralización. En la Figura 4.12 se observa el proceso de neutralización (Triturada).



**Figura 4.12** Neutralización del ARBHC (triturada)

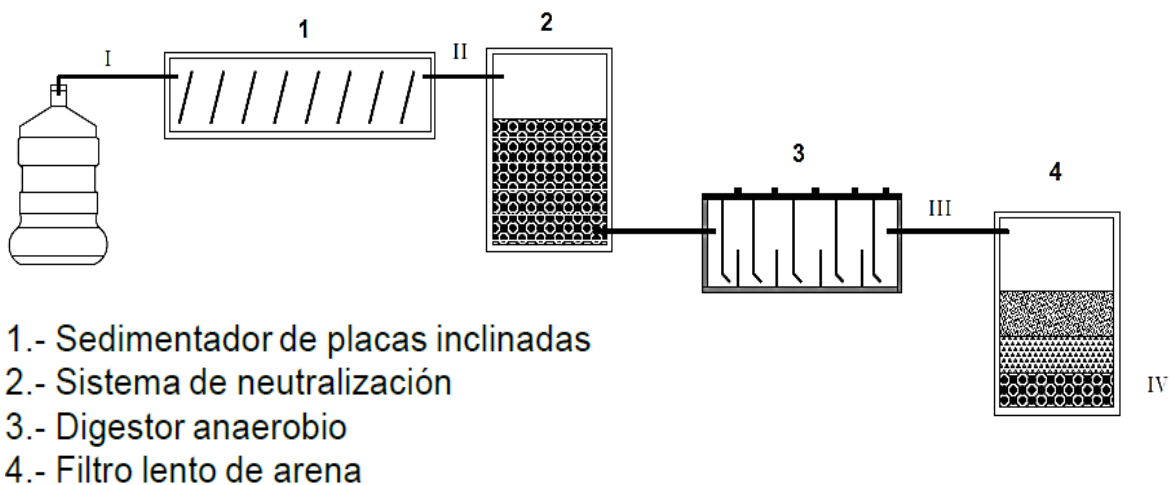
#### 4.5 Sistema continuo

Una vez que se determinaron las mejores condiciones a las que cada operación unitaria lograba una mayor remoción se llevó a cabo la implementación del sistema continuo, dadas en la Tabla 4.1. Las condiciones de operación se presentan en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.1** Condiciones de operación en sistema continuo

Sistema	Parámetro de operación
	10 Horas de TRH
<b>Sedimentador</b>	60° de inclinación de placas con 10 cm de separación entre ellas
<b>Neutralización</b>	Diámetro promedio de entre 1.5-2 cm
<b>Reactor anaerobio</b>	36 horas de TRH
<b>Filtro lento de arena modificado</b>	25% de carbón activado

El sistema continuo operó con un flujo de 5.6 mL/min con 1% de pendiente para asegurar el flujo continuo dentro del sistema, esto con el fin de aprovechar la gravedad. El esquema del sistema en continuo se presenta en la Figura 4.13.



**Figura 4.13** Sistema continuo para tratamiento de las ARBHC

El porcentaje de remoción de la DQO en este proceso fue del 88.11%, 94% en SST y 81% de ST, esto significa que, si bien es cierto que aún no se cumplen con las normas de descargas de aguas residuales, existió una remoción importante de los contaminantes. La contaminación remanente se encuentra en su mayoría como sólidos disueltos. Cabe señalar que la operación que más contribuyó a la remoción de la DQO fue la digestión anaerobia, ya que el hecho de neutralizar las aguas residuales contribuyó a su eficiencia puesto que de esta manera se evitó la inhibición de las bacterias metanogénicas. Las características del efluente se presentan en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.2** Características fisicoquímicas del efluente

<b>Parámetro</b>	<b>Concentración</b>
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)</b>	5,820.84 ± 742.83
<b>Sólidos sedimentables (mL/L)</b>	22.5 ± 10
<b>Sólidos Totales (mg/L)</b>	969.44 ± 124.95
<b>Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)</b>	91.12 ± 31.58
<b>Sólidos Disueltos Totales (mg/L)</b>	878.32 ± 192.04
<b>pH</b>	7.32 ± 0.21
<b>Turbidez</b>	0.34 ± 0.26

El sistema a pesar de ser eficiente, requiere ser acoplado a otro tipo de sistema que pueda remover esta carga orgánica remanente para poder ser descargada a un efluente receptor o ser reutilizada como lo marca la NOM-003-SEMARNAT-1997.

#### 4.5.1 Comparación con otros sistemas de tratamiento de agua residual proveniente del beneficio húmedo del café.

El procedimiento completo de agua residual proveniente del beneficio húmedo del café tiene un porcentaje total de remoción de 88.11% de DQO, con un sistema de sedimentación con placas inclinadas, implementando el sistema de neutralización con conchas de ostiones, reactor anaerobio con placas horizontales, filtro lento de arena modificado, puede compararse con otros sistemas reportados por diversos autores (Tabla 4.5).

**Tabla 4.5** Sistemas reportados por autores de sistemas de tratamiento de agua residual proveniente del beneficio húmedo del café.

<b>AUTOR</b>	<b>% DE REMOCIÓN DQO</b>	<b>TIPO DE SISTEMA</b>
<b>Sotolongo <i>et. al</i>, 2000</b>	<b>90</b>	<b>Sedimentador-reactor de flujo ascendente</b>
<b>Orozco, 2003</b>	<b>80</b>	<b>Reactor flujo ascendente (UAF)</b>
<b>Murthy <i>et. al</i>, 2004</b>	<b>85 (DBO<sub>5</sub>)</b>	<b>tanque de neutralización, digestión, recirculación y sedimentación</b>
<b>von Enden <i>et. al</i>, 2004</b>	<b>90</b>	<b>Tanque acidificación-neutralización-reactor RAFA</b>
<b>Orozco <i>et. al</i>, 2005</b>	<b>94 – 99</b>	<b>Sedimentación- tanque de amortiguamiento- reactores secuenciales por lotes (SBR)</b>
<b>Schtgens, 2010</b>	<b>83.63</b>	<b>Sistema neutralizador, laguna anaerobia, laguna facultativa y biofiltro.</b>
<b>Selvamurugan <i>et. al</i>, 2010</b>	<b>97</b>	<b>Sistema anaerobio y aerobio acopado</b>
<b>Tacias, 2012</b>	<b>70</b>	<b>Sedimentador-reactor flujo piston-Filtro-membrana</b>

Los sistemas de tratamiento por encima del 90% son sistemas sumamente eficientes, aunque los costos de operación para llevarse a cabo a escala serían muy elevados, principalmente por el requerimiento de sistemas de bombeo.

El sistema propuesto cumple con las características de bajo costo de instalación y operación, ya que se aprovechan productos normalmente considerados de desecho así como un sistema a gravedad que es altamente viable en las zonas cafeticultoras del Estado de Chiapas, por la ubicación de los cultivos a lo largo de las sierras, en las zonas medias y altas, por lo tanto reduciría en gran medida los costos operativos, aunado al uso de un sistema que no requiere inyección de aire al sistema, y los residuos generados podrían ser reutilizados dando un valor agregado al producto y cumpliendo con los requerimientos de un proceso orgánico y amigable con el medio ambiente.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

- Se tomó como base de diseño el sistema propuesto por Tacias, no obstante el sistema desarrollado mostró mayor eficiencia puesto que removió el 88.11% de DQO considerando además un agua residual con mayor DQO inicial, y mayor eficacia puesto que se requirió menor tiempo para tratamiento.
- Se construyó y diseño un sedimentador, cuyo desempeño, debido a la naturaleza misma de los sólidos, presenta una remoción de 43% de DQO a 60° de inclinación de las placas y 10 cm. de separación entre ellas, a un TRH de 10 h.
- Se diseñó y construyó un sistema de neutralización con caparzones de ostión triturado, elevando el pH del agua residual de 3.8 a 5.16.
- Se diseñó y construyó un reactor anaerobio de placas horizontales de flujo pistón, usando el inóculo previamente adaptado, teniendo un 60% de remoción de DQO con un TRH de 36 h.
- Se diseñó y construyó un filtro lento de arena modificado, que remueve un 40% de DQO a un flujo de 5.6 mL/min y 25% volumen de carbón activado.
- Los materiales utilizados en la construcción cumplieron con los requisitos de no reaccionar con el agua a tratar, fueron resistentes y económicos.
- De los 3 TRH utilizados para el sedimentador el mejor fue el de 10 horas
- Se establecieron las condiciones de operación del sistema en continuo: sedimentador operando a 60° de inclinación de las placas y 10 cm. de separación entre ellas, a un TRH de 10 h, conectado a un sistema de neutralización con caparzones de ostión triturado, seguido de un reactor anaerobio de placas horizontales de flujo pistón operando a 36h. de TRH., posteriormente un filtro lento de arena modificado con un 25% volumen de carbón activado, operando todo el sistema a un flujo de 5.6 mL/min.



## CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES

- Rediseñar el sistema de manera que haya más filtros en proceso, una configuración adecuada puede ser conectados en serie, ya que de esta manera se evita el mantenimiento constante.
- Emplear diferentes materiales de construcción de las placas, así como el efecto que se obtiene con placas corrugadas
- Es importante neutralizar las aguas residuales del beneficio húmedo del café para propiciar las condiciones óptimas para que se lleve a cabo la digestión anaerobia
- Es importante adaptar un inóculo que sea capaz de trabajar con altas concentraciones de carga orgánica.
- Probar la filtración con carbón activado granulado para conocer si de esa manera se facilita más la operación
- Cuantificar ácidos grasos volátiles durante la degradación anaerobia ya que la acumulación de estos puede ser una causa del fracaso de este sistema

## CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bello Mendoza, R., Castillo Rivera, M., 1998. Start-up of an anaerobic hybrid UASB filter reactor treating wastewater from a coffee processing plant. *J. Anaerobe Environ Microbiol.* 4, 219-225.
2. Bello, R., Calvo, L.A., Sánchez J.E., Lau, G. y Cuevas, R., (1993) diagnóstico de la contaminación en las aguas residuales de los beneficios húmedos de café en el soconusco, Chiapas, México. XVI Congr. Lat. Cafecultura. 27-29 octubre CONCAFE-PROMECAFE-IICA, Managua, Nicaragua. Pp.123
3. Braham JE, Bressani R. Pulpa de Café: Composición Tecnología y Utilización. Centro
4. Brezan F, Estrada-Jarquin R. Pulpa de café, Composición Química y Contenido de Aminoácidos de la proteína de la pulpa. Turrialba (costa Rica) 1972; 22: 299-304.
5. Cervantes S.M., (1998) citado por Rodolfo Valadez, "Nuevas tendencias de producción en beneficios cafetaleros"; en El café de México, una producción de altura; Confederación Mexicana de Productores de Café. Pp. 13.
6. Chacón Lázaro E. Director de COMCAFE, 2010.-Comunicación Personal.
7. Cheng, L., Bi, X., Liu, C., Qi, Y., & Zhu, W. (2009). Oilfield Produced Water Treatment by Combination of Coarse Graining and Inclined Plates Sedimentation. International Conference on Energy and Environment Technology (pp. 637-640). IEEE Computer Society
8. Crites, R., Tchobanoglous, G., (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Mc Graw Hill.
9. De Mes, T., Stams, A., Reith, J., & Zeeman, G. (2003). Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. In J. Reith, R. Wijffels, & H. Barten, Bio-methane & Bio-hydrogen (pp. 58-102). Petten, Holanda: New Energy Conversion Systems and Technologies.

10. Devi R. (2010). Innovative technology of COD and BOD reduction from coffee processing wastewater using avocado seed carbon (ASC). *Water Air Soil Pollut* 207, 299–306
11. Foxon K., Buckley C., Brouckaert C., Dama P., Mtembu Z., Rodda N., Smith M., Pillay S., Arjun N., Lalbahadur T. y Bux F. (2006). *Evaluation of the Anaerobic Baffled Reactor for Dense Peri-Urban Settlements*. WRC Report No. 1248/1/06, pp. 1-224.
12. Elías GL. Composición química de la pulpa y otros productos: Pulpa de café, composición, Tecnología y Utilización. Bogotá, Colombia. Editorial CIDD. 1972; p.24.
13. Gil-Lim Y., Byung-Tak K., Baek-Oon K., y Sang-Hun H. (2002). Chemical–mechanical characteristics of crushed oyster-shell. *Waste Management* 23, 825–834.
14. Gavrilescu, M. (2002). Engineering concerns and new developments in anaerobic waste-water treatment. *Clean Technology Environmental Policy* , 346-362.
15. Haddis, A., Devi, R., 2008. Effect of effluent generated from coffee processing plant on the water bodies and human health in its vicinity. *Journal of Hazardous Materials* 152, 259-262.
16. Hernández, J; Hidalgo, G. (2000). Evaluación de 3 metodologías para reducir los niveles de Contaminantes en efluentes de tratamiento primario de las aguas residuales del procesamiento de café en costa rica. Trabajo de Graduación. Universidad EARTH. Guácimo, Costa Rica. Pp. 85.
17. Kennedy, K., & Barriault, M. (2007, Enero). Treatment kinetics of aircraft deicing fluid in an anaerobic baffled reactor. *Environmental Engineering and Science* , 11-17.
18. Kubesch Piñol, M., Bateman Pinzón, A., & Mujal, A. (2009). Plan de manejo/auto gestión de captación y distribución por gravedad de agua para uso doméstico en San Luis (Salta-Argentina). Barcelona: Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos.

19. McCarty, P. L. (1964). *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals*. Stanford University, Sanitary Engineering. Stanford: Public Works.
20. Maldonado, V. CDAM, (2004). *Sedimentación* (0000012). Recuperado de sitio web Centro de documentación ambiental: <http://cdam.minam.gob.pe:8080/handle/123456789/109>
21. Neves, L., Oliveira, R., Alves, M., 2006. Anaerobic co-digestion of coffee waste and sewage sludge. *Waste Management* 26, 176-181.
22. Orozco, C., Barrientos, H., Lopezlena, A., Cruz, J., Selvas, C., Osorio, El., Osorio, Ed., 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. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 5: 123-131.
23. Ortega, M.T., Creación de un beneficio de café, en la congregación de El Tronconal, Ver., para comercializarlo en café pergamino, Colección Parcela Digital, 2010.
24. Pujol R, Zamora L, Sanarrusia M, Bonilla F. Estudio de Impacto Ambiental del Cultivo y Procesamiento del Café. Programa de desarrollo urbano sostenible. Sistema Nacional para el Desarrollo sostenible. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 1998; p.20.
25. Rodríguez Fernández, Antonio; Letón García, Pedro; Rosal García, Roberto; Dorado Valiño, Miriam; Villar Fernández, Susana y Sanz García, Juana. (2006). Informe de vigilancia: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Fundación para el conocimiento Madrid CEIM. 137 pp.
26. Schultz, Thomas E. (2005) *Biological Wastewater Treatment*. Chemical Week Associates. Waukesha, WI.
27. Selvamurugan, M., Doraisamy, P., y Nandakumar, N. (2010). High Rate Anaerobic Treatment of coffee Processing Wastewater Using Upflow Anaerobic Hybrid Reactor. *Journal Environ. Health. Sci. Eng.*, 7(2) 129-136.

28. Tesis de Maestría en Ciencias de Ingeniería Bioquímica; (Tacias, 2012). Diseño y construcción de un reactor de flujo pistón acoplado a membrana para tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
29. von Enden, J. C., & Calvert, K. C. (2004). Review of coffee waste water characteristics and approaches to treatment. *Economic and Political Weekly*, 1-10.
30. Van Lier, J.B. *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. Edited by M. Henze, M.C.M. van Loosdrecht, G.A. Ekama and D. Brdjanovic. IWA Publishing, London, United Kingdom. 2008
31. Yaksic, R., & Ramírez, R. (2005). *Waste Treatment System for the COPACABANA Coffee Plant*. Bolivia: Economic Opportunities Office.
32. NMX-AA-003-1980. Que establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas, debiéndose observar las modalidades indicadas en las normas de métodos de prueba correspondientes. Publicada en el diario oficial de la federación el 25 de marzo de 1980.
33. NMX-AA-004-SCFI-2000. Que establece el método de prueba para la determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Publicada en el diario oficial de la federación el 18 de diciembre del 2000.
34. NMX-AA-005-SCFI-2000. Que establece un método de análisis para la determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Publicada en el diario oficial de la federación el 18 de diciembre del 2000.
35. NMX-AA-008-SCFI-2000. Que establece el método de prueba para determinar pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
36. NMX-AA-028-SCFI-2001. Que establece el método de análisis para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Publicada en el diario oficial de la federación el 6 de julio del 2001.

- 37.NMX-AA-030-SCFI-2001. Que especifica dos métodos para la determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- 38.NMX-AA-034-SCFI-2001. Que establece el método de análisis para la determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de agosto de 2001.
- 39.NOM-CCA-027-ECOL/1993. Que establece los límites máximos permisibles de los contaminantes de las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria del beneficio del café. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de octubre de 1993.