

**OPERACIÓN DE UN FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA)  
HASTA ALCANZAR EL ESTADO ESTABLE**



**LINA MARCELA PARRA RODRIGUEZ**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
INGENIERIA QUIMICA  
NOVIEMBRE, 2006**

**OPERACIÓN DE UN FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA)  
HASTA ALCANZAR EL ESTADO ESTABLE**

**LINA MARCELA PARRA RODRIGUEZ**

**Impr81@gmail.com**

**Cel: 3112195169 - 3004756724**

**Trabajo de Grado para optar el título de  
Ingeniera Química**

**Línea de Profundización en Ingeniería Ambiental**

**Director**

**GONZALO MORANTE GARCIA**

**Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

**SEDE MANIZALES**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**INGENIERIA QUIMICA**

**NOVIEMBRE, 2006**

## TABLA DE CONTENIDO

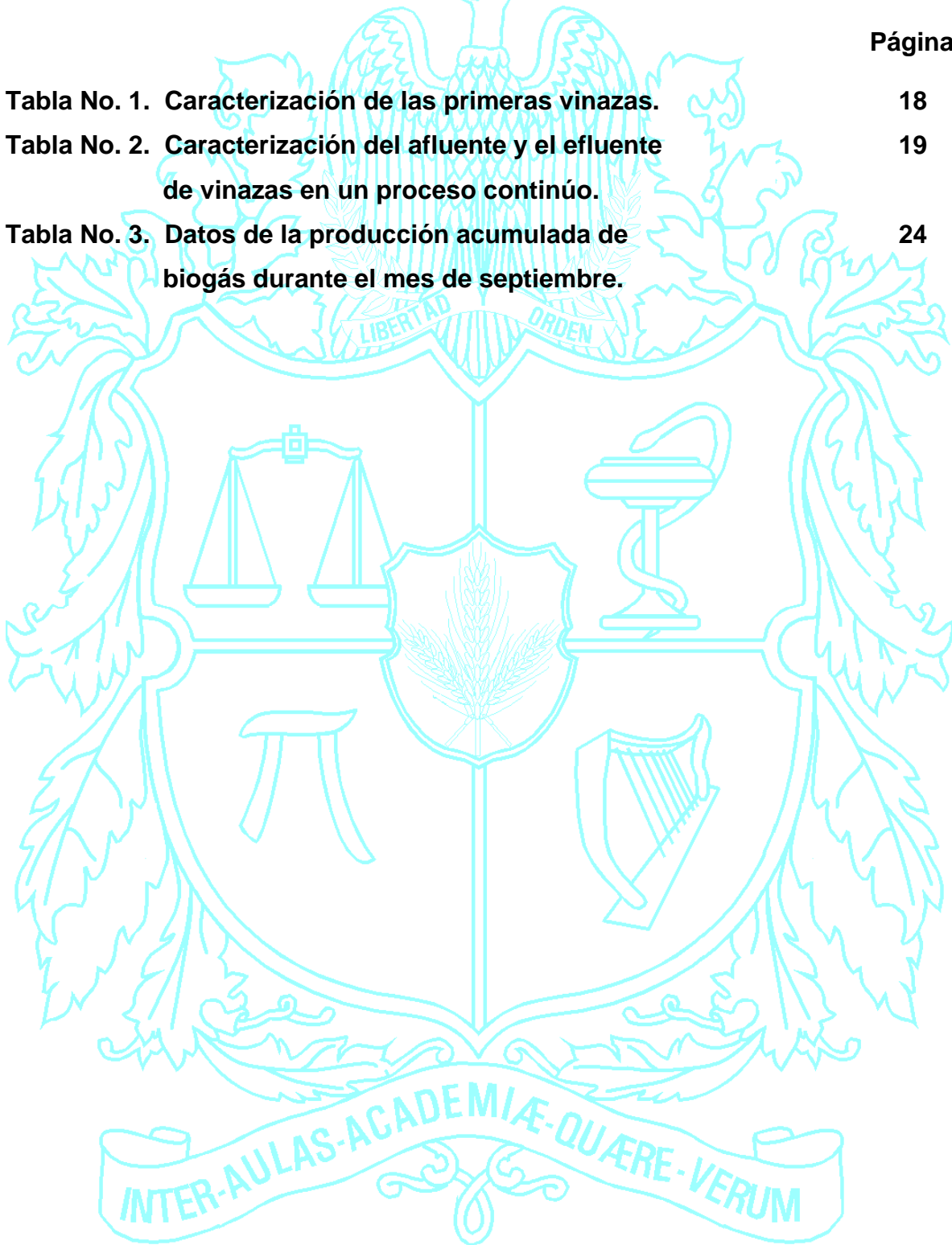
	Página
1. INTRODUCCION.	1
2. RESUMEN.	2
3. GENERALIDADES DEL PROCESO.	4
4. GENERALIDADES DE LOS FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA).	6
4.1 Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).	7
4.2 Carga Orgánica Volumétrica.	7
4.3 Medio de Soporte.	8
4.4 Temperatura, pH y Nutrientes.	9
5. DESCRIPCIÓN DEL FILTRO.	10
5.1 Zona de Entrada.	11
5.2 Zona Empacada.	11
5.3 Zona de Salida.	12
5.4 Sistema de Recolección de Gases.	12
6. METODOLOGÍA.	14
6.1 Recolección de las muestras.	14
6.2 Caracterización del Afluente.	15
6.2.1 Proceso en Recirculación.	15
6.2.2 Proceso en Continúo.	15
6.2.3 Estado Estable.	16
6.3 producción del Biogás.	17

	Página
<b>7. ANALISIS Y RESULTADOS.</b>	<b>18</b>
<b>8. CONCLUSIONES.</b>	<b>28</b>
<b>9. RECOMENDACIONES.</b>	<b>30</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>32</b>



## LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla No. 1. Caracterización de las primeras vinazas.	18
Tabla No. 2. Caracterización del afluente y el efluente de vinazas en un proceso continuo.	19
Tabla No. 3. Datos de la producción acumulada de biogás durante el mes de septiembre.	24



## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>Figura No. 1. Características del proceso de Digestión Anaerobia.</b>	<b>5</b>
<b>Figura No. 2. Montaje del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente Evaluado.</b>	<b>10</b>
<b>Figura No. 3. Medio de Soporte (Vasos de Polietileno).</b>	<b>12</b>
<b>Figura No. 4. Sistema de Recolección de Gases.</b>	<b>13</b>
<b>Figura No. 5. Recolección de las muestras en las marmitas.</b>	<b>14</b>



INTER-AULAS-ACADEMIÆ-QUÆRE-VERUM

## LISTA DE GRAFICOS

	Página
<b>Gráfico No. 1. Descripción del comportamiento de la DQO en la entrada y en la salida del reactor a través del tiempo (semanas).</b>	<b>20</b>
<b>Grafico No. 2. Descripción del porcentaje de remoción para la DQO en todo el proceso a través del tiempo (semanas).</b>	<b>21</b>
<b>Grafico No. 3. Descripción del comportamiento de la DBO<sub>5</sub> en la entrada y en la salida del reactor a través del tiempo (semanas).</b>	<b>22</b>
<b>Grafico No. 4. Descripción del porcentaje de remoción para la DBO<sub>5</sub> en todo el proceso a través del tiempo (semanas).</b>	<b>23</b>
<b>Grafico No. 5. Producción de metano acumulado a través del tiempo.</b>	<b>25</b>
<b>Grafico No. 6. Comportamiento de la producción de metano acumulado con el porcentaje de remoción de la carga orgánica contaminante.</b>	<b>26</b>
<b>Grafico No.7. Producción de Metano en el proceso de flujo continuo</b>	<b>26</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Es importante implementar una planta de tratamiento y/o reutilizar cada uno de los residuos domésticos e industriales líquidos que salen de cualquier proceso, antes de verterlos al desagüe. Por eso la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, intenta disminuir el grado de contaminación de las aguas residuales utilizando un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) para el tratamiento de las vinazas originadas en el proceso de la fermentación alcohólica en el laboratorio.

El objetivo principal del presente trabajo es la operación de un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) hasta alcanzar su estado estable, y determinar las variables de operación. Dicho objetivo se logró debido al seguimiento que se le hizo a algunos parámetros como la caracterización del afluente y el efluente, la definición de rangos de caudal y tiempo de residencia para la operación más eficiente, la determinación de la masa orgánica máxima admisible con sus respectivas eficiencias y por último la determinación de la producción de biogás durante el proceso. Cada uno de los anteriores parámetros constituye los objetivos específicos para el desarrollo del proyecto y son de vital importancia para la evaluación de cualquier otro tipo de filtro anaerobio y para poder encontrar la eficiencia del reactor.

Este es un proceso con muy buenas alternativas, pues se obtuvieron resultados favorables en cuanto a la eficiencia del filtro; ya que a pesar de que se trataba de aguas residuales tan contaminantes como lo son las vinazas, su porcentaje de remoción para la DQO fue del 46%.



## 2. RESUMEN

En el presente proyecto se va a desarrollar y a evaluar la puesta en marcha y el comportamiento del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente, hasta alcanzar su estado estable, en el tratamiento de las vinazas del Laboratorio de Procesos Productivos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

El reactor se puso en marcha con vinazas producidas en el proceso de fermentación-destilación. Dichas vinazas se hacen pasar a través del filtro con el único fin de disminuir su carga contaminante y poderlas verter al desagüe.

Se evaluaron periódicamente las siguientes propiedades físicas y químicas de las vinazas para encontrar el mayor rendimiento del reactor; propiedades como la  $DQO_{Total}$  y  $DBO_5$  para poder hallar el porcentaje de remoción del medio de soporte del filtro.

El filtro anaerobio de flujo ascendente se operó durante un periodo de 16 semanas. En las primeras cinco semanas se trató con un flujo en recirculación, y en las siguientes once semanas se alimentaba diariamente el reactor con un flujo continuo.

El estado estable fue alcanzado en las dos últimas semanas. En esa etapa se alcanzó a tener porcentajes de  $DQO$  y de  $DBO_5$  de 45.63% y 35.42% respectivamente.

El desprendimiento del biogás es una medida de la descomposición de la materia orgánica; por lo tanto para la medición del metano se utilizó un dispositivo que desplazaba un volumen de una solución de NaOH 3M. Este volumen solo equivale a la producción del metano debido a que los demás gases como el

dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y el nitrógeno (N) son absorbidos por dicha solución. Los valores de la producción del metano pueden ser observados en el Gráfico No.5. Se producían alrededor de 17.21 litros de  $\text{CH}_4$  por día.



### 3. GENERALIDADES DEL PROCESO

El objetivo principal de cualquier tratamiento biológico de aguas residuales es descomponer los compuestos orgánicos contenidos en estas. Es decir, reducir la concentración de contaminantes orgánicos en una corriente de aguas residuales, en este caso las vinazas, por debajo de un valor especificado, el cual es fijado por las normas ambientales y de seguridad. Este objetivo es cumplido, por ejemplo, manipulando la velocidad de dilución de la corriente que entra al proceso del bioreactor. Esto equivale a manipular el caudal de la corriente de entrada. La cantidad de materia orgánica que se puede descomponer en un agua residual se cuantifica por medio de su DQO (demanda química de oxígeno), ya que esta determina la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica que se descompone hacia biogás, es decir,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  [Méndez, 2005].

Los procesos de digestión anaerobia son utilizados para el tratamiento de aguas residuales, donde una corriente contaminada de aguas residuales con una alta carga orgánica es procesada por unas bacterias que se alimentan de estos componentes orgánicos, en ausencia de oxígeno. De esta forma producen biogás, que se compone principalmente de  $\text{CO}_2$  y metano [Estaben, 1997]. Se produce también lodos residuales, que consta de subproductos orgánicos y biomasa. El resultado más importante, es que se obtiene una corriente de agua con menos contaminación orgánica. Las ventajas de la digestión anaerobia son la alta eficiencia en la purificación, estimada en un 80 por ciento de remoción de la DQO, la baja producción de lodos [Méndez, 2005], y el bajo consumo de energía, si se le compara con la digestión aerobia [Bernard, 2001]. La desventaja principal radica en la fácil desestabilización, en la cual puede llegar a la condición de lavado. En este punto hay desaparición de la biomasa, de forma que debe realizarse una inoculación de las bacterias nuevamente.



#### 4. GENERALIDADES DE LOS FILTROS ANAEROBIOS CON FLUJO ASCENDENTE (FAFA)

En los filtros anaerobios de flujo ascendente, se puede decir que el contacto entre las vinazas y los microorganismos que se encargarán de reducir su carga contaminante, se realiza así. Las vinazas se alimentan al reactor a través de un falso fondo por donde el flujo se distribuye uniformemente. Luego las vinazas a tratar se hacen pasar sobre o a través de una masa de sólidos biológicos suspendidos (o cerca al estado coloidal), contenidos dentro del sistema por un medio fijo de soporte. Los microorganismos se adhieren a la superficie del medio en forma de fina biopelícula, o bien se agrupan en forma de una masa de lodo floculado o granulado dentro de los intersticios del medio. La materia orgánica soluble que pasa a través del filtro, se difunde dentro de las superficies de los sólidos adheridos o floculados, donde se realiza el proceso de degradación anaerobia [Young, 1991]. De acuerdo a la anterior descripción se puede inferir que los filtros anaerobios pueden considerarse alternativamente como reactores de cultivo fijo o en suspensión.

*Factores que afectan el rendimiento y el diseño de filtros anaerobios de flujo ascendente*

La eficiencia de remoción de carga contaminante en un sistema de tratamiento de aguas residuales viene dada por:

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

E: Eficiencia de remoción del sistema [%]

S: Carga contaminante de salida [mg DQO, DBO<sub>5</sub> o SST/l]

S<sub>0</sub>: Carga contaminante de entrada [mg DQO, DBO<sub>5</sub> o SST/l]

Muchos son los factores que afectan las eficiencias de remoción de carga contaminante en este tipo de tratamiento, ya que la anaerobiosis es un proceso complejo sobre cuya naturaleza constantemente se hacen nuevos descubrimientos y se revalúan teorías. Entre estos factores podemos contar [Young, 1991]:

- El Tiempo de Residencia Hidráulico (TRH).
- El medio de soporte (área superficial, porosidad, altura del lecho).
- Configuración de los reactores.
- Temperatura, Ph y de nutrientes.

#### 4.1 Tiempo de Residencia Hidráulico.

El tiempo de residencia hidráulico, parece ser el principal factor que influye en el rendimiento de los filtros anaerobios de flujo ascendente. Tiempos de retención altos favorecen el contacto íntimo tanto de la película como del floc granular suspendido con las vinazas, lo que se refleja en una mayor producción de microorganismo y una mayor eficiencia de remoción de contaminantes [Young, 1991].

#### 4.2 Carga Orgánica Volumétrica.

La carga orgánica volumétrica se define como:

$$L = \frac{S_0}{TRH} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

L: Carga Orgánica Volumétrica [kg/m<sup>3</sup>.d]

S<sub>0</sub>: Concentración contaminante del afluente [mg/l]

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico (θ) [dias]

Según Young, en el diseño de filtros anaerobios las cargas orgánicas volumétricas no exceden por lo general los  $12 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ , a menos que se traten aguas con cargas contaminantes que excedan los  $12000 \text{ mg DQO/l}$ , lo que según él, implica que existe una concentración por encima de la cual el diseño de los filtros queda limitado por la carga y por debajo de la cual queda limitado por el TRH. Young también afirma que la concentración contaminante del afluente no afecta en forma considerable el rendimiento de los filtros en un rango aproximado de entre  $3000$  y  $12000 \text{ mg DQO/l}$ . Esto probablemente se deba a la naturaleza mezclada de la fase líquida dentro de los filtros anaerobios [Young, 1991].

#### **4.3 Medio de Soporte.**

La superficie específica del medio parece tener un efecto menor en el rendimiento de los filtros anaerobios de flujo ascendente, pero este beneficio generalmente no es suficiente para incrementar el área superficial más allá de  $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$  [Young, 1991].

Para el relleno de filtros anaerobios se han ensayado diferentes tipos de materiales entre los que podemos contar gravilla, materiales cerámicos, cilindros y esferas plásticas perforadas, módulos tubulares de flujo cruzado o de flujo vertical, bambú, etc.

El material de relleno más utilizado es la grava, debido esencialmente a su bajo costo y a su facilidad de adquisición. Sin embargo, estudios han demostrado que el empleo de materiales plásticos tubulares permite el tratamiento de aguas residuales con una mayor carga orgánica y con una más alta concentración de sólidos, ya que son materiales de una mayor porosidad y permiten una mejor distribución de flujo.

#### 4.4 Temperatura, Ph y nutrientes.

Los filtros anaerobios generalmente operan satisfactoriamente en el rango mesofílico de temperaturas, es decir, entre 25 y 38 °C [Young, 1991]. En cuanto al control de Ph, los filtros anaerobios presentan buena capacidad autorreguladora. Los nutrientes deben ser adecuados para el desarrollo de las bacterias metanogénicas. Generalmente se acepta que el nitrógeno y el fósforo son los elementos que más tienen que ver con el desarrollo de los microorganismos dentro de un sistema anaerobio. El requerimiento de nutrientes del sistema es descrito generalmente por la relación (relación mínima):

$$\frac{DQO_{\text{entrada}}}{N.P} = 70 \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

$DQO_{\text{entrada}}$ : Concentración de sustrato del afluente.

N y P: Concentración de Nitrógeno y Fósforo en la alimentación

Generalmente en la Ecuación 3 solo se toman en cuenta los requerimientos de nitrógeno, ya que el requerimiento de fósforo es de una magnitud que solo implica implicaciones económicas menores. Nutrientes diferentes al Nitrógeno y al Fósforo, como Hierro, Níquel, Magnesio, Calcio, Bario, Cobalto y Sulfatos, son esenciales para los procesos anaeróbicos. Su influencia se hace notar en aspectos como la floculación, la precipitación del sulfuro (en el caso del hierro) y el incremento de la actividad bacteriana. En reactores a escala completa la importancia de nutrientes como el níquel no es considerable, ya que sólo está presente en trazas. Pero en experiencias a nivel de laboratorio, la falta de este compuesto puede conducir a una reducción considerable de la actividad metanogénica [Young, 1991].



## 5. DESCRIPCIÓN DEL FILTRO

El equipo utilizado en el presente proyecto se constituye de tres zonas [Casanova, 2005]:

1. Zona de Entrada.
2. Zona Empacada.
3. Zona de Salida.



Figura No. 2. Montaje del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente Evaluado

## 5.1 Zona de Entrada.

La estructura de entrada se compone de un falso fondo, pues posee una región libre de relleno en el fondo, con una válvula de  $\frac{1}{2}$ " para evacuar los lodos producidos en el tratamiento del afluente. La distribución del caudal se suministra lo más uniforme posible a través de una flauta de distribución de PVC de  $\frac{1}{2}$ " perforada; con tres secciones de ocho orificios cada una, que aumenta en proporción de menor a mayor diámetro:  $\frac{1}{8}$ ",  $\frac{9}{65}$ ",  $\frac{5}{32}$ " [Casanova, 2005].

## 5.2 Zona Empacada.

En esta zona se ubica el medio empacado de soporte, que son unos vasos de polietileno, debido a que el empleo de materiales plásticos permite el tratamiento de aguas residuales con una mayor carga orgánica y con una más alta concentración de sólidos, ya que presentan una mayor porosidad del lecho empacado y permiten una mejor distribución del flujo.

Los vasos de polietileno son modificados en su presentación original con el objetivo de lograr una mejor distribución y contacto del fluido con los vasos, cada soporte tiene un diámetro inferior de 4.5 cm, un diámetro superior de 6.5 cm y una altura de 9 cm. Se emplearon 933 vasos en total. La altura del lecho es de 65 cm y el peso total del medio de soporte es de 3.66 kg [Casanova, 2006].



**Figura No. 3. Medio de Soporte (Vasos de Polietileno)**

### **5.3 Zona de Salida.**

La zona de salida recibe y evacua el efluente del filtro por medio de una flauta en PVC de  $\frac{1}{2}$ " perforada con 19 orificios de  $\frac{9}{65}$ " de diámetro, ubicada 5 cm por encima del lecho que atraviesa de lado a lado el filtro. Con esta flauta se garantiza una correcta distribución del caudal a la salida, lo que nos confirma una adecuada eficiencia hidráulica del sistema [Casanova, 2055].

Además de la correcta distribución del caudal a la salida, también se cuenta con una línea de purga para la recolección de los gases, que se encuentra arriba de la flauta de recolección.

### **5.4 Sistema de Recolección de Gases.**

El filtro posee en la parte superior dos orificios, en los cuales se instaló una tubería de PVC de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro, seguido de un codo de PVC de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro, otro tramo de tubería de igual característica, para terminar finalmente en una T de PVC de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro [Casanova, 2005]. Luego de la T, se dispuso de una manguera a la cual se le adhirió una aguja de jeringa, que iba incrustada en un tapón, que va

en la boquilla de la botella que contiene el hidróxido de sodio. Para recoger el hidróxido de sodio que desplaza el metano se colocó otra manguera con su aguja en el mismo tapón, para luego almacenar el líquido en un beaker.



**Figura No. 4. Sistema de Recolección de Gases**

INTER-AULAS-ACADEMIÆ-QUÆRE-VERUM

## 6. METODOLOGÍA

El agua residual a tratar son las vinazas provenientes de la fabricación de alcohol en el proceso de fermentación-distilación.

### 6.1 Recolección de las Muestras.

Estas vinazas salen por los fondos de la columna de destilación, después del proceso de la destilación continua. Son recolectadas en unas marmitas con capacidad para 300 litros, y posteriormente son envasadas en unos porrones para poderlas verter al tanque de almacenamiento del filtro anaerobio con flujo ascendente.



Figura No. 5. Recolección de las muestras en las marmitas

El reactor se opero durante 16 semanas. Estuvo en recirculación en las primeras cinco semanas, y las once semanas restantes se dejó en un proceso continuo, en donde había que alimentar diariamente el reactor.

## **6.2 Caracterización Del Afluente.**

### **6.2.1 Proceso en Recirculación**

Para reactivar la película fija microbiana del filtro, se trabajo con las vinazas provenientes del proceso de fermentación alcohólica, y se dejo el reactor funcionando en recirculación.

Se realizaron solo dos pruebas del afluente durante las cinco primeras semanas para cada una de las variables a caracterizar, debido a que en la cuarta semana se tuvo un inconveniente con la bomba peristáltica que controla el flujo de entrada al reactor. Se tomaron valores de  $DBO_5$ , DQO, pH y Temperatura. Los valores encontrados se datan en la Tabla de resultados No 1.

### **6.2.2 Proceso en continuo.**

A partir de la sexta semana del proceso se siguieron analizando las vinazas, dejando actuar el reactor en un proceso continuo hasta la última semana.

En estas últimas once semanas donde el reactor trabajó en un proceso continuo se diluyo con agua la muestra en el tanque de alimentación a una razón de 2:1, debido a que tenían una carga contaminante muy alta, expresada con una DQO igual a 160000 mg/l.

En esta etapa, el reactor se empezó operando con un caudal de  $93.98 \text{ cm}^3/\text{min}$ , DQO de  $80320 \text{ mg/l}$  y un tiempo de residencia igual a  $23.5$  horas o aproximadamente  $1$  día. Debido a este tiempo de residencia, después de llevar las vinazas al laboratorio en los porrones y hacerle la respectiva dilución, había que llenar el tanque de alimentación al reactor diariamente.

Este almacenamiento antes de entrar en el reactor permite a las bacterias, tanto aerobias como anaerobias, reducir en pequeña proporción la materia orgánica. Esto se comprobó con los datos de DQO en donde se encontró que la concentración disminuía progresivamente haciéndose necesario menor cantidad de agua de dilución para tener la concentración constante a la entrada que siempre se esperaba.

Las pruebas se hicieron una vez por semana tanto del afluente como del efluente y los resultados se muestran en la Tabla No. 2, de los resultados.

### **6.2.3 Estado Estable.**

A pesar de que se trató de mantener constante todas las propiedades fisicoquímicas en las once últimas semanas donde estuvo el reactor en un proceso continuo, se destacó notablemente que en las dos últimas semanas, fue donde el filtro operó con unas condiciones de Caudal, Temperatura, pH y eficiencias de estado más estable. Estas propiedades se reportan en las pruebas No. 10 y 11 de la Tabla de resultados No.2.

Es importante resaltar que para la operación más eficiente del filtro anaerobio con flujo ascendente se encontró un rango de caudal entre  $70 \text{ cm}^3/\text{min}$  y  $78 \text{ cm}^3/\text{min}$  y un rango del tiempo de residencia entre  $28.3$  horas ( $1.2$  días) y  $31.54$  horas ( $1.3$  días).

### 6.3 Producción Del Biogás.

Esto se hizo con el fin de determinar la actividad metanogénica en el reactor; por medio de la producción del biogás que es una mezcla de metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y Nitrógeno (N). El dióxido de carbono constituye la mayor fracción, y se elimina haciendo pasar el biogás por una solución de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) 3M; en el cual el dióxido de carbono y trazas del ácido sulfhídrico son absorbidos en el medio básico por formación de carbonatos, y solo el metano alcanza el espacio libre del recipiente de medición desplazando un volumen equivalente del líquido, el cual abandona la botella por un agujero de jeringa que se ha perforado en el tapón, finalmente de esta agujero se extiende una manguera dirigiendo el hidróxido de sodio desplazado a un beaker para realizar la medición.

La producción de metano se tomó durante todo el segundo mes (a partir de la cuarta semana) diariamente en los días hábiles de cada semana, o sea que se empezó a tomar desde el día 19 hasta el día 47 de todo el proceso. De allí podemos encontrar una correlación de los datos para estimar una expresión de la producción de biogás acumulada en función de cada día.

Los datos del registro acumulado de la producción de biogás obtenidos se tabularon en la Tabla No. 3.



## 7. ANALISIS Y RESULTADOS

Los primeros datos que se obtuvieron fueron los de la caracterización de las primeras vinazas con que se reactivó la actividad de los microorganismos en el filtro. Se reportan propiedades fisicoquímicas como la DQO, la DBO<sub>5</sub>, pH y Temperatura; dichos datos están reportados en la siguiente tabla:

VARIABLE	METODO	UNIDADES	PRUEBA	VALOR
DQO	Oxidación con Dicromato de Potasio	mg/l	1	160423
			2	163520
DBO <sub>5</sub>	Incubación cinco días	mg/l	1	60425
			2	62350
pH	Potenciométrico		1	4.89
			2	4.89
Temperatura		°C	1	20.8
			2	20.4

**Tabla No.1 Caracterización de las primeras vinazas**

Durante todo el proceso las condiciones de pH y Temperatura estuvieron muy constantes. Se trató de mantener un caudal promedio de aproximadamente 75 cm<sup>3</sup>/min.

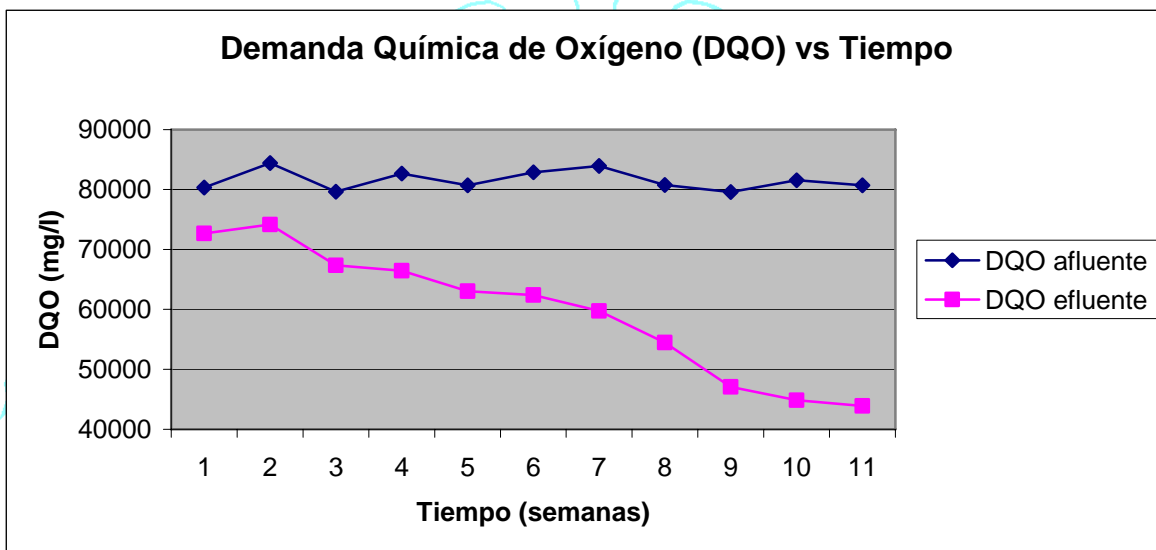
Para el proceso en continuo se siguió la caracterización de las mismas propiedades fisicoquímicas que en recirculación, pero se tomaron datos tanto a la entrada (afluente) como a la salida (efluente) del reactor. Con estos datos se calculó el porcentaje de remoción o eficiencia del proceso para la DQO y la DBO<sub>5</sub>, de acuerdo a la Ec. (1) antes citada. Los valores obtenidos son los siguientes:

SEMANAS	T (°C)	pH	DBO <sub>5</sub> (mg/l)		% REMOCIÓN	DQO (mg/l)		% REMOCIÓN
			Afluente	Efluente		Afluente	Efluente	
1	20.3	4.8	35486	33385	5,92	80320	72641	9,56
2	20.4	4.94	30258	27613	8,74	84410	74163	12,14
3	19.6	4.92	36983	32782	11,36	79620	67319	15,45
4	19.5	4.92	33476	29325	12,40	82650	66426	19,63
5	19.5	4.91	29654	25244	14,87	80680	63035	21,87
6	20.4	4.89	31492	25830	17,98	82879	62416	24,69
7	19.8	4.89	34620	27239	21,32	83956	59718	28,87
8	19.7	4.89	32478	24284	25,23	80752	54475	32,54
9	18.4	4.98	27561	19714	28,47	79562	47061	40,85
10	18.2	4.97	31472	21127	32,87	81540	44863	44,98
11	18.2	4.97	34892	22533	35,42	80698	43876	45,63

**Tabla No. 2. Caracterización del afluente y el efluente de vinazas en un proceso continuo**

Se realizaron las graficas de la DQO (Grafico No. 1) y la DBO<sub>5</sub> (Grafico No. 3), del afluente y del efluente a través del tiempo, en este caso semanas, para encontrar la relación que hay entre estos dos puntos del reactor.

INTER-AULAS-ACADEMIAE-QUAERE-VERUM

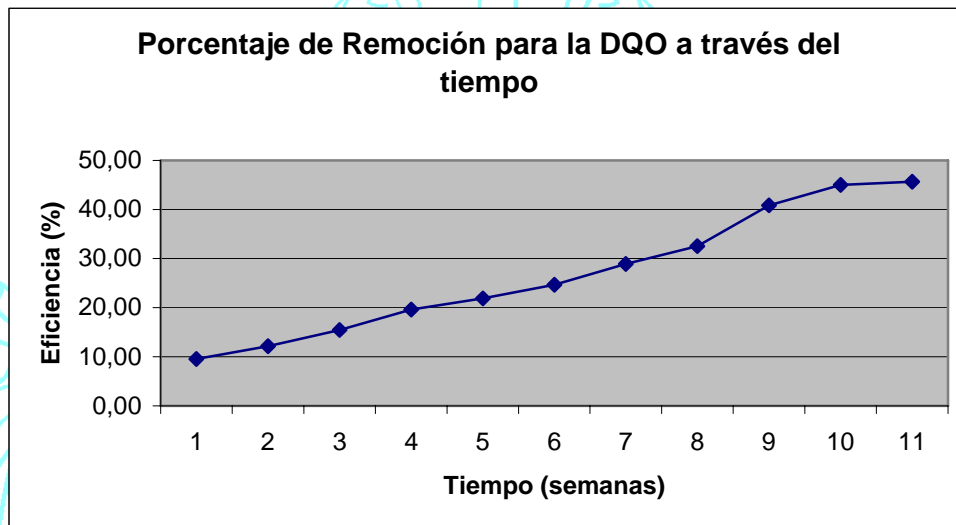


**Grafico No. 1. Descripción del comportamiento de la DQO en la entrada y en la salida del reactor a través del tiempo (semanas)**

En el grafico anterior se puede notar que la DQO de entrada y la DQO de salida tienen una relación muy estrecha, debido a que sus puntos crecientes y decrecientes siguen la misma relación, esto indica que hubo una remoción de la carga orgánica en sentido ascendente.

Se observa que la DQO en el afluente se trató de mantener constante y que a medida que pasaban las semanas la diferencia entre la entrada y la salida se hacía más grande, lo que nos indica que hubo una mayor remoción de la carga orgánica; pudiéndose comprobar esto en el siguiente grafico en donde se presenta la relación de la eficiencia a través del tiempo.



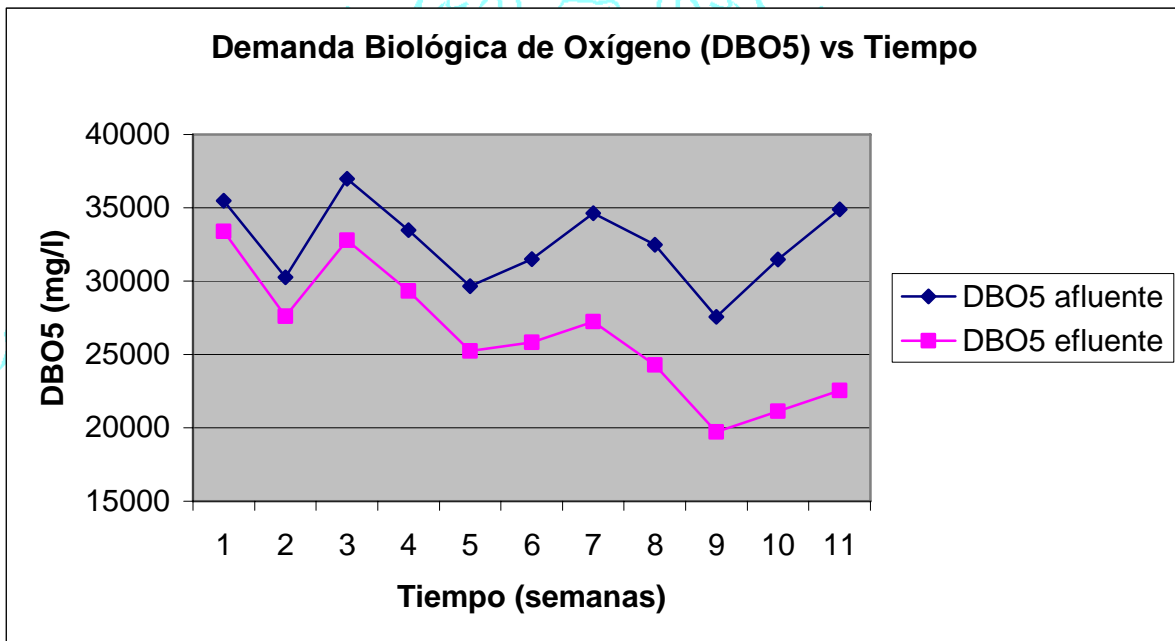


**Grafico No. 2. Descripción del porcentaje de remoción para la DQO en todo el proceso a través del tiempo (semanas)**

En la grafica ascendente del porcentaje de remoción, se puede observar una remoción constante a medida que finalizan los análisis en las dos ultimas semanas, lo cual nos indica que el filtro anaerobio de flujo ascendente se encuentra operando en estado estable y que a medida que pasa el tiempo los microorganismos van reduciendo cada vez más la carga orgánica de las vinazas.

Otros de los parámetros importantes que permite evaluar el filtro anaerobio es la demanda biológica de oxígeno ( $DBO_5$ ). En la anterior tabla (Tabla No. 2) se tabularon los datos experimentales encontrados en el seguimiento de esta variable.

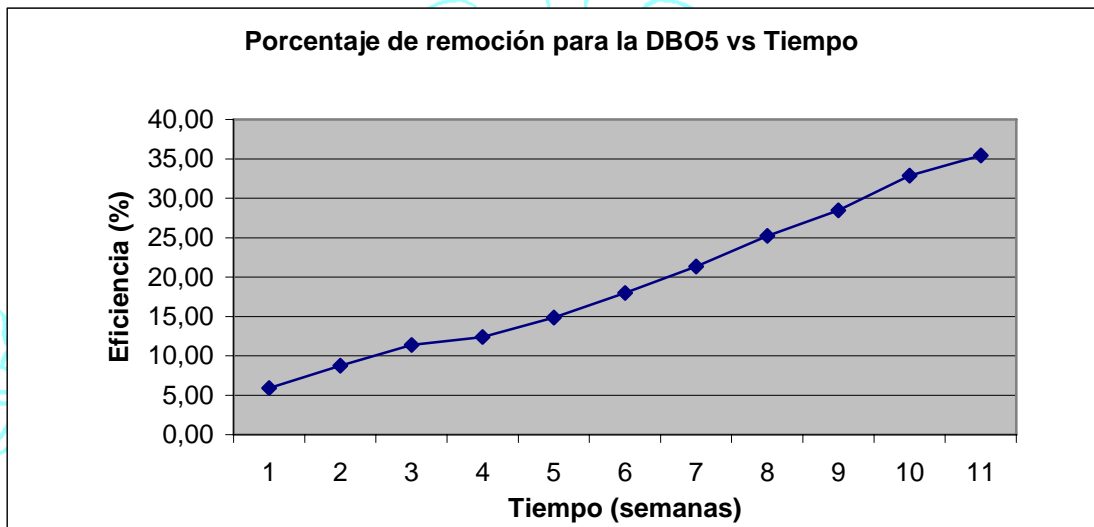
Al igual que para la DQO se reportan los datos a la entrada y a la salida del reactor y se calcula el porcentaje de remoción con la Ec. (1) como se había mencionado anteriormente. También se realizan los gráficos de la variación de la  $DBO_5$  a la entrada y a la salida (Grafico No.3), y de la eficiencia (Grafico No.4) a través del tiempo.



**Grafico No. 3. Descripción del comportamiento de la DBO<sub>5</sub> en la entrada y en la salida del reactor a través del tiempo (semanas)**

Para el anterior gráfico se puede ver que existe una similitud con el de la DQO, ya que se puede observar claramente que a medida que pasan las semanas aumenta la diferencia entre la DBO<sub>5</sub> a la entrada y a la salida, y por lo tanto aumenta el porcentaje de remoción, como se ilustra en el siguiente grafico (Grafico No.4).

Del Grafico No. 3 se puede distinguir que para la primera, la séptima y la última semana los valores de la DBO<sub>5</sub> son semejantes, pero que a medida que transcurre el tiempo aumenta la diferencia entre el dato del afluente y del efluente en cada una de dichas semanas, indicando que el buen funcionamiento del medio de soporte y de los microorganismos que descomponen la materia orgánica.



**Grafico No. 4. Descripción del porcentaje de remoción para la DBO<sub>5</sub> en todo el proceso a través del tiempo (semanas)**

El anterior gráfico nos ilustra que para un tiempo de retención hidráulico de un día aproximadamente, al cabo de once semanas se alcanza para este filtro anaerobio de flujo ascendente un porcentaje de remoción del 35% para la DBO<sub>5</sub>.

Continuando con la valoración del filtro anaerobio de flujo ascendente, tenemos la de la producción de metano; que se puede establecer gracias a que la descomposición de la materia orgánica está directamente relacionada con el desprendimiento del biogás en este tipo de filtros.

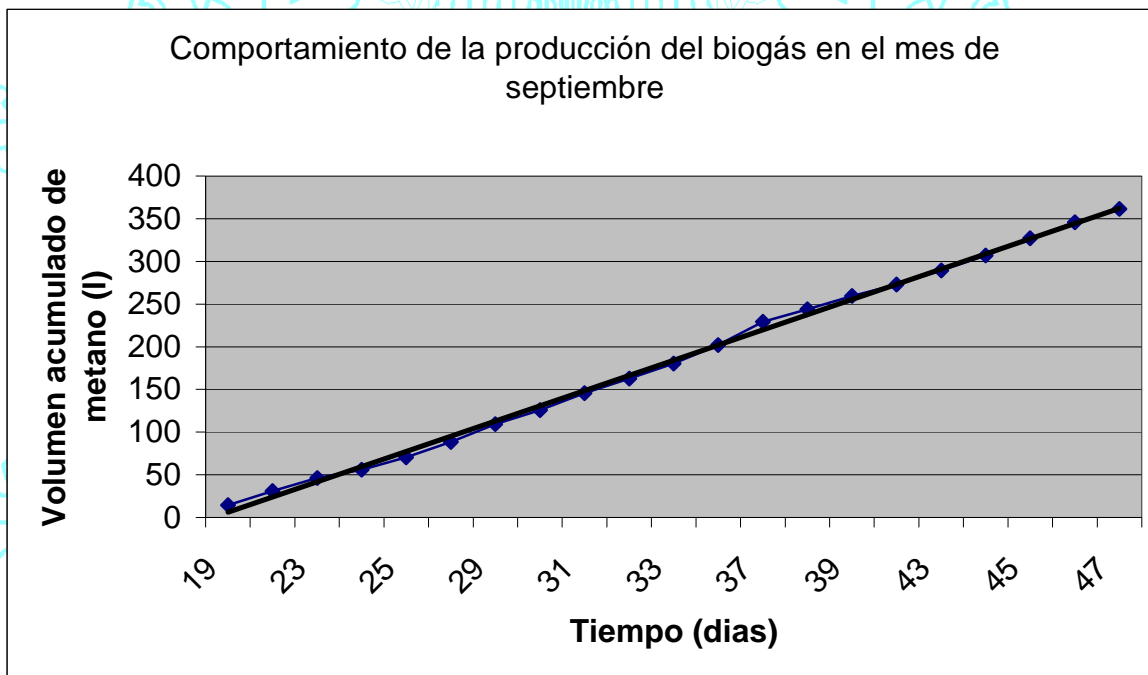
Los datos están reportados en la siguiente tabla, diferenciando desde el momento en que el reactor se opero en flujo continuo:



Día	Volumen de CH <sub>4</sub> (ml)	Volumen de CH <sub>4</sub> (l)	Volumen acumulado de CH <sub>4</sub> (l)
19	14456	14,456	14,456
22	16582	16,582	31,038
23	15240	15,24	46,278
24	9632	9,632	55,91
25	14652	14,652	70,562
26	17986	17,986	88,548
29	20698	20,698	109,246
30	16598	16,598	125,844
31	19683	19,683	145,527
32	17256	17,256	162,783
33	17630	17,63	180,413
<b>ALIMENTACIÓN EN CONTINUÓ</b>			
36	21786	21,786	202,199
37	26935	26,935	229,134
38	14896	14,896	244,03
39	15698	15,698	259,728
40	13435	13,435	273,163
43	16327	16,327	289,49
44	17452	17,452	306,942
45	20087	20,087	327,029
46	18630	18,63	345,659

Tabla No. 3 Datos de la producción acumulada de biogás durante el segundo mes.

Debido a que la carga orgánica aumenta progresivamente se debe notar también un aumento proporcional en la producción de metano (l/día). Esto se corrobora con la ilustración del siguiente gráfico en donde se ve el aumento progresivo de la producción del biogás durante el proceso a través del tiempo.

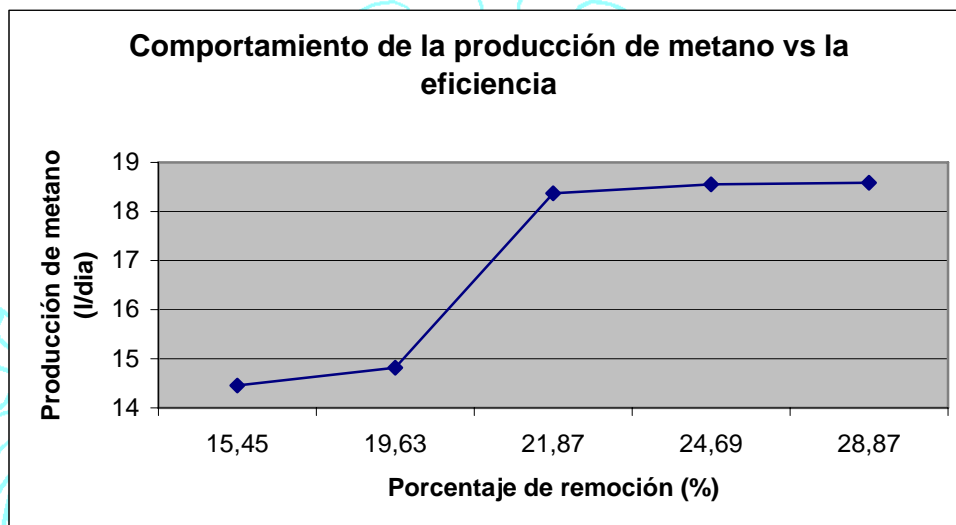


**Gráfico No. 5. Producción de metano acumulado a través del tiempo**

El siguiente gráfico nos comprueba una vez más, la estrecha relación progresiva en aumento que hay entre el porcentaje de remoción para la DQO y el volumen producido de metano debido a los gases que libera el proceso. Además se puede afirmar que al final de la reacción el proceso se encontraba en sus condiciones estables por los dos últimos puntos del gráfico No.6.

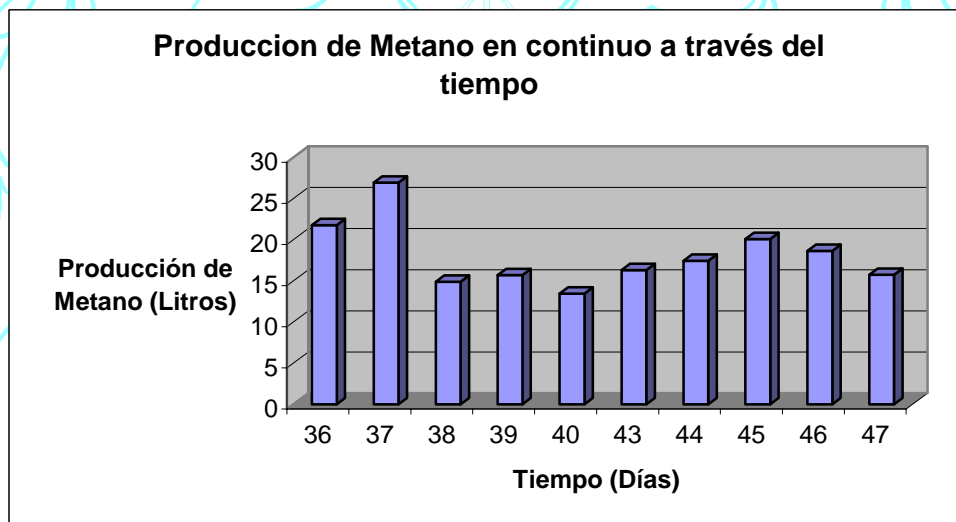






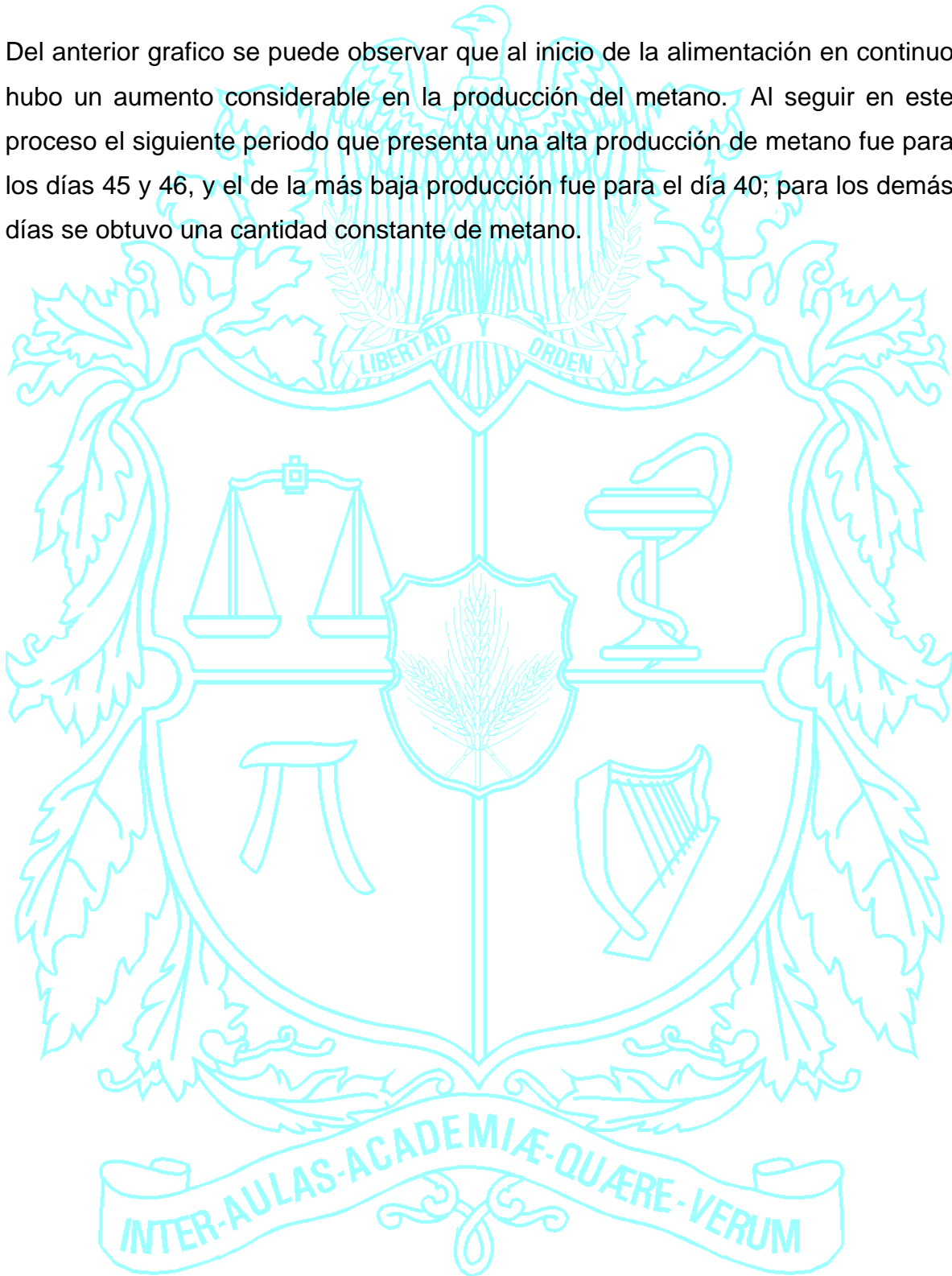
**Grafico No. 6. Comportamiento de la producción de metano acumulado con el porcentaje de remoción de la carga orgánica contaminante.**

Otro grafico importante que podemos destacar de la tabla No.3 es la de la producción del metano pero solo en un proceso con flujo continuo.



**Grafico No.7. Producción de Metano en el proceso de flujo continuo**

Del anterior grafico se puede observar que al inicio de la alimentación en continuo hubo un aumento considerable en la producción del metano. Al seguir en este proceso el siguiente periodo que presenta una alta producción de metano fue para los días 45 y 46, y el de la más baja producción fue para el día 40; para los demás días se obtuvo una cantidad constante de metano.



## 8. CONCLUSIONES

- ✓ Antes de alimentar el reactor con una nueva vinaza (o cualquier tipo de agua residual), es necesario hacer una homogenización del residuo para poder darle un mejor tratamiento a este tipo de aguas residuales con alto contenido de sólidos sedimentables y posteriormente una sedimentación previa al afluente durante un tiempo determinado y siempre constante, para sedimentar los sólidos; con el fin de que solo entre al filtro anaerobio de flujo ascendente la fracción líquida del residuo a tratar para establecer una alimentación que no altere o disminuya notablemente los sólidos a la entrada, los cuales se ven influenciados por los sólidos sedimentables. Por tal motivo no se tomaron datos de sólidos ni a la entrada ni a la salida del reactor pues no eran muy significativos a la hora de hacerles una comparación el uno con el otro, debido a que se trataba de un residuo con alto contenido de sólidos sedimentables.
- ✓ Por tratarse de un sistema de alta tasa (80000 mg/l), la remoción que se obtiene en este sistema es buena, además de que se trata de un sistema que no es costoso y que el equipo con que se trabaja es de fácil manejo. Aunque se pueden obtener mejores resultados si se tiene en cuenta que se puede trabajar con sistemas combinados (anaerobio-aerobio), donde el segundo sistema aerobio continua con la remoción.
- ✓ El filtro utilizado tiene una capacidad de tratamiento de vinaza de 108 litros por día, siendo una cantidad considerable para cualquier industria y con buenos porcentajes de remoción. Además es un equipo que no requiere condiciones extremas para operar y que su funcionamiento es prácticamente solo.
- ✓ Los resultados obtenidos durante el periodo de recopilación de datos para las propiedades evaluadas, tuvieron una tendencia secuencial sin interrupciones y

de las cuales se mostraron gráficos que corroboraba dicha secuencia a través del tiempo.

- ✓ Debido a que se utilizó una bomba solenoide peristáltica con un residuo industrial que contiene altas cantidades de sólidos, se notaron pequeñas variaciones en el caudal las cuales siempre fueron reguladas oportunamente y encontrándose posteriormente el mismo caudal o un valor muy cercano, haciéndose necesario en ocasiones la purga de la bomba por medio de un chorro de agua a presión que pasaría a través de esta. Por lo tanto es necesario un clarificador al proceso para aliviar un poco este sistema de bombeo. No obstante, el sistema no se vio en ningún momento afectado por este factor.
- ✓ Fue posible alcanzar altos porcentajes de remoción (DQO y DBO<sub>5</sub>) y una pronta estabilización de los filtros anaerobios de flujo ascendente, utilizando una alta concentración de materia orgánica, controlando constantemente las variables de diseño y manteniendo constante la concentración a la entrada con la dilución pertinente. Aunque con esta dilución que se hizo se obtuvo un buen rendimiento no se puede afirmar que es la mejor.
- ✓ El tiempo de experimentación y la cantidad de vinaza existente fueron unos factores determinantes en la realización del trabajo; ya que gracias a ellos se pudo llegar al estado estable y por ende se pudo definir cada una de las variables controladas en éste. Pero sería conveniente estimar un poco más de tiempo para seguir evaluando el comportamiento del filtro.

## 9. RECOMENDACIONES

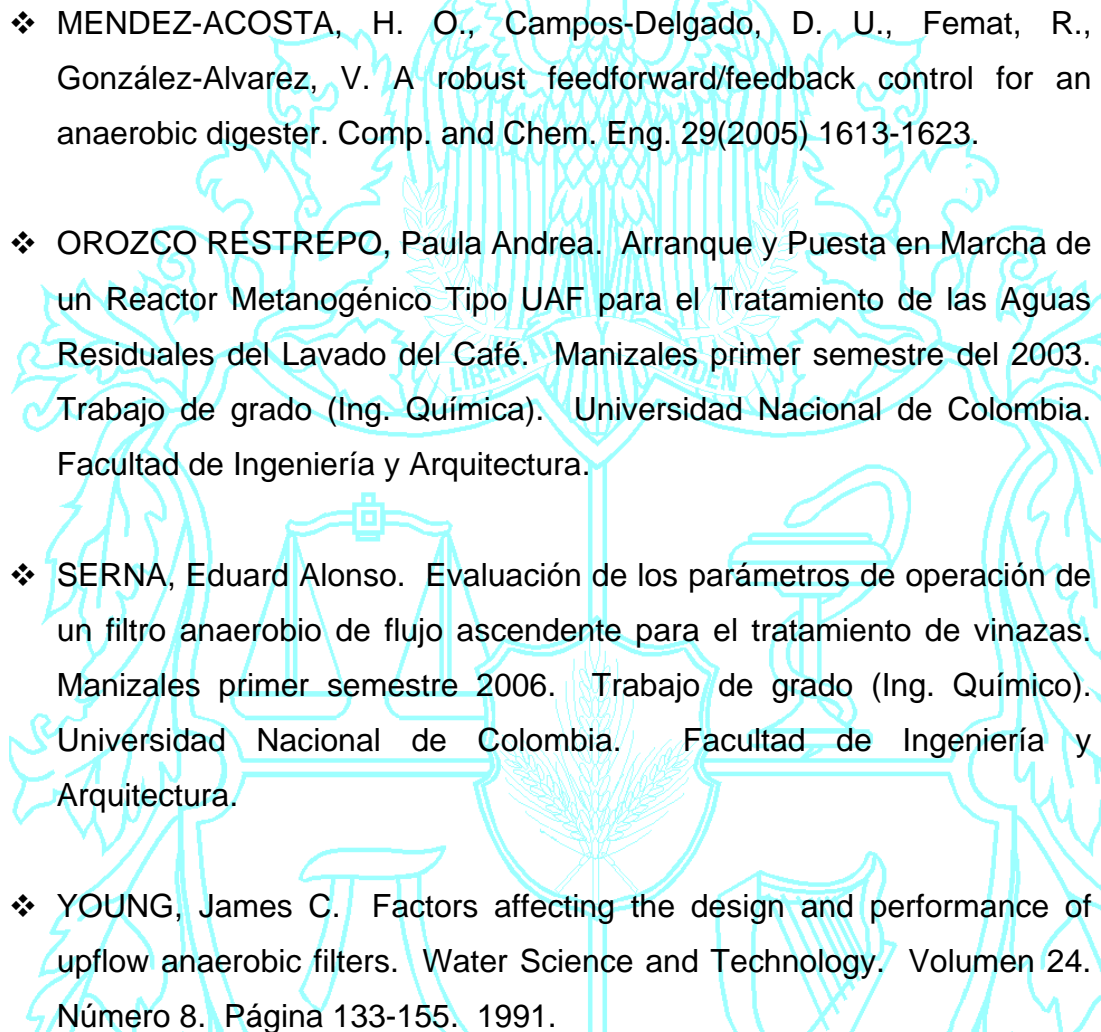
- ✓ Mantener un buen control de las variables de diseño, como lo son el pH, la temperatura y los nutrientes principalmente, ya que de estos parámetros depende el buen funcionamiento del metabolismo de los microorganismos y por lo tanto lograr una mayor remoción en cuanto a materia orgánica se refiere.
- ✓ Controlar las fugas antes de empezar a operar el equipo por medio de soldaduras recomendadas, con el fin de no tener que parar el sistema después de llevar un recorrido en su evaluación.
- ✓ Para lograr mayores eficiencias de remoción, puede implementar un sistema combinado, donde la primera remoción se lleve a cabo en el filtro anaerobio y una segunda en un filtro aerobio.
- ✓ Controlar diariamente el caudal, ya que este presenta variaciones debido a la inestabilidad de la bomba. Además se cuenta con un residuo que contiene gran cantidad de sólidos.
- ✓ En cuanto a la bomba solenoide se debe estar muy pendiente de ella diariamente ya que no se encuentra ubicada en un lugar fijo y además fijarse en que no presente obstrucción, pues de lo contrario se debe purgar.
- ✓ Tener mucho cuidado con las estructuras de distribución del fluido y de recolección del efluente, para garantizar de mejor forma la uniformidad del flujo al interior de los filtros, con el fin de favorecer el contacto biomasa-sustrato y el comportamiento hidráulico de los mismos.

- ✓ Tener en cuenta el tiempo de residencia hidráulico para hacer los análisis respectivos, pues si se alimenta el reactor en un tiempo dado con un valor determinado de la  $DQO_1$  por ejemplo, será necesario esperar a que salga del reactor ya con una  $DQO_2$  el mismo tiempo de residencia hidráulico.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- ❖ BERNARD, O., Hadj-Sadok, Z., Dochain, D., Genovesi, A. y Steyer, J. P. Dynamical Model Development and Parameter Identification for an Anaerobic Wastewater Treatment Process. *Biotechnology and Bioengineering* 75 (2001) 424-438.
- ❖ CAICEDO M., Luis Alfonso. FONSECA, José Joaquín. RODRÍGUEZ, Gerardo. Criterios para la selección de un sistema de tratamiento de residuos y su aplicación a las vinazas de la industria alcohólica. *Ingeniería e Investigación*, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. Número 34. Página 3-8. Santafé de Bogotá.
- ❖ CASANOVA, Alicia. SANCHEZ, Iván Darío. Diseño y puesta en Marcha de un filtro anaerobio de flujo ascendente, empleando vasos plásticos de polietileno como material de soporte para tratamiento de vinazas. Manizales segundo semestre 2005. Trabajo de grado (Ing. Químico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- ❖ DÍAZ GOMEZ, Jaime. LARA MENDOZA, Carlos Rafael. VALENCIA MONEDERO, Carlos Hernán. Evaluación del Tratamiento de Aguas Residuales domésticas del municipio de Tunja por medio de un reactor anaerobio UASB de dos compartimientos. *Proyección Universitaria*. Fundación Universitaria de Boyacá, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Número 19. Páginas 31-59. Boyacá (2001).
- ❖ ESTABEN, M., Polit, M., Steyer, J. P., Fuzzy control for an anaerobic digester *Control Engineering Practice* 5 (1997) 1303-1310.

- 
- ❖ MENDEZ-ACOSTA, H. O., Campos-Delgado, D. U., Femat, R., González-Alvarez, V. A robust feedforward/feedback control for an anaerobic digester. *Comp. and Chem. Eng.* 29(2005) 1613-1623.
  - ❖ OROZCO RESTREPO, Paula Andrea. Arranque y Puesta en Marcha de un Reactor Metanogénico Tipo UAF para el Tratamiento de las Aguas Residuales del Lavado del Café. Manizales primer semestre del 2003. Trabajo de grado (Ing. Química). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
  - ❖ SERNA, Eduard Alonso. Evaluación de los parámetros de operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente para el tratamiento de vinazas. Manizales primer semestre 2006. Trabajo de grado (Ing. Químico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
  - ❖ YOUNG, James C. Factors affecting the design and performance of upflow anaerobic filters. *Water Science and Technology*. Volumen 24. Número 8. Página 133-155. 1991.