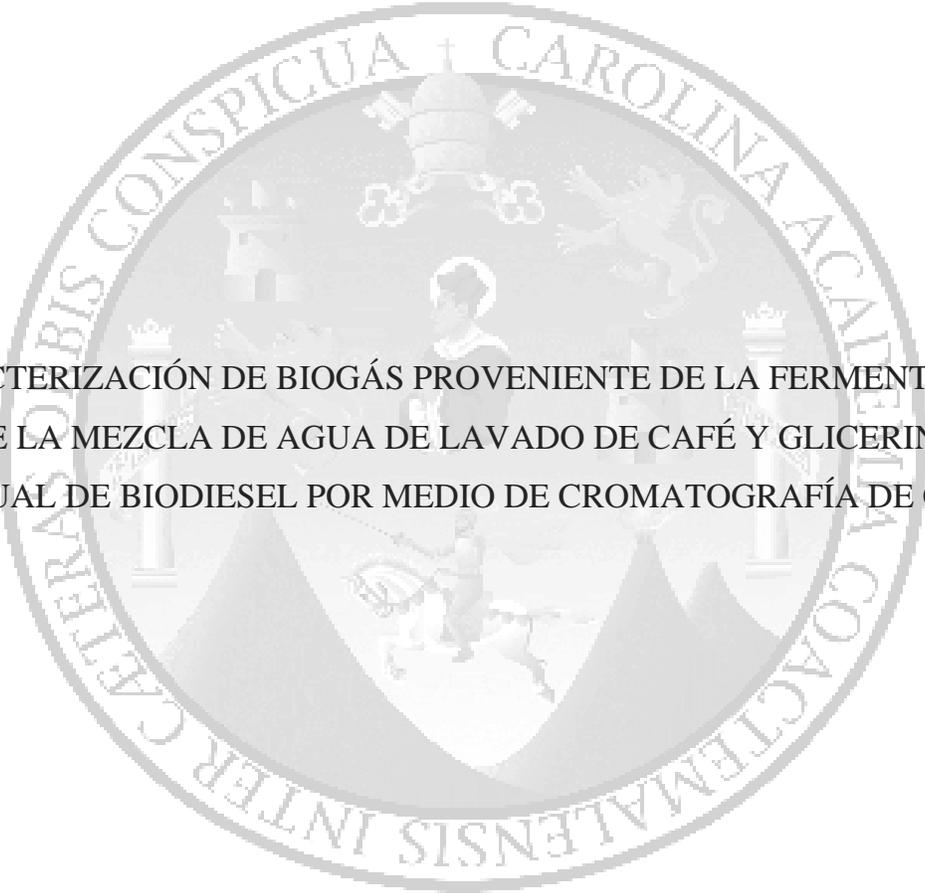


UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

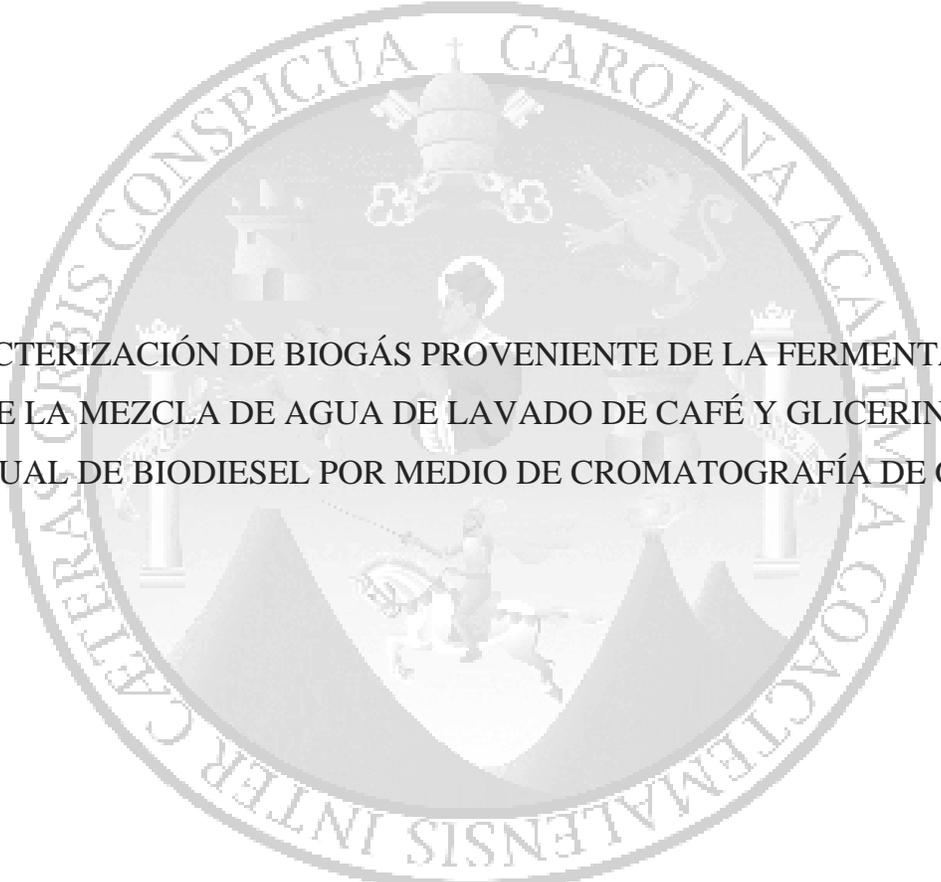
The seal of the University of San Carlos of Guatemala is a circular emblem. It features a central shield with a figure, possibly a saint or a historical figure, holding a staff. Above the shield is a crown. The shield is flanked by two figures, possibly angels or saints, holding a banner. The entire emblem is surrounded by a circular border containing the Latin text "UNIVERSITAS SAN CAROLINI ACADEMIA COACTEMALENSIS INTER CETERAS OBIS CONSPICUA".

CARACTERIZACIÓN DE BIOGÁS PROVENIENTE DE LA FERMENTACIÓN  
DE LA MEZCLA DE AGUA DE LAVADO DE CAFÉ Y GLICERINA  
RESIDUAL DE BIODIESEL POR MEDIO DE CROMATOGRAFÍA DE GASES.

GERARDO ALFREDO PINEDA MARTÍNEZ  
QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2011

UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

The seal of the University of San Carlos of Guatemala is a circular emblem. It features a central shield with a figure on horseback, a cross, and other heraldic symbols. The shield is surrounded by a circular border containing the Latin motto: "CETERA QVIBIS CONSPICUA CAROLINA ACADEMIA COACTEMALENSIS INTER".

CARACTERIZACIÓN DE BIOGÁS PROVENIENTE DE LA FERMENTACIÓN  
DE LA MEZCLA DE AGUA DE LAVADO DE CAFÉ Y GLICERINA  
RESIDUAL DE BIODIESEL POR MEDIO DE CROMATOGRAFÍA DE GASES

Informe de Tesis

Presentado por

GERARDO ALFREDO PINEDA MARTÍNEZ

Para optar al título de

QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2011

## JUNTA DIRECTIVA

Oscar Manuel Cóbar Pinto, PhD.	Decano
Lic. Pablo Ernesto Oliva Soto, M.A.	Secretario
Licda. Lillian Raquel Irving Antillón, M.A.	Vocal I
Licda. Liliana Vides de Urizar	Vocal II
Lic. Luis Antonio Gálvez Sanchinelli	Vocal III
Br. José Roy Morales Coronado	Vocal VI
Br. Cecilia Liska de León	Vocal V

## DEDICATORIA

- A Dios por ser el guía, fortaleza y sabiduría que me acompaña.
- A mi papá por su apoyo desde el cielo. (Q.E.P.D.)
- A mi mamá por la paciencia y amor que cada día me brinda.
- A mis hermanas por compartir tanto alegrías como tristezas.
- A mis abuelitos por no dejarme ni un instante. (Q.E.P.D.)
- A mi familia por estar en los momentos indicados, con las palabras adecuadas.
- A los putativos por ser ejemplo de confianza y cariño.
- A los hermanos en sangre que la vida me ha dado.
- A mis amigos quienes sin su apoyo, amistad, afecto, compañerismo, no hubiera alcanzado esta meta.

## AGRADECIMIENTOS

A la USAC por ser cuna de sabiduría, brindándome así las herramientas con las cuales poder defenderme en la selva de cemento.

A la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia por enseñarme el camino hacia la verdad y a la realización profesional.

Al Depto. Química Orgánica por ser mí segundo hogar, en especial a la Lic. Diana Pinagel por toda la ayuda brindada.

A mis Amigos por brindarme el regalo de la amistad.

A mis colegas Químicas Vicky y Bessie, por su amistad y apoyo.

A los Hidropónicos Erick y Byron, que sin su trabajo y ayuda, no hubiera logrado nada de lo que aquí presento.

A todos mis Compañeros Universitarios por estos seis años de ética, diversión, compañerismo y amistad.

Al Laboratorio Químico-Fiscal SAT, en especial al Lic. Roberto Benavides, por su ayuda y conocimientos compartidos.

A mis Catedráticos por sus enseñanzas, no solo en las clases impartidas, si no que también en las lecciones de vida.

A mis Alumnos que más de algo aprendí de ellos.

..... A las demás personas que de uno u otro modo, me han apoyado y han estado en mi vida, que aunque no han sido mencionadas, pero que el agradecimiento que les tengo, es incalculable!!!!

# ÍNDICE

I. Resumen	4
II. Introducción	6
III. Antecedentes	8
A. Estudios previos sobre generación de biogás	8
B. Fermentación anaeróbica	8
C. Biogás	9
D. Biodigestor	10
1. Tipos de biodigestor	10
E. Factores de control para la producción de biogás	11
1. Tipo de materia prima	11
2. Temperatura del sustrato	12
3. Velocidad de carga volumétrica	12
4. Tiempos de residencia	12
5. Valor de acidez (pH)	12
6. Contenido de sólidos	13
7. Agitación – mezclado	13
8. Inhibidores	13
F. Materiales o Sustratos para la producción de biogás	14
1. Agua de lavado de la pulpa de café	14
2. Glicerina residual del proceso de biodiesel	15
G. Análisis de Biogás	17
IV. Justificación	18
V. Objetivos	20
VI. Hipótesis	21
VII. Materiales y métodos	22
A. Universo de trabajo	22
B. Material y Equipo	22
C. Procedimiento	23

D. Diseño de la investigación	24
VIII. Resultados	26
IX. Discusión de resultados	29
X. Conclusiones	33
XI. Recomendaciones	34
XII. Referencias	36
XIII. Anexos	38
Anexo 1	38
Anexo 2	39
Anexo 3	40
Anexo 4	41
Anexo 5	42
Anexo 6	43
Anexo 7	44
Anexo 8	45
Anexo 9	46
Anexo 10	47

# I. RESUMEN

La generación de biogás es realizada por las bacterias metanogénicas, presentes en el estiércol animal, mediante el proceso de fermentación o biodegradación anaeróbica. Éstas se caracterizan por tener un metabolismo estrictamente anaeróbico.

El empleo de mezclas de agua de lavado de café y glicerina residual de biodiesel para la producción de biogás, consiste en un aprovechamiento de desechos industriales, teniendo en cuenta que con su degradación se tiene una reducción en su impacto ambiental.

Se realizó el análisis del biogás generado en la fermentación anaeróbica de varias mezclas de agua de lavado de café y glicerina residual del proceso de producción de biodiesel y estiércol bovino, empleando para ello cromatografía de gases con detector de captura de electrones, resultando el metano, como el componente mayoritario en el biogás.

Los sistemas de biodigestión, tanto de las mezclas como de cada uno de los sustratos, se mantuvieron entre 40-50 °C, empleando un baño de María. Dentro de varios microbiodigestores hubo producción de gas; no en todos se obtuvo la producción de metano, ya que si la biodegradación de la materia orgánica es incompleta solamente se tiene la producción de dióxido de carbono.

Inicialmente se analizó el gas patrón de metano. El tiempo de detección del gas metano obtenido a partir de éste y del biogás generado en los microbiodigestores Bd 11, Bd 12, Bd 14, Bd 15, Bd 16, Bd 17, Bd 18, Bd 19 es aproximadamente 9.7 minutos. Ya que el gas patrón de metano era de concentración desconocida, solamente se realizó una determinación cualitativa. De estos microbiodigestores se tomó una muestra de 200 µL para su análisis por un Cromatógrafo de Gases Agilent 6890N GC con detector de captura de electrones, equipado con una columna capilar apolar AT-PETRO, de 100 metros de

longitud, 0.25 mm de diámetro interno de la columna y 0.50  $\mu\text{m}$  de espesor de la fase estacionaria, utilizando gas nitrógeno como gas de arrastre.

Mediante dichos análisis, se determinó que con cualquier cantidad de agua de lavado de pulpa de café que se utilice dentro del biodigestor, se tiene una producción de biogás con una alta concentración de metano. En cambio, la utilización de la glicerina residual del proceso de biodiesel no completa el proceso de biodigestión, ya que se tiene producción solamente de dióxido de carbono. En cuanto a los microbiodigestores, en los que se utilizó mezclas de ambos sustratos, no se logró la producción de metano.

## II. INTRODUCCIÓN

Tomando en cuenta que la producción de energía y el tratamiento de desechos, son parte de las prioridades actuales, esta investigación es un impulso para la propuesta de soluciones tanto de fuentes energéticas alternas como de metodologías de tratamientos de los desechos ya sean industriales y/o domésticos, fomentando la investigación en estos campos.

Un biodigestor es un sistema económico y accesible diseñado para el aprovechamiento funcional del proceso de la digestión anaerobia, realizado por bacterias, procedentes principalmente del estiércol, que transforman la materia orgánica en biogás y fertilizante orgánico.

Con la utilización de un biodigestor, es posible tratar principalmente desechos orgánicos por medio de fermentación anaeróbica, dando como resultado biogás, el que en su composición presenta un gran porcentaje de metano, gas combustible con propiedades muy similares al propano.

Dentro de un proceso de biodigestión, las bacterias metanogénicas son estrictamente anaeróbicas, los gases provenientes de la fermentación de materia orgánica son productos reducidos, como resultado del medio carente de oxígeno, siendo estos gases altamente inflamables y con potencial para ser empleados como carburantes.

En esta investigación se utilizaron biodigestores de flujo discontinuo, dentro éstos se tuvieron distintas cantidades de glicerina residual de la producción de biodiesel, agua de lavado de pulpa de café y mezclas. Estas sustancias son desechos industriales, que no tienen una metodología específica para su tratamiento, siendo un foco de contaminación principalmente para cuerpos acuáticos cercanos a las industrias que los generan. Como fuente bacteriana se utilizó estiércol bovino, tomando en cuenta la facilidad de su manejo y

acceso. Además la generación de biogás a partir de este tipo de estiércol se da desde que es excretado por el animal, por lo cual es conveniente su empleo fresco.

Dentro de los biodigestores se tuvo control sobre el pH inicial, la agitación y la temperatura, por ser variables que afectan inicialmente la reproducción bacteriana, y por ende el proceso de biodigestión. Al igual, se monitoreó la presión interna generada y el volumen del gas producido, para cada uno de los biodigestores utilizados.

El biogás producido se analizó por cromatografía de gases con detector de captura de electrones, optimizando las condiciones de análisis del componente principal con que consta el biogás; teniendo el análisis cualitativo del gas metano presente en el biogás generado principalmente de los biodigestores en los cuales se utilizó agua de lavado de pulpa de café.

El proceso de fermentación anaeróbica, mediante el cual se obtiene la producción de biogás, es recurrente en ámbitos agrícolas, debido a la facilidad de acceso principalmente del estiércol animal. Por lo que las comunidades rurales tienden a tener un mayor uso de estos sistemas, siendo importante determinar si los materiales y las condiciones que se emplean para la generación de biogás, son las mejores; partiendo de lo anterior, el presente estudio puede ser un punto de partida para el análisis, monitoreo y optimización en la producción de biogás que se tenga dentro de una comunidad rural.

### III. ANTECEDENTES

#### A. Estudios previos sobre generación de biogás

Existe un estudio previo en la generación del biogás proveniente de la fermentación de la mezcla de agua de lavado de café y glicerina residual de biodiesel, desarrollado por Estrada (2008) en el cual se obtuvo como resultado la producción de biogás, observando las condiciones y procesos generales para la producción de éste empleando como sustratos el agua de lavado de café y glicerina residual de biodiesel (16).

También existen estudios acerca empleo del agua de lavado de pulpa de café como sustrato para la producción de biogás, estos fueron realizados por:

- Yurrita Flores (1982) realizó un estudio sobre la Generación de Biogás a partir de jugo de pulpa de café, en el que se obtuvo que el jugo de pulpa de café resulta ser un sustrato adecuado para la fermentación anaeróbica (1).
- De León De Paz (1980) realizó un estudio sobre la Evaluación de la Producción de Biogás a partir de desechos derivados del beneficiado del café, en el que se obtuvo que el sustrato más efectivo es la pulpa fresca de café, exhibiendo una biogás de mayor concentración en metano a tiempos de residencia mayores (3).

#### B. Fermentación anaeróbica

La fermentación anaeróbica es la habilidad de ciertos microorganismos para crecer en un medio ausente de oxígeno. La fermentación metanogénica es el proceso en el cual bacterias anaerobias producen metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a partir de material orgánico complejo; esta mezcla de gases se conoce como biogás. Las bacterias productoras del biogás son estrictamente anaeróbicas. Se caracterizan por su sensibilidad a los cambios ambientales. Las etapas que intervienen en la fermentación metanogénica son:

- La fase de hidrólisis: se da la degradación de la materia orgánica hasta obtener ácidos orgánicos de cadena corta, siendo una fase realizada por microorganismos anaeróbicos;

- La fase de acidificación: se da la degradación de los ácidos orgánicos llevándolos a ácido acético y sus derivados, es realizado por microorganismos anaeróbicos facultativos. Se remueven las trazas de oxígeno disuelto, y se produce principalmente ácido acético, y son liberados dióxido de carbono y gas hidrógeno;
- La fase metanogénica: los microorganismos anaeróbicos estrictos, o bacterias metanogénicas, tienen como principal sustrato al ácido acético, que es convertido a metano y a dióxido de carbono. Al mismo tiempo se pueden tener microorganismos que reduzcan el dióxido de carbono a metano, empleando el gas hidrógeno (1).

### C. Biogás

El Biogás es originado por la descomposición de materia orgánica por bacterias anaeróbicas de la especie metanobacterias, de los géneros *Methanosarcina sp.* *Methanobacterium sp.* *Methanobhrix sp.* (2), estas bacterias están presentes principalmente en el estiércol animal, en la Tabla No 1, se observa la relación entre cada tipo de estiércol animal y su correspondiente producción de biogás.

Tabla No1.

Relación ente la producción de metano y el origen del estiércol utilizado en un biodigestor

Especie	Kg estiércol/día	% CH <sub>4</sub> producido
Cerdos	4,5 - 6	65 – 70
Vacunos	25 -40	65
Equinos	12 - 16	65
Ovinos	2,5	63
Aves	0,06	60
Caprinos	1,5	-

Fuente CHYNOWETH, D. y ISAACSON, R. 1987. "Anaerobic digestion of biomass". Editorial London Elsevier Applied Science. Inglaterra. Pp. 10

El biogás está compuesto principalmente por aproximadamente 60%-70% de metano ( $\text{CH}_4$ ) y 30%-40% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), con trazas de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Su valor energético se encuentra entre 20-25 Mega joules/ $\text{m}^3$  (3). El biogás puede ser empleado como combustible en las cocinas o iluminación, y en grandes instalaciones se puede utilizar para alimentar un motor que genere electricidad. La conveniencia del empleo de biogás consiste en que es un gas económico y constituye una fuente de energía renovable.

Las fuentes renovables de energía se basan en los flujos y ciclos naturales del planeta. Estas son aquellas que se regeneran y que usadas con responsabilidad no destruyen el medio ambiente. Incrementar la participación de las energías renovables, asegura una generación de electricidad sostenible a largo plazo, reduciendo la emisión de  $\text{CO}_2$ , y demás gases de efecto invernadero (como lo son el metano y los óxidos de nitrógeno).

#### D. Biodigestor

Un biodigestor es un sistema diseñado para el aprovechamiento del proceso de la digestión anaerobia realizado por bacterias específicas de los géneros *Methanosarcina sp.*, *Methanobacterium sp.*, *Methanobhrrix sp.*, procedentes principalmente del estiércol, para transformar la materia orgánica en biogás y fertilizante orgánico (2).

##### 1. Tipos de biodigestor

- Sistema discontinuo: Este tipo de digestor se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que ha dejado de producir biogás. La producción de biogás en este tipo de digestores es de 0,5 a 1,0  $\text{m}^3$  biogás/ $\text{m}^3$  digestor (4,5).

- Sistemas semi-continuos: Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o residencia y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación. La producción de biogás en este tipo de digestores es de 0,1 a 0,4  $\text{m}^3$  biogás/ $\text{m}^3$  de digestor (4,5).

- Sistemas continuos: Este tipo de digestores se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas residuales. En general son plantas muy grandes. La producción de biogás en este tipo de digestores es de 0.8 a 1,0 m<sup>3</sup> biogás/m<sup>3</sup> de digestor (4,5).

### E. Factores de control para la producción de biogás

La actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversos factores. Debido a que cada grupo de bacterias que intervienen en las distintas etapas del proceso responde en forma diferente a esos cambios, no es posible dar valores cualitativos sobre el grado que afecta cada uno de ellos a la producción de gas en forma precisa. Entre los factores más importantes están (1,5,6,7):

- Tipo de materia prima
- Temperatura del sustrato
- Velocidad de carga volumétrica
- Tiempos de residencia
- Valor de acidez (pH)
- Contenido de sólidos
- Agitación - mezclado
- Inhibidores

#### 1. Tipo de materia prima

Las materias primas fermentables se incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias, restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores) (1,6).

## 2. Temperatura del sustrato

Se tiene actividad biológica dentro del biodigestor, y por lo tanto la producción de gas, aumenta con la temperatura, esto debido a que se incrementa la reproducción bacteriana dentro de un rango de temperatura entre 20 °C a 75 °C. Al mismo tiempo al no ser un proceso exotérmico, la temperatura deseada debe mantenerse mediante la aplicación de energía externa para que el sistema llegue a la temperatura de 45 °C (1,6).

## 3. Velocidad de carga volumétrica

Se designa un volumen adecuado de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor para que la producción de biogás sea óptima, y no exista un exceso de materia ya descompuesta. Este valor tiene una relación inversa con el tiempo de residencia, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de residencia necesario (1,5).

## 4. Tiempo de Residencia

Es el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los sistemas discontinuos. De acuerdo al diseño del reactor, el mezclado y la forma de extracción de los efluentes pueden existir diferencias entre los tiempos de residencia de líquidos y sólidos. El tiempo de residencia está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. Generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como lo es la celulosa, demandan mayores tiempos de residencia para ser totalmente digeridos. La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de residencia y por lo tanto serán menores los volúmenes de carga de material orgánico (5,7).

## 5. Valor de acidez (pH)

Una vez estabilizado el proceso de digestión, el pH se mantiene en valores que oscilan entre 7.0 y 8.5; siendo valores entre 7.0 y 7.2, los óptimos para la generación de biogás. Debido a los buffer que producen los equilibrios dióxido de carbono – bicarbonato

( $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{CO}_3$ ) y el equilibrio Amoníaco – Amonio ( $\text{NH}_4^+ - \text{NH}_3$ ), el proceso en sí mismo tiene capacidad de regular diferencias en el pH del material de entrada (1).

## 6. Contenido de sólidos

La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos por lo que puede verse afectada la eficiencia en la producción de biogás. La eliminación y reducción de la cantidad de material sólido, es necesario para que el proceso no se afecte, al final se obtiene abono orgánico (5).

## 7. Agitación - mezclado

Mediante la agitación se espera: la remoción y liberación de los compuestos producidos por las bacterias metanogénicas. Se de la mezcla del sustrato con la población bacteriana presente. Tener una uniformidad en la densidad bacteriana; evitar la formación de espacios sin actividad biológica (1,5).

## 8. Inhibidores

La presencia de metales, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso de biodigestión (7). En la Tabla No. 2 se presentan las concentraciones a las cuales diferentes compuestos presentan efectos inhibidores sobre las bacterias metanogénicas.

Tabla No.2 Valores de concentraciones de ciertos inhibidores comunes.

Inhibidores	Concentración Inhibidora
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	5.0 ppm
NaCl	40.0 ppm
Nitrato	5.0 ppm
Cu <sup>+2</sup>	100.0 ppm
Cr <sup>+3</sup>	200.0 ppm
Ni <sup>+2</sup>	200.0-500.0 ppm
Detergente sintético	20.0-40.0 ppm
Na <sup>+</sup>	3.5-5.5 ppm
K <sup>+</sup>	2.5-4.5 ppm
Ca <sup>+2</sup>	2.5-4.5 ppm

Fuente: Sanchez, E.; et.al. 2001. Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. Process Biochemistry. Pp.239

## F. Materiales o Sustratos para la producción de biogás

Los desechos industriales son desperdicios orgánicos e inorgánicos descargados por empresas industriales o comerciales. En la producción de biodiesel se genera glicerina, que constituye el 20% del total de la reacción, siendo este un subproducto, que actualmente no tiene ninguna aplicación; al igual que se da, con el agua del lavado de la pulpa de café, la que proviene del proceso de tratamiento del café con el que se eliminan la mayoría de sus impurezas. Estos dos desechos industriales son descartados, generalmente, en cuerpos acuáticos, como ríos o lagos, en los cuales se da un aumento de la presencia de material orgánica, y disminución de los niveles de oxígeno disuelto, lo que provoca un desequilibrio en el ecosistema.

### 1. Agua de lavado de la pulpa de café

El café es un cultivo con más de 150 años de historia dentro de Guatemala. Debido a los años en que el café ha sido parte de la actividad económica nacional, es considerado el producto agronómico más importante de Guatemala hasta al año 1990 (8).

El período de la cosecha de café se sitúa entre los meses de septiembre y abril, dependiendo de la altitud. Durante la cosecha, los productores realizan al menos cuatro cortes, en el primero y el último se concentran los granos con mayores problemas de calidad, mientras que en los cortes intermedios, cosechan solo grano maduro (8).

Mediante el procesamiento vía/método húmedo del café, se obtiene este con una alta calidad. Este proceso es fundamental para que el grano presente una buena apariencia y la calidad adecuada para su exportación. Este método requiere grandes cantidades de agua. Las principales etapas (3,8):

- Recolección: el café es cortado a mano y luego transportado en sacos hasta los beneficios húmedos.
- Clasificación previa: con esta labor se asegura que sólo sean procesados los frutos que tienen el punto óptimo de maduración.
- Recepción: en el cual se separan los frutos de mejor calidad, para garantizar la calidad del producto.
- Despulpe: en esta etapa los frutos de café son despojados de la pulpa o epicarpio por medio del empleo de un aparato llamado Pulpero.
- Lavado-Clasificación: el grano se lava con agua, para su total separación de la pulpa.
- Secado: Esta operación se lleva a cabo en extensos patios.
- Descascabillado: separación del cascabillo del grano ya seco.

El agua es utilizada en casi todas las operaciones del beneficiado vía húmeda del café. Se tiene reportado consumos de aproximadamente 30 litros de agua por kilogramo de café procesado. Las aguas de despulpado son generalmente ricas en carbohidratos, y las aguas de clasificación son ricas en pectinas y derivados (3).

## 2. Glicerina residual del proceso de biodiesel

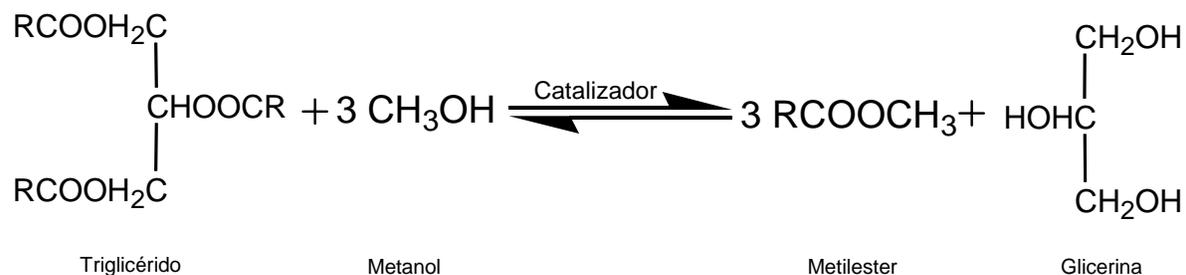
Se denomina biocombustible a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa. Estos combustibles sustituyen parte del consumo de los combustibles fósiles tradicionales,

como lo son el petróleo o el carbón. Los biocombustibles más usados son el bioetanol y el biodiesel (9).

El biodiesel, se fabrica a partir de aceites vegetales, el proceso comprende una reacción de transesterificación, la reacción química se muestra en la gráfica No 1, donde un aceite o grasa reacciona en presencia de alcoholes ligeros, utilizándose un ácido mineral como catalizador, para dar ésteres de ácidos grasos (9,10).

Grafica No. 1

Ecuación química de la transesterificación de un triglicérido de ácido graso para la obtención de biodiesel.



Fuente: Larosa, R. 2001. Proceso para la producción de biodiesel (metiléster o ésteres metílicos de ácidos grasos). Consultado el 16 de septiembre de 2009. Disponible en: <http://www.inia.org.uy>. Pp. 4

El alcohol que generalmente se utiliza es metanol, aunque pueden usarse otros alcoholes ligeros como etanol, propanol o butanol. La glicerina es un subproducto de la producción de biodiesel a partir de grasa vegetal, esta es relativamente limpia cuando se emplea aceite vegetal virgen, por lo que este tipo de subproducto no ocasiona un problema ambiental; mientras que la utilización de aceite proveniente de procesos de cocción y es usado para la producción de biodiesel genera glicerina con una alta contaminación, y su purificación tiene un alto costo. Este tipo de glicerina si es un contaminante ambiental, en la actualidad no se ha encontrado una manera viable para tratar dicho desecho (9,10).

## G. Análisis de Biogás

Debido al estado gaseoso que presenta el metano, al análisis del biogás se realiza principalmente por medio de la cromatografía de gases.

La cromatografía de gases es una técnica de separación en la que la elusión se produce por el flujo de una fase móvil, la que es un gas inerte (no interacciona con las moléculas del analito), y la separación de los analitos se desarrolla dentro de una columna cerrada en la que se encuentra retenida la fase estacionaria (11).

La evaluación de la proporción del metano en el biogás sirve de soporte para el monitoreo de la efectividad del proceso de digestión anaeróbica. El análisis se realiza utilizando un cromatógrafo de gases, provisto de un detector de conductividad térmica (TCD) y una columna empacada con DVB (divinilbenceno), el cual es un componente apolar que ayudará a la mayor retención del metano dentro de la columna (12). La temperatura a utilizar es de aproximadamente 200 °C dentro del horno, debido a que a mayor temperatura el metano puede no ser retenido por la columna, perdiendo el analito y total o parcialmente el cromatograma. Ésta metodología ha sido modificada a partir de la reportada por Marín (2007) en el estudio sobre la Optimización de un método para la determinación simultánea de H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> por cromatografía gas-sólido en biorreactores anaeróbicos (12).

## IV. JUSTIFICACIÓN

Debido a la problemática energética mundial, es necesario encontrar fuentes alternativas con las cuales solventar dicha situación, lo que se ha reflejado en el empleo de las energías renovables, las que provienen de fuentes energéticas naturales y virtualmente inagotables. En la actualidad aproximadamente el 80% de la energía mundialmente utilizada proviene del uso de combustibles fósiles o del empleo de derivados de éstos; esto equivale a un consumo anual aproximadamente de 28.50 billones de barriles de petróleo, 1.5 billones de toneladas de carbón, 10 millones de metros cúbicos de gas metano (13).

La generación de biogás es realizado por las bacterias metanogénicas, las que se caracterizan por el hecho de que su metabolismo es estrictamente anaeróbico y que están presentes principalmente dentro del estiércol animal. La producción de metano se da aproximadamente a 45 °C y un pH de 7.0, teniendo en cuenta que las bacterias metanogénicas son muy susceptibles a los cambios físicos y químicos que se den en el medio, por lo que las condiciones dentro de los biodigestores deben ser lo más próximas a éstas. Los usos del biogás son variados, pero principalmente es utilizado como combustible de bajo poder calorífico.

La fermentación anaeróbica de la mezcla de agua de lavado de café y glicerina residual de biodiesel, para la producción de biogás, implica el uso de sustancias de origen orgánico que pueden ser consideradas como sustratos para la fermentación anaeróbica y es una manera de aprovechar los desechos industriales, que no tienen un uso determinado y que constituyen un foco de contaminación, y al mismo tiempo darle un valor agregado a los mismos.

Se tiene reportado consumos entre 6.7 – 28.1 litros de agua por kilogramo de café procesado, los que regularmente terminan en los cuerpos de agua adyacentes al beneficio de café que los utilice, dando lugar a que se pueda dar un proceso de eutrofización en dicho

cuerpo acuático (3). También es de notar que actualmente se cuenta con una capacidad de producción aproximada de 4000 galones de agua residual al día en el país. La producción de biodiesel tiene una generación aproximadamente de 800 galones de glicerina residual (15, 9).

El proceso de producción de biogás se da dentro de biodigestores, los que son recurrentes en ambientes agrícolas. Debido a que las comunidades rurales tienden a tener mayor uso de estos sistemas, es importante determinar si las sustancias y las condiciones que emplean para la generación de biogás, son las mejores; partiendo de éste punto, el presente estudio puede ser un punto de partida para el análisis, monitoreo y optimización en la producción de biogás. La identificación y caracterización del gas producido, se realizará a través de cromatografía de gases, con la que se espera se pueda comprobar la presencia de metano; la importancia del análisis del biogás radica en concretar o fundamentar de manera consistente las condiciones de análisis para este tipo de analito en cromatografía de gases.

## V. OBJETIVOS

### General

Determinar cualitativamente la presencia de metano, componente mayoritario en el biogás, proveniente de la fermentación anaeróbica de varias mezclas de agua de lavado de café, glicerina residual del proceso de producción de biodiesel y estiércol bovino empleando cromatografía de gases con detector de captura de electrones.

### Específicos

1. Determinar la proporción de la mezcla de agua de lavado de pulpa de café y glicerina residual del proceso de producción de biodiesel, en el que se de la mayor producción de biogás.
2. Diseñar y fabricar microbiodigestores para la producción de biogás a pequeña escala.
3. Monitorear los cambios que se den en los parámetros, tales como: volumen de gas producido, pH, presión interna dentro de los biodigestores durante la fermentación anaeróbica.
4. Caracterizar el biogás resultante de la fermentación anaeróbica de los sustratos por medio de la técnica de Cromatografía de Gases.

## VI. HIPÓTESIS

Al analizar el biogás proveniente de la fermentación de la mezcla de agua de lavado de café y glicerina residual de biodiesel por cromatografía de gases con detector de captura de electrones, se obtiene la detección efectiva del metano, como componente mayoritario de éste.

## VII. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Universo de trabajo

Universo de trabajo: mezcla de glicerina residual del proceso de Biodiesel y agua de lavado de la pulpa de café, consistente en 5 galones de glicerina residual del proceso Biodiesel proporcionada por Guatebiodiesel y 5 galones de agua de lavado de la pulpa de café proporcionada por Beneficio San Antonio, Nueva Santa Rosa, Santa Rosa.

### B. Material y Equipo

Equipo:

- Cromatógrafo de Gases Agilent 6890N GC con detector de captura de electrones
- Jeringa cromatográfica para gases
- Columna capilar apolar AT-PETRO
- Estufa eléctrica
- Baño de maría
- Conductímetro
- Potenciómetro
- Mechero Bunsen

Material y Cristalería:

- Frascos plásticos de 1 Lt
- Corchos de hule
- Bolsas plásticas
- Vasos de precipitados
- Erlenmeyer
- Termómetro
- Probeta
- Mortero y pistilo de porcelana

Reactivos:

- Gas patrón de metano
- Gas Nitrógeno
- Acetato de sodio
- Óxido de calcio
- Hidróxido de sodio
- Ácido acético
- Carbonato de sodio

### C. Procedimiento

- Fabricar microbiodigestores

1. Fabricación de microbiodigestores discontinuos utilizando envases plásticos de un litro de capacidad.
2. Adaptación de bolsas de otro polímero plástico a cada microbiodigestor para la captura del gas, como se observa en la Gráfica No. 2. (Anexo 1).

- Producción de Biogás:

1. Realización de las diferentes mezclas de agua de lavado de pulpa de café y de glicerina residual de biodiesel dentro de los envases plásticos a forma de tener un volumen aproximado de 300 ml., como se presenta en la Tabla No. 3 (Resultados).
2. Inoculación de las bacterias, mediante la inclusión de 250 gr. de estiércol bovino fresco a cada uno de los microbiodigestores.
3. Medición del pH inicial. En el caso necesario, corregir el pH utilizando solución saturada de bicarbonato de sodio o ácido acético para que se encuentre alrededor de 7.0.
4. Colocación de los microbiodigestores dentro de un baño de maría, manteniendo la fermentación aproximadamente a los 45 °C.
5. Monitoreo durante tres semanas del volumen y la presión del gas generado y la temperatura externa.

6. Realización de pruebas de presencia de productos de la fermentación anaeróbica.

- Preparación de gas patrón de metano:

1. Pesar 16 g. de acetato de sodio, 20 g. de hidróxido de sodio y 20 g. de óxido de calcio (CaO).
2. Colocar los compuestos, previamente mezclados con un mortero, dentro del Erlenmeyer. Armar el sistema para la generación del gas patrón, como se observa en la Gráfica No. 3. (Anexo 2).
3. Calentar, con flama directa, el Erlenmeyer, a medida que el material sólido se funde.
4. Cuando se dé la generación del gas metano, capturarlo en bolsa de polímero plástico (la misma que es utilizada para la captura de biogás).

Realización del análisis del biogás generado, utilizar un cromatógrafo de Gases Agilent 6890N GC, provisto con un detector de captura de electrones y una columna capilar apolar AT-PETRO, con una longitud de 100 metros, 0.25 mm de diámetro interno y 0.50  $\mu\text{m}$  de capa interna de fase estacionaria. Las condiciones instrumentales son las siguientes:

- Temperatura del inyector: 230 °C.
- Temperatura del detector: 230 °C.
- Temperatura del horno: 200 °C.
- Volumen de inyección: 200  $\mu\text{L}$ .
- Gas de arrastre: nitrógeno.
- Flujo de gas inerte: 30 mL/min.
- Tiempo aproximado de corrida: 15 min.

#### D. Diseño de la investigación

Se realizó una investigación experimental del tipo exploratoria transversal en la que se evaluó el biogás generado por la fermentación anaeróbica de distintas mezclas de agua de lavado de pulpa de café y glicerina residual de biodiesel.

El muestreo fue de tipo no probabilístico constituido por: muestras de estiércol proporcionadas por la Granja Experimental de la Facultad de Veterinaria dentro del Campus Central de la Universidad San Carlos de Guatemala; glicerina residual del proceso Biodiesel, proporcionada por Guatebiodiesel, y agua de lavado de la pulpa de café, proporcionada por el Beneficio San Antonio, Nueva Santa Rosa, Santa Rosa.

Se emplearon microbiodigestores discontinuos, fabricados a partir de envases plásticos, a los que se les adaptó un sistema de captura de gas, constituido por bolsas plásticas.

Treinta microbiodigestores fueron fabricados, manteniendo un volumen constante tanto cuando se tiene las mezclas de sustratos, como cuando se utiliza solamente uno de ellos. A todos estos se les agregó una cantidad constante de estiércol. Con el sistema sellado, se procedió a mantener los sistemas en baño de maría, a temperatura constante, a fin de promover el proceso de fermentación anaeróbico.

Conforme la digestión se llevó a cabo, se aplicó la estadística descriptiva con la que se tuvo una clasificación de resultados de Negativo/Positivo, mediante el empleo de la prueba de combustión. Los biodigestores que demostraron resultados positivos, fueron analizados por cromatografía de gases, empleando una columna apolar y un detector de conductividad térmica, habiéndose modificado las condiciones de análisis según la metodología con que se cuenta.

## VIII. RESULTADOS

Tabla No 3. Datos de las cantidades de ambos sustratos utilizados en el proceso de fermentación anaeróbica.

<b>Microbiodigestor</b>	<b>Agua de lavado de Pulpa de Café (litros)</b>	<b>Glicerina Residual (litros)</b>	<b>Estiércol animal (gramos aprox.)</b>	<b>Producción Biogás</b>
Bd 1	0	0.300	250	Negativo
Bd 2	0	0.250	250	Negativo
Bd 3	0	0.200	250	Negativo
Bd 4	0	0.150	250	Negativo
Bd 5	0	0.100	250	Negativo
Bd 6	0	0.075	250	Negativo
Bd 7	0	0.050	250	Negativo
Bd 8	0	0.025	250	Negativo
Bd 9	0	0.005	250	Negativo
Bd 10	0	0	250	Negativo
Bd 11	0.300	0	250	Positivo
Bd 12	0.250	0	250	Positivo
Bd 13	0.200	0	250	Negativo
Bd 14	0.150	0	250	Positivo
Bd 15	0.100	0	250	Positivo
Bd 16	0.075	0	250	Positivo
Bd 17	0.050	0	250	Positivo
Bd 18	0.025	0	250	Positivo
Bd 19	0.005	0	250	Positivo
Bd 20	0	0	250	Negativo
Bd 21	0.050	0.250	250	Negativo
Bd 22	0.075	0.225	250	Negativo
Bd 23	0.100	0.200	250	Negativo
Bd 24	0.125	0.175	250	Negativo
Bd 25	0.150	0.150	250	Negativo
Bd 26	0.200	0.100	250	Negativo
Bd 27	0.225	0.075	250	Negativo
Bd 28	0.250	0.050	250	Negativo
Bd 29	0.275	0.025	250	Negativo
Bd 30	0.295	0.005	250	Negativo

Fuente: Datos Experimentales.

Tabla No. 4 Parámetro monitoreados en los microbiodigestores utilizados

<b>Microbiodigestor</b>	<b>pH Inicial</b>	<b>pH Final</b>	<b>Volumen generado (cm<sup>3</sup>)</b>
Bd 1	6.89	4.78	200
Bd 2	6.97	5.23	180
Bd 3	7.02	5.59	100
Bd 4	6.99	4.89	400
Bd 5	7.05	5.62	230
Bd 6	7.01	5.87	350
Bd 7	6.90	5.03	150
Bd 8	6.95	4.99	100
Bd 9	7.02	5.47	100
Bd 10	7.01	5.53	100
Bd 11	6.97	7.25	1050
Bd 12	7.07	7.32	750
Bd 13	7.21	7.28	150
Bd 14	7.08	7.29	620
Bd 15	7.05	7.31	550
Bd 16	7.03	7.30	400
Bd 17	7.04	6.18	675
Bd 18	7.01	7.24	480
Bd 19	7.04	7.28	450
Bd 20	6.98	5.69	200
Bd 21	7.01	5.19	100
Bd 22	6.96	5.36	120
Bd 23	6.98	4.88	100
Bd 24	7.06	5.02	190
Bd 25	7.05	4.07	250
Bd 26	7.07	4.53	150
Bd 27	7.04	4.68	100
Bd 28	6.99	3.25	160
Bd 29	7.02	3.76	230
Bd 30	7.01	2.18	200

Fuente: Datos Experimentales.

Tabla No. 5 Datos cromatográficos empleados en el análisis de biogás

Cromatógrafo de Gases Agilent 6890N GC	Detector de captura de electrones
Columna capilar apolar AT-PETRO (100 metros de longitud)	Diámetro interno de la columna: 0.25 mm.
Capa interna de fase estacionaria: 0.50 µm.	
Temperatura del detector: 230 °C	Temperatura del inyector: 230 °C
Temperatura del horno: 200 °C	Gas de arrastre: nitrógeno
Volumen de inyección: 200 µL	Flujo de gas inerte: 30 mL/min
Tiempo de análisis: 17 min	Tiempo de retención aproximado: 9.7 min

Fuente: Datos Experimentales.

Tabla No.6 Resultados cromatográficos de análisis de biogás

Microbiodigestor	Tiempo de retención	Altura de la señal	Área de la señal
Std	9.711	6,171,411	31350214
Bd 11	9.650	15,787,771	64210253
Bd 12	9.654	4,370,727	47037128
Bd 14	9.658	17,119,338	74506770
Bd 15	9.687	18,163,743	75960112
Bd 16	9.670	15,154,994	61879379
Bd 17	Biogás perdido, falla en bolsa recolectora		
Bd 18	9.678	14,056,883	56176867
Bd 19	9.608	6,860,855	102894743

Fuente: Datos Experimentales.

## IX. DISCUSIÓN

El estudio consistió en el diseño y fabricación de microbiodigestores para la producción de biogás a pequeña escala, empleando envases plásticos con capacidad de un litro, en los cuales se mezclaron diferentes proporciones entre glicerina, agua de lavado de café y estiércol de vaca. Los microbiodigestores fueron adaptados a un sistema de captura de gas por medio de bolsas de otro polímero plástico. A cada mezcla se le agregaron aproximadamente 250 g de estiércol de vaca semifresco.

Un baño de María, constituido por una caja metálica, fue utilizado para mantener una temperatura entre 40-50 °C, para el desarrollo de las bacterias, ya que es el intervalo de temperatura óptimo para la obtención de biogás (1,6).

Para comprobar la presencia de metano en el biogás generado, se realizaron pruebas de combustión al gas obtenido en los diferentes biodigestores; ya que como se esperaba que en su mayor proporción fuera metano, el cual es un gas inflamable, se observaría una combustión al paso del biogás generado a través de un mechero de baja combustión, considerando este resultado como una prueba positiva para la presencia de metano; en el caso contrario, se obtendría la sofocación de la llama, por la presencia de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el biogás, ya que este gas no es inflamable.

Dentro de varios microbiodigestores hubo producción de gas; a los cuales se realizó la prueba de combustión, dando un resultado positivo para la presencia de metano en el biogás generado en los microbiodigestores Bd 11, Bd 12, Bd 14, Bd 15, Bd 16, Bd 17, Bd 18, Bd 19. En el caso del microbiodigestor Bd 13, el resultado fue negativo, y teniendo en cuenta que los demás digestores que contaban solamente con agua de lavado de pulpa de café dieron positivo, posiblemente la causa de este resultado sea debido al estiércol utilizado o a que el sistema de biodigestión no se encontraba totalmente sellado.

Se observó que en los microbiodigestores en los cuales se utiliza glicerina residual, no produce biogás y en el caso que se produzca algún gas, es principalmente dióxido de carbono, lo que se comprueba con la prueba de combustión. Esto se observó tanto en los microbiodigestores en los que se utilizó solamente glicerina residual como en los microbiodigestores de mezclas de ambos sustratos. Se observa en los resultados obtenidos, que la presencia de glicerina residual inhibe la producción de metano, como producto final de la biodegradación. La utilización de glicerina residual en el proceso de producción de biogás, se podrá llevar a cabo si se elimina o reduce la concentración de inhibidores presentes en ella; al igual si se tiene un mayor control sobre las condiciones de acidez que varían durante el proceso microbiológico.

De los sistemas de microbiodigestión que dieron positivo a la prueba de ignición, que es un indicador inicial de la presencia de metano en el biogás generado, se inyectó una muestra de 200  $\mu\text{L}$  en un Cromatógrafo de Gases Agilent 6890N GC con detector de captura de electrones, con las condiciones:

- Columna capilar apolar AT-PETRO, con 100 metros de longitud
- Diámetro interno de la columna: 0.25 mm.
- Capa interna de fase estacionaria: 0.50  $\mu\text{m}$ .
- Temperatura del detector: 230 °C
- Temperatura del inyector: 230 °C
- Temperatura del horno: 200 °C
- Gas de arrastre: nitrógeno
- Temperatura máxima: 350 grados Celsius.

A pesar que se conoce que para la detección efectiva de hidrocarburos es preferible el uso de un detector de ionización de flama (12), se empleó el detector de captura de electrones debido que este es el detector con que se contaba, perdiendo así sensibilidad en el análisis.

Inicialmente se inyectó una muestra de Gas Patrón de Metano, para observar el tiempo al cual se obtenía la detección del gas metano. El tiempo de detección se obtuvo mediante la manipulación principalmente del flujo del gas inerte. Inicialmente no se observó un tiempo de retención constante, ya que el flujo del gas inerte era demasiado bajo, ocasionando que el tiempo de detección fuera elevado y que al comparar este tiempo con el de cualquier muestra que se analizara, no diera el mismo tiempo de detección. El flujo del gas inerte se modificó, a manera que este fuera menor, logrando la detección del gas metano en un tiempo de 9.711 minutos.

Como se puede observar en la tabla de los resultados cromatográficos de análisis de biogás (Tabla 6, Resultados), se observa que la detección del gas metano, como componente mayoritario del biogás generado, se logra en un tiempo menor a 9.7 minutos. Se tiene una alta resolución en la señal cromatográfica del biogás generado, lo cual se respalda en una altura de la señal mucho mayor que la del gas patrón, principalmente en el análisis en los microbiodigestores Bd 15 y Bd 16.

En la biodegradación y consecuente generación de biogás, principalmente en los microbiodigestores que cuentan únicamente con agua de lavado de pulpa de café, existe una alta concentración de gas metano, lo que se respalda con los cromatogramas obtenidos. Se determina que el mayor porcentaje de la composición del biogás generado es gas metano.

Debido a que se desconoce la concentración a la cual se encuentra el gas patrón de metano, no se puede hacer una determinación cuantitativa del metano presente en el biogás generado, solamente se hace una relación cualitativa.

Mediante los anteriores análisis, se determina que, a cualquier concentración o cantidad de agua de lavado de pulpa de café que se utilice dentro del biodigestor se tiene una producción de biogás con una alta concentración de metano. Ya que el agua de lavado de pulpa de café es un producto de desecho de la industria cafetalera, tiende a ser una buena

fuentes de materia orgánica, la cual es utilizada por las bacterias metanogénicas para la producción de metano.

La producción de biogás dentro de un biodigestor mediante la fermentación anaeróbica de materia orgánica está determinada, por la presencia de inhibidores, principalmente por la presencia de iones metálicos que en concentraciones muy altas pueden impedir todo el proceso de la biodegradación y por lo tanto limitan la formación de biogás. Estos parámetros no fueron analizados, pero es de tomar en cuenta, ya que debido a que los sustratos son de origen industrial, existe una gran posibilidad de su presencia, independientemente de la concentración a la que se encuentren.

La utilización de la glicerina residual del proceso de biodiesel no completa el proceso de biodigestión, ya que dentro de los microbiodigestores solamente se llega a la fase de acidificación. A pesar de tener una fuente de materia orgánica, la posible presencia de inhibidores, tales como los detergentes y los iones  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , impiden que la formación de metano se lleve a cabo, llegando solamente a la fase de acidificación, que se observa con la producción de dióxido de carbono. Algunas posibles causas de que en la glicerina no se logre la total biodigestión están en que la posible presencia de algún metal o ión que sea perjudicial para las bacterias, que los cambios en el valor de pH que se dan durante el proceso de digestión, afecten el desarrollo de las bacterias, y su consecuente degradación de la materia orgánica presente, o posibles remanentes de sustratos o subproductos químicos del proceso de producción de biodiesel, tales como iones sulfato (provenientes del empleo de ácido sulfúrico).

Se tiene que tomar en cuenta, que a pesar que el agua de lavado de pulpa de café tiene un alto potencial de ser utilizado como fuente de materia orgánica para el proceso de biodigestión, la presencia de la glicerina residual de biodiesel inhibe que este proceso se lleve a cabo en su totalidad, ya que solamente se tiene la producción de  $\text{CO}_2$  y no de metano. Esto se observa en los biodigestores, en los que se propuso emplear una mezcla de ambos sustratos.

## X. CONCLUSIONES

1. La biodegradación, utilizando como sustrato el agua de lavado de pulpa de café, presenta una alta concentración de metano en el biogás producido.
2. Ya que el gas patrón de metano era de concentración desconocida, no se pudo hacer una determinación cuantitativa, solamente una determinación cualitativa.
3. El agua de lavado de pulpa de café se puede utilizar en diferentes cantidades dentro de un biodigestor ya que es una buena fuente de nutrientes, que son utilizados por las bacterias metanogénicas para la producción de metano.
4. La utilización de la glicerina residual del proceso biodiesel no logra completar el proceso de biodigestión dentro de los microbiodigestores, solamente se llega a la fase de acidificación.
5. Aunque la glicerina sea un compuesto de naturaleza orgánica, el empleo de la glicerina residual, impide que la formación de metano se lleve a cabo, posiblemente por la presencia de inhibidores (como detergentes  $\%$  iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), o posibles remanentes de sustancias químicas del proceso de producción de biodiesel (como iones sulfato, provenientes del empleo de ácido sulfúrico).
6. A pesar de que el agua de lavado de pulpa de café presenta un potencia para su uso como fuente de materia orgánica para el proceso de biodigestión, la presencia de la glicerina residual de biodiesel inhibe que éste proceso se lleve a cabo en su totalidad, independientemente de la cantidad en que ambos se encuentren

## XI. RECOMENDACIONES

1. Es importante el empleo de estiércol fresco, ya que las bacterias que llevan a cabo el proceso de biodigestión son anaerobias, y una larga exposición al ambiente limita el número de bacterias presentes.
2. Utilizar un estándar de gas metano, para que con los análisis por cromatografía de gases se obtengan resultados cuantitativos. Y de esta manera poder comparar porcentajes de rendimiento.
3. Realizar un proceso de purificación a la glicerina residual para la eliminación de los posibles inhibidores presentes.
4. Realizar la biodigestión empleando glicerina pura (no residual) para la evaluación de su posible potencial de uso en este tipo de sistemas.
5. Evaluar los procesos de fermentación con otros tipos de bacterias pero utilizando los mismos sustratos.
6. Realizar pruebas de fermentación con glicerina residual de biodiesel y agua de pulpa de café, pero en proporciones con relación menor, o sea con diferencias de volumen más pequeñas.
7. Se sugiere el uso de otros sustratos, que sean considerados desechos o subproductos de reacción de diferentes industrias, para darle un valor agregado a los mismos y disminuir la descarga de los mismos.
8. Se podrá utilizar de glicerina residual en el proceso de producción de biogás, si se determinan las condiciones ideales de acidez en ella.

9. Analizar los iones presentes en la glicerina residual que puedan ser inhibidores de la formación de metano.

## XII. REFERENCIAS

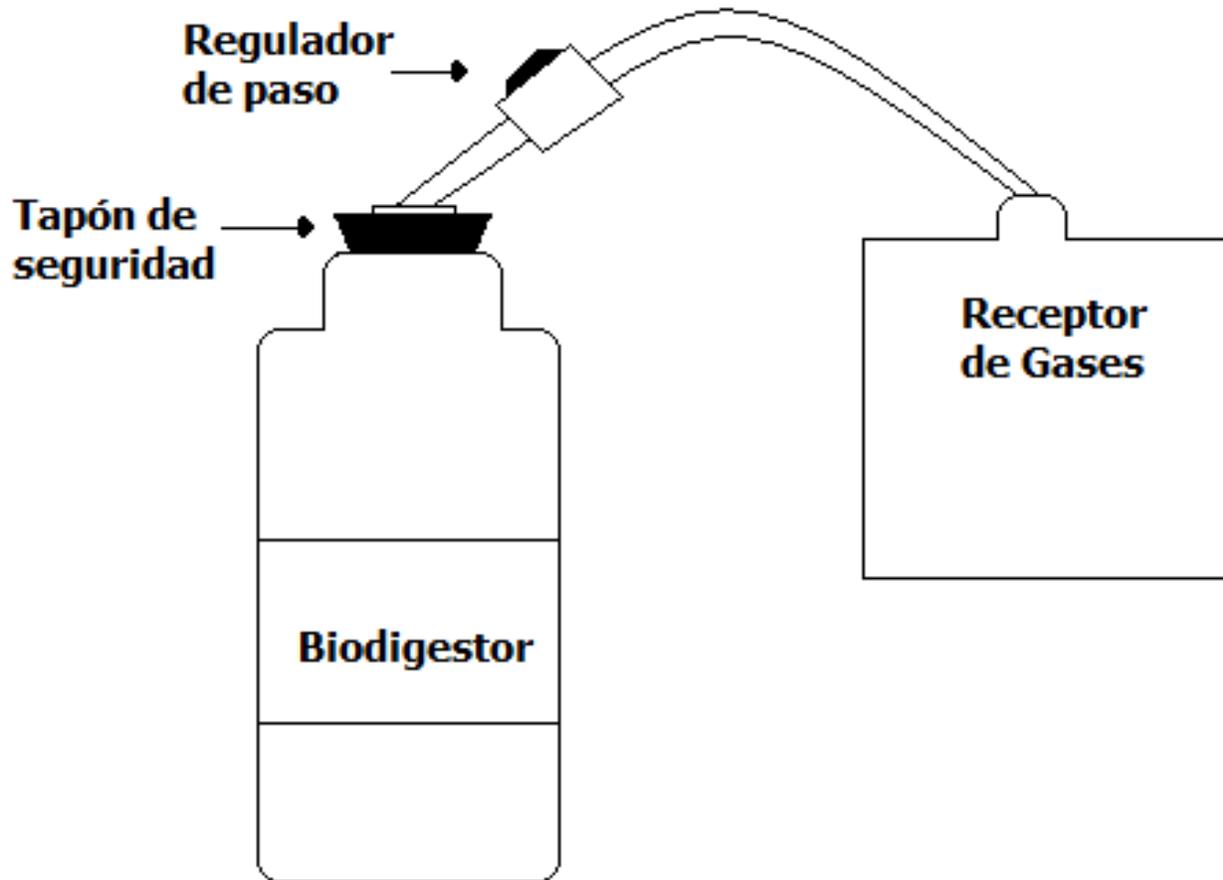
- 1) Yurrita Flores, A. 1982. Generación de Biogás a partir de jugo de pulpa de café. Guatemala. Tesis Licenciado en Ingeniería Química. Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Pp. 5-18
- 2) Chynoweth, D. y Isaacson, R. 1987. Anaerobic digestion of biomass. Editorial London Elsevier Applied Science. Inglaterra. Pp. 7-10
- 3) De León De Paz, O. 1980 Evaluación de la Producción de Biogás a partir de desechos derivados del beneficiado del café. Guatemala. Tesis Licenciado en Ingeniería Química. Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Pp. 9-14,
- 4) Pérez F. 1985. Metodología para la elaboración de un estudio de factibilidad técnico-económico para la construcción de biodigestores en una comunidad. Guatemala. Tesis Licenciado en Ingeniería Química. Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Pp. 23-34
- 5) Biodigestores: una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes. 2005 Fundación Hábitat. Colombia. p. 2-15.
- 6) Castañeda Zamora, H. 1984. Estudio comparativo entre diferentes digestores de alta productividad empleados en procesos de fermentación utilizando jugo de pulpa de café como sustrato. Guatemala. Tesis Licenciado en Ingeniería Química. Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Pp. 27-35
- 7) Sánchez, E.; et.al. 2001. Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. Process Biochemistry. Pp.237-241
- 8) Camacho Nassar, C. y Roux G. 1992. Caracterización de la cadena del café de Guatemala. Consultado el 18 de septiembre de 2007. Disponible en: [www.grupochorlavi.org](http://www.grupochorlavi.org)
- 9) Biodiesel: Handling and use. 2009. Cuarta edición. Estados Unidos. National Renewable Energy Laboratory. Pp. 3, 6-9

- 10) Larosa, R. 2001. Proceso para la producción de biodiesel (metiléster o ésteres metílicos de ácidos grasos). Consultado el 16 de septiembre de 2009. Disponible en: <http://www.inia.org.uy>
- 11) Skoog, D.; et.al. 2001. Principios de análisis instrumental. McGraw Hill. España. Pp. 234-238
- 12) Marín, J.; et al. 2007. Optimización de un método para la determinación simultánea de  $H_2$  y  $CH_4$  por cromatografía gas-sólido en biorreactores anaeróbicos” Multiciencias, septiembre-diciembre, año/Vol. 7, número 003. Universidad de Zulia, Venezuela. Pp. 266-275. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx>
- 13) Spiro, T. y Stigliani, W. 2004. Química Medioambiental. Trad. por Yolanda Madrid. Segunda Edición. España. Editorial Prentice Hall. Pp. 15, 17, 74.
- 14) Acazar, J. G. 2001. ANOVA multifactorial. Departamento de Matemáticas, Universidad de Alcalá. Consultado el 13 de octubre de 2009. Disponible en: <http://www2.uah.es>
- 15) Asociación de Combustibles Renovables – Guatemala. 2007. Consultado el 17 de octubre de 2009. Disponible en: <http://acrguatemala.com>
- 16) Estrada, E. 2008. Determinación y evaluación de la producción de biogás, a partir de una mezcla de agua de lavado de café y glicerina obtenida del proceso de elaboración de biodiesel para una planta artesanal. Proyecto del Fondo para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología (FODECYT) No. 20-2008. Guatemala, Guatemala.

### XIII. ANEXOS

Anexo 1

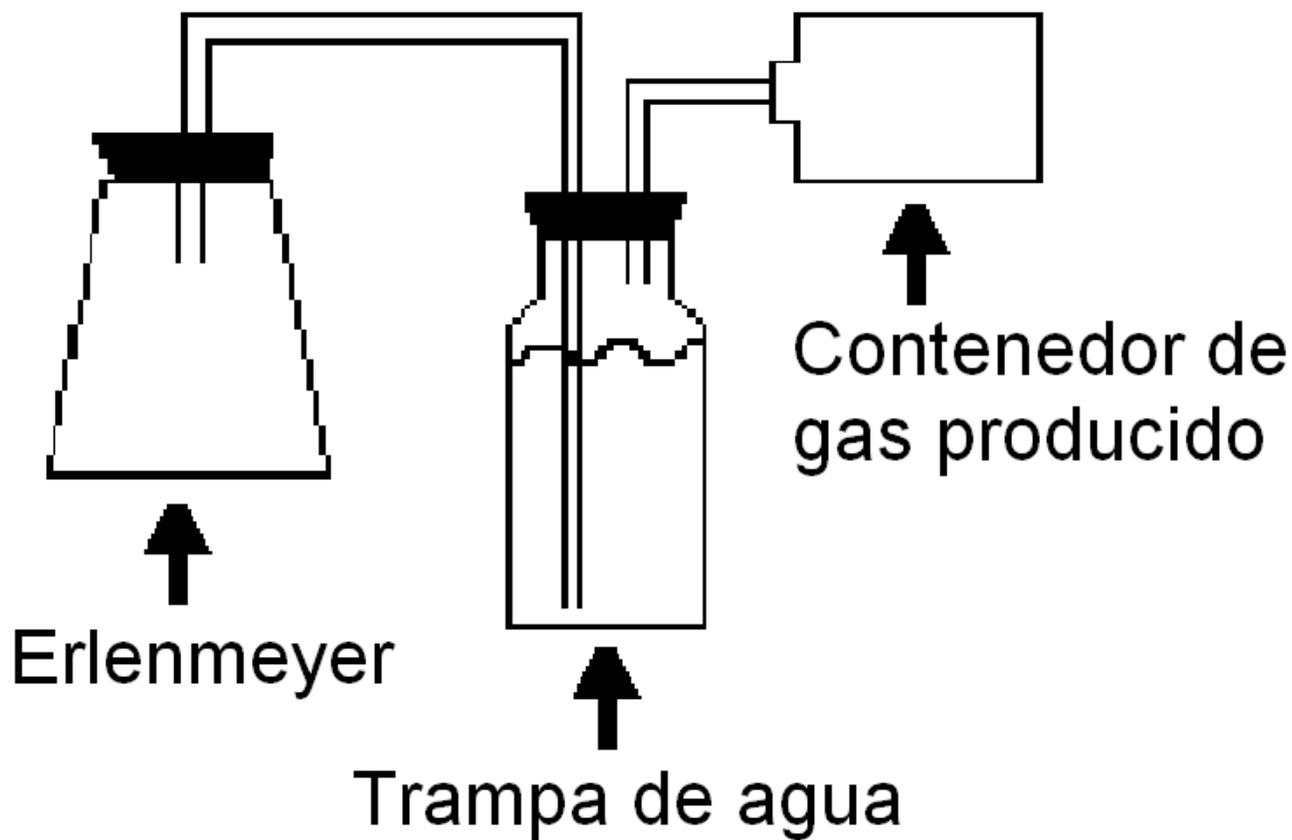
Gráfica 2. Diagrama general del sistema de biodigestión



Fuente: Experimental

Anexo 2

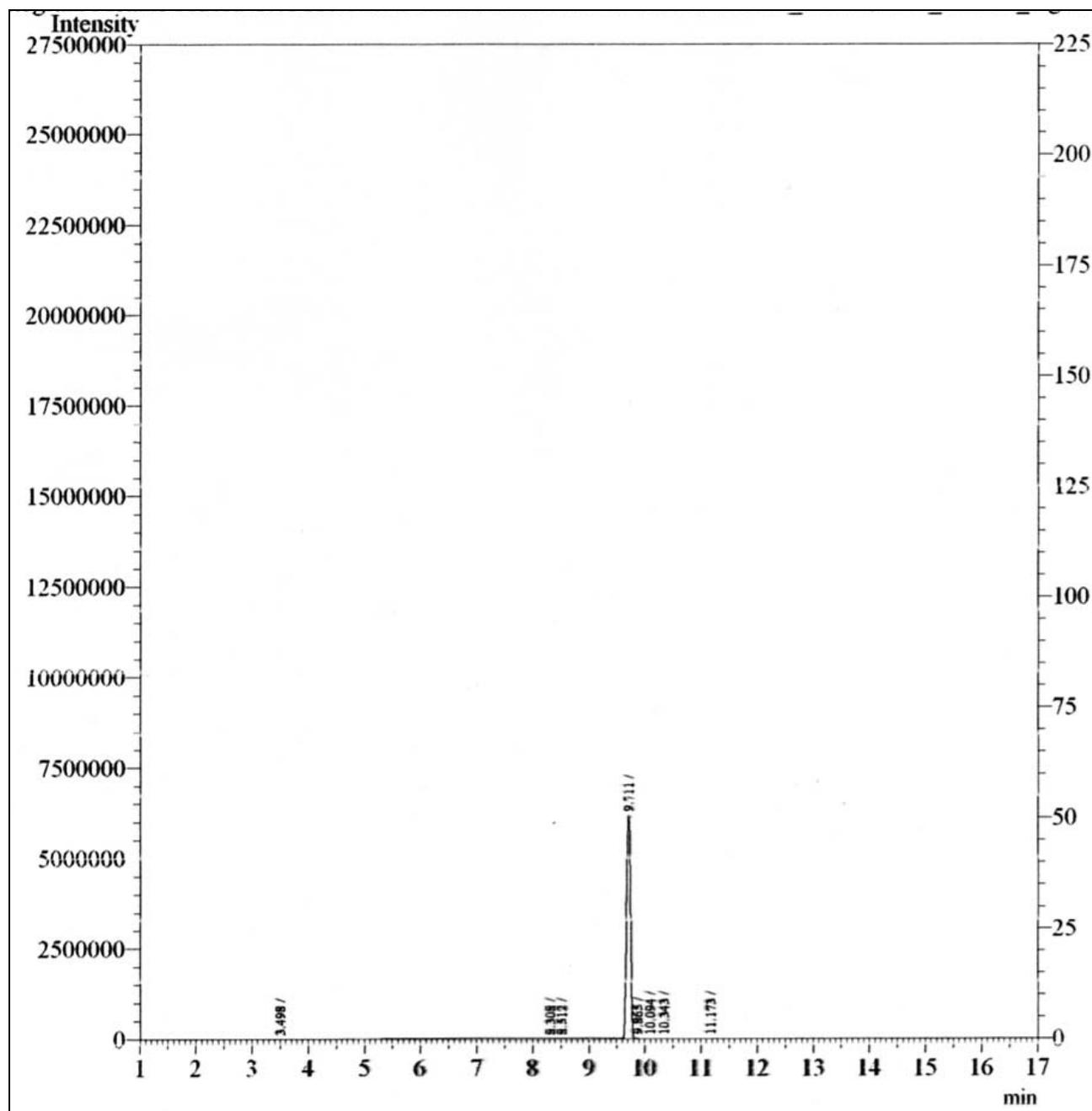
Gráfica 3. Diagrama general del sistema para la generación del gas patrón de metano.



Fuente: Experimental

### Anexo 3

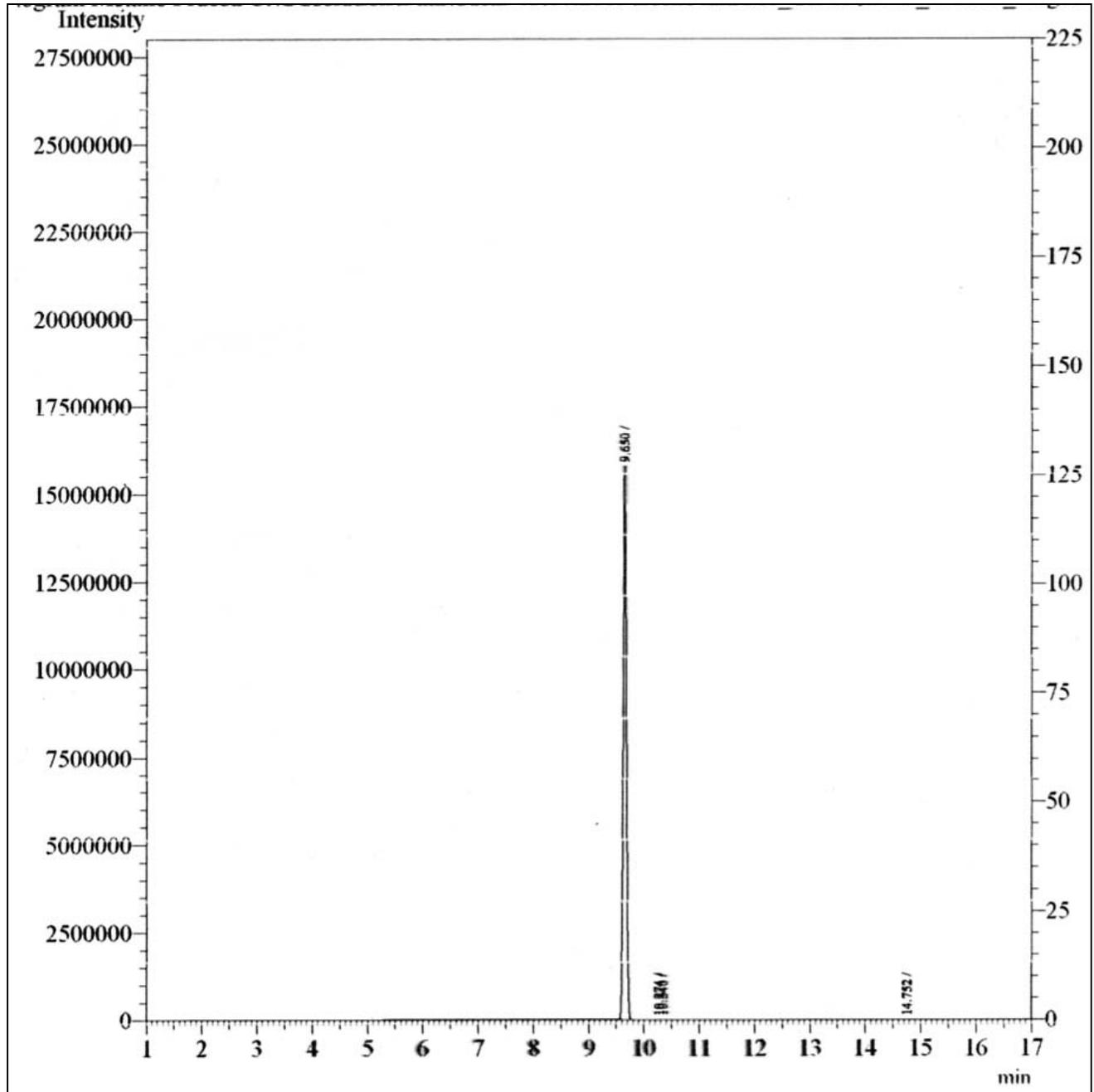
Gráfica 4. Cromatograma de Gas Patrón de Metano.



Fuente: Experimental

Anexo 4

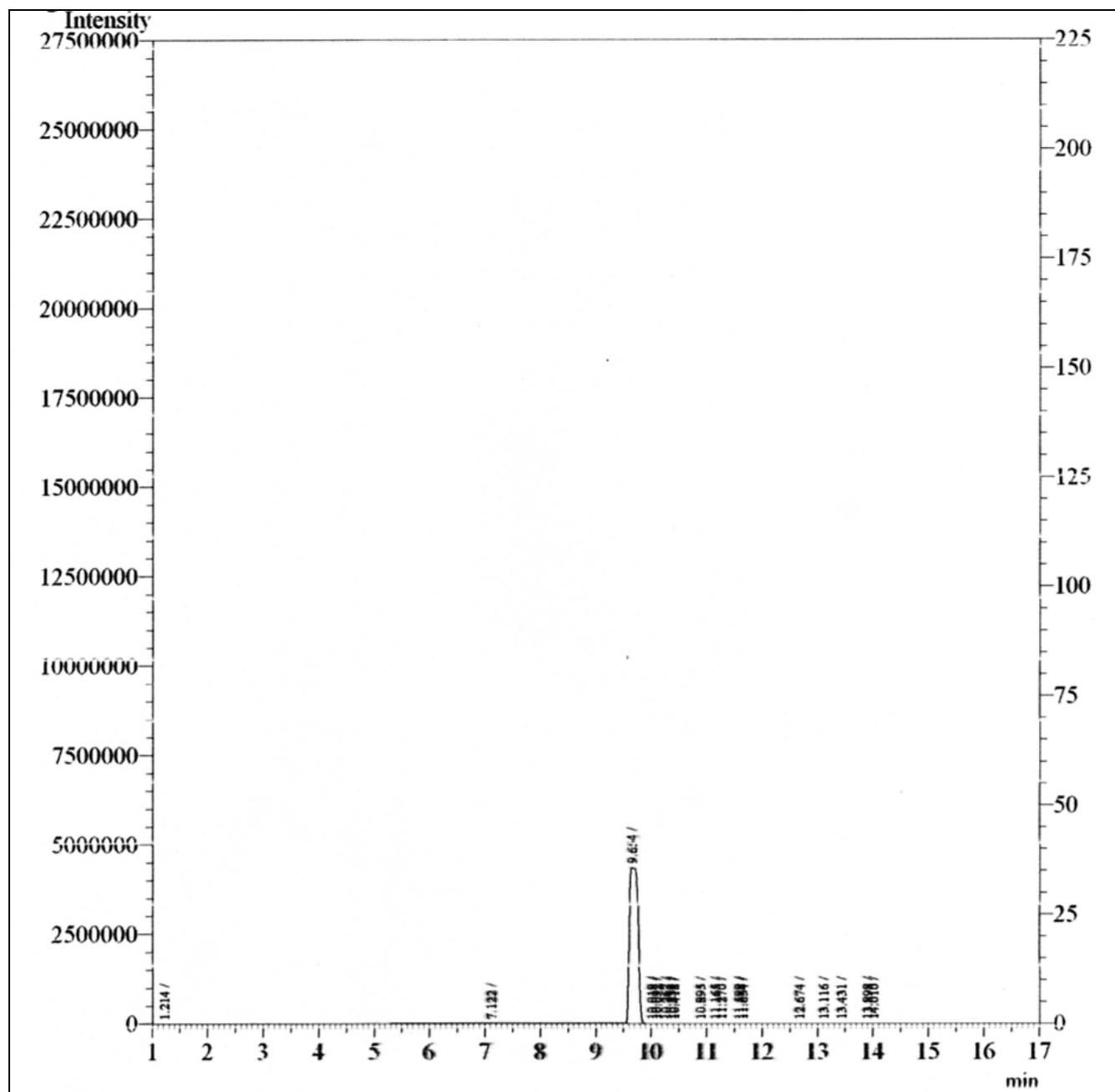
Gráfica 5. Cromatograma del gas producido en el Microbiodigestor A1



Fuente: Experimental

## Anexo 5

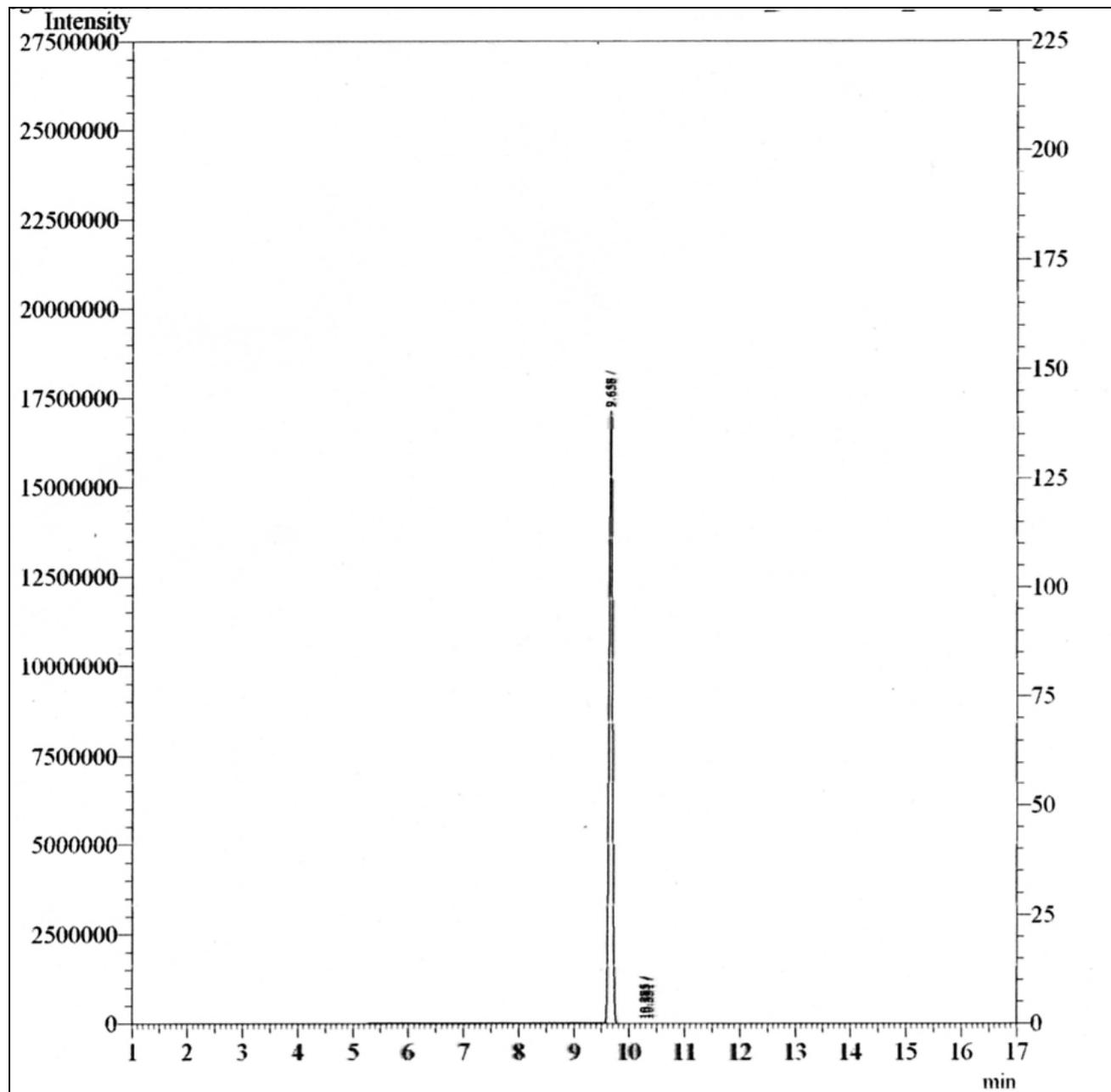
Gráfica 6. Cromatograma del gas producido en el Microbiodigestor A2



Fuente: Experimental

Anexo 6

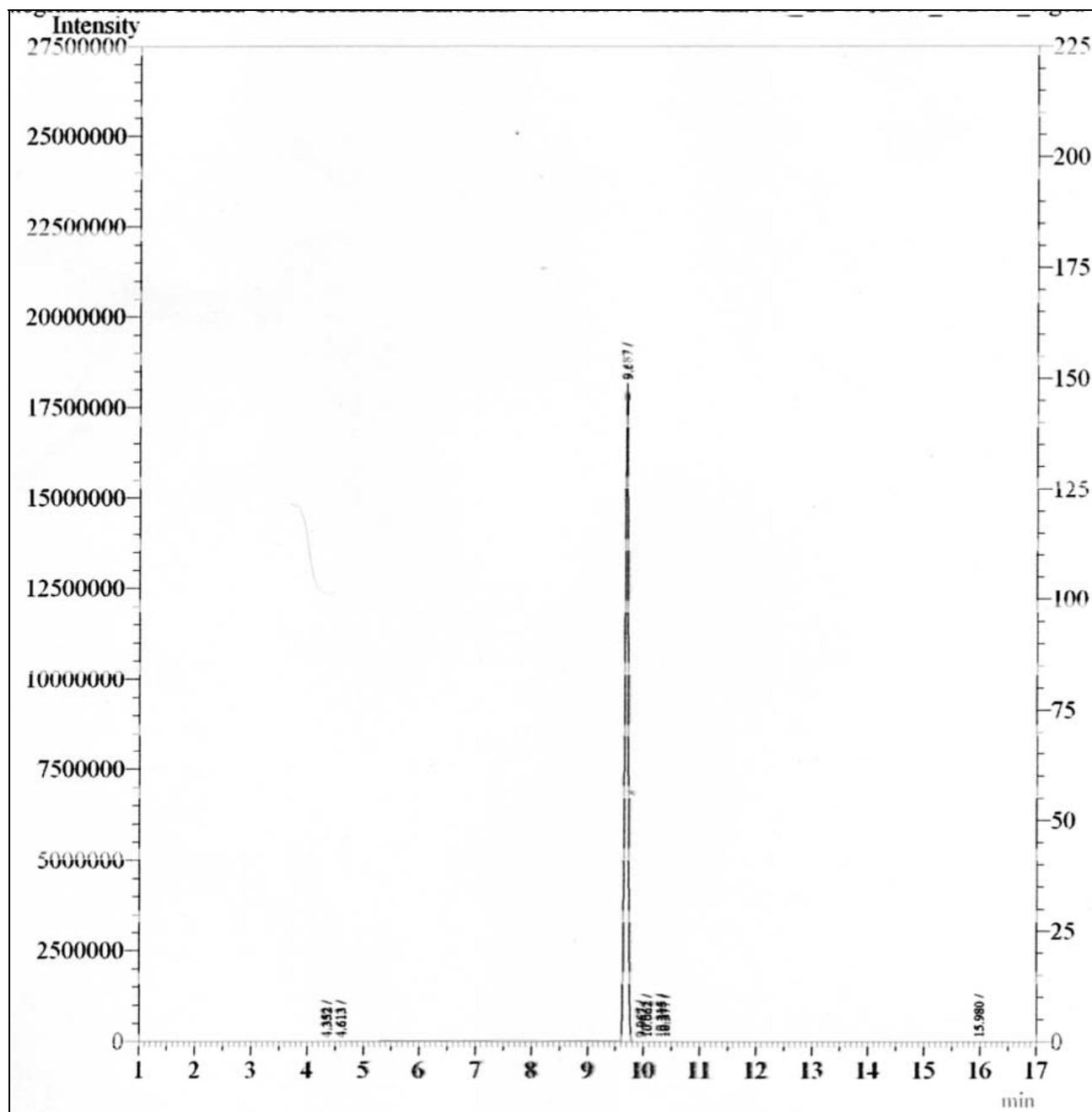
Gráfica 7. Cromatograma del gas producido en el Microbiodigestor A4



Fuente: Experimental

# Anexo 7

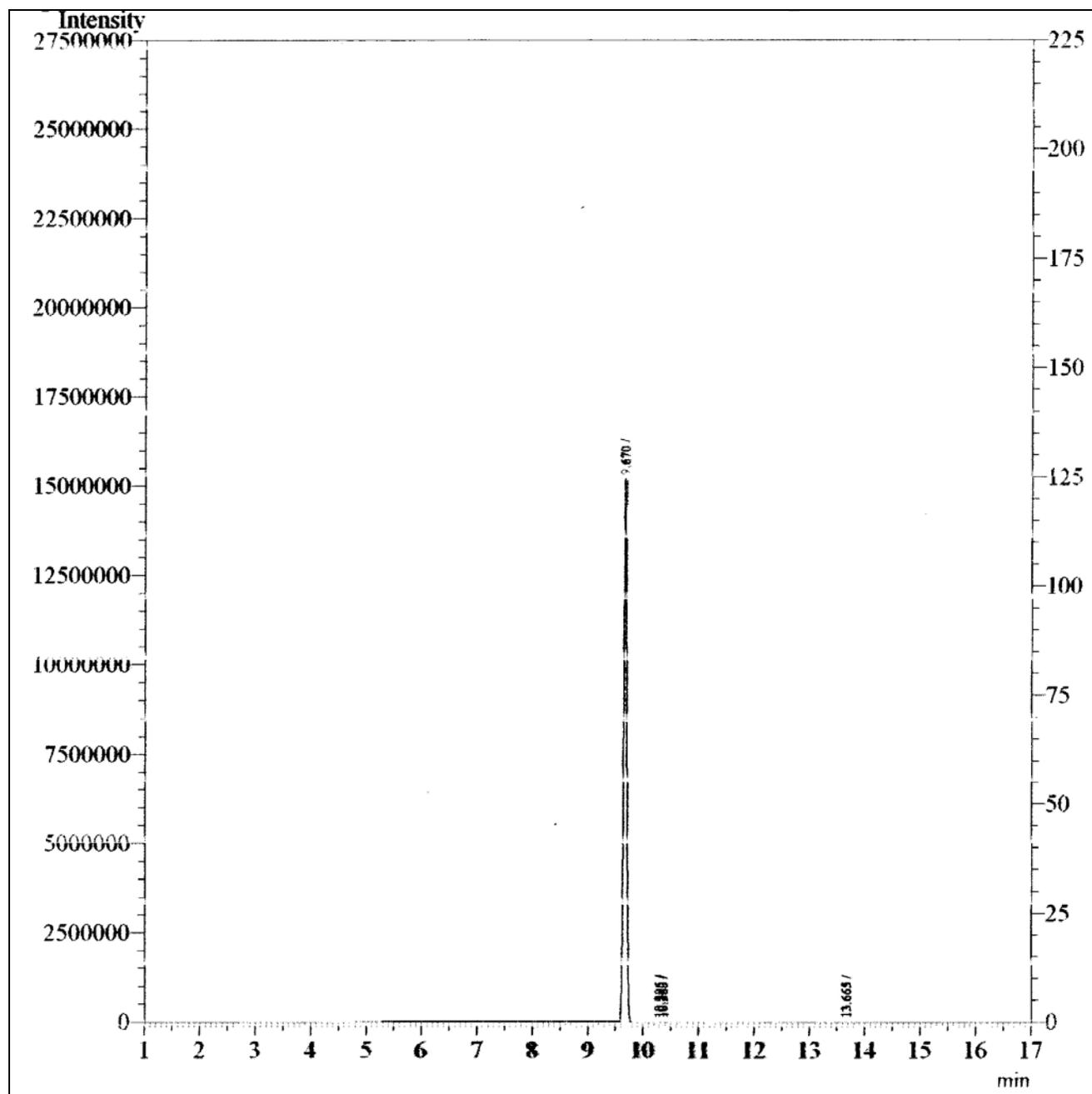
Gráfica 8. Cromatograma del gas producido en el Microbiodigestor A5



Fuente: Experimental

# Anexo 8

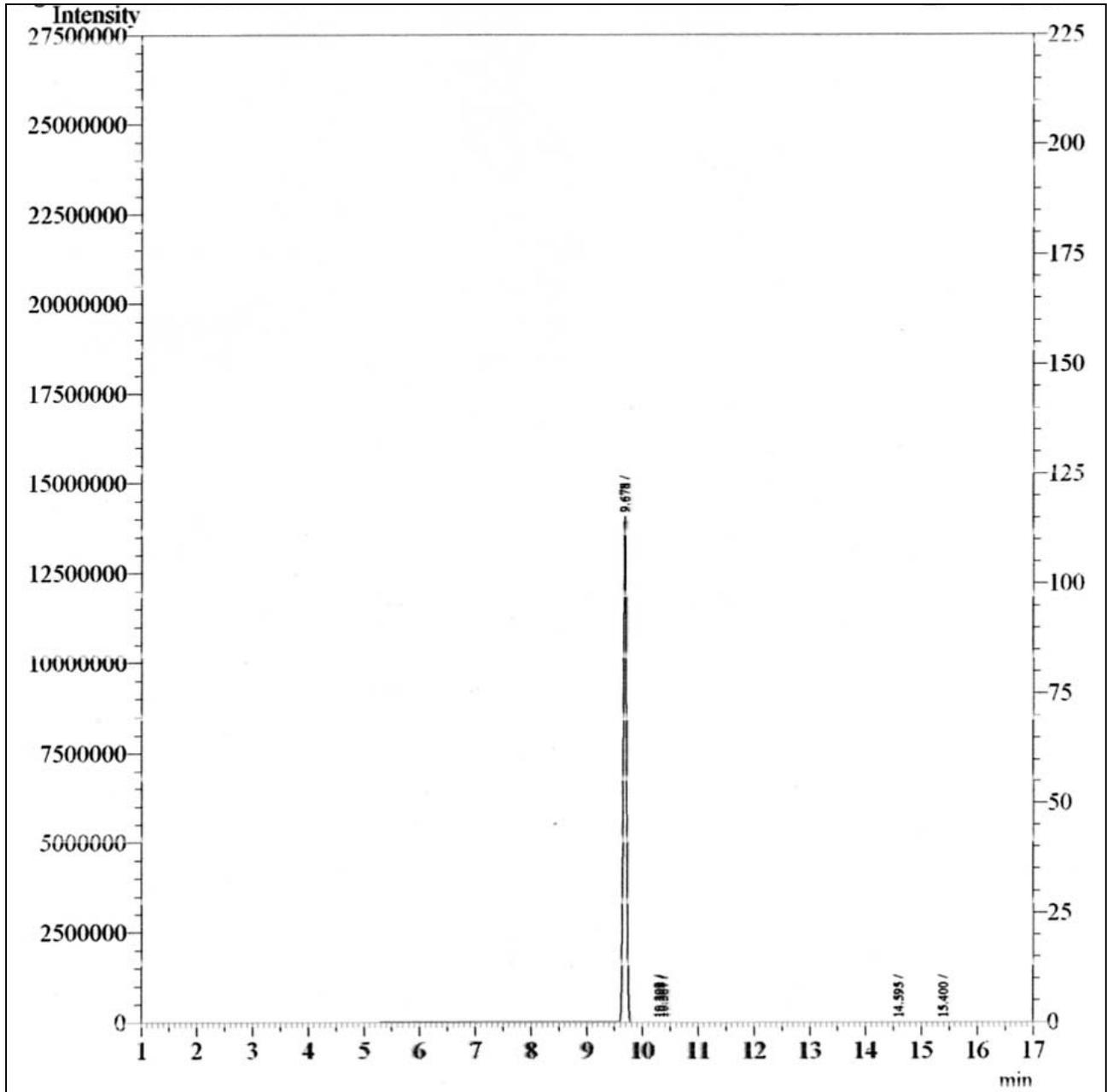
Gráfica 9. Cromatograma del gas producido en el Microbiodigestor A6



Fuente: Experimental

Anexo 9

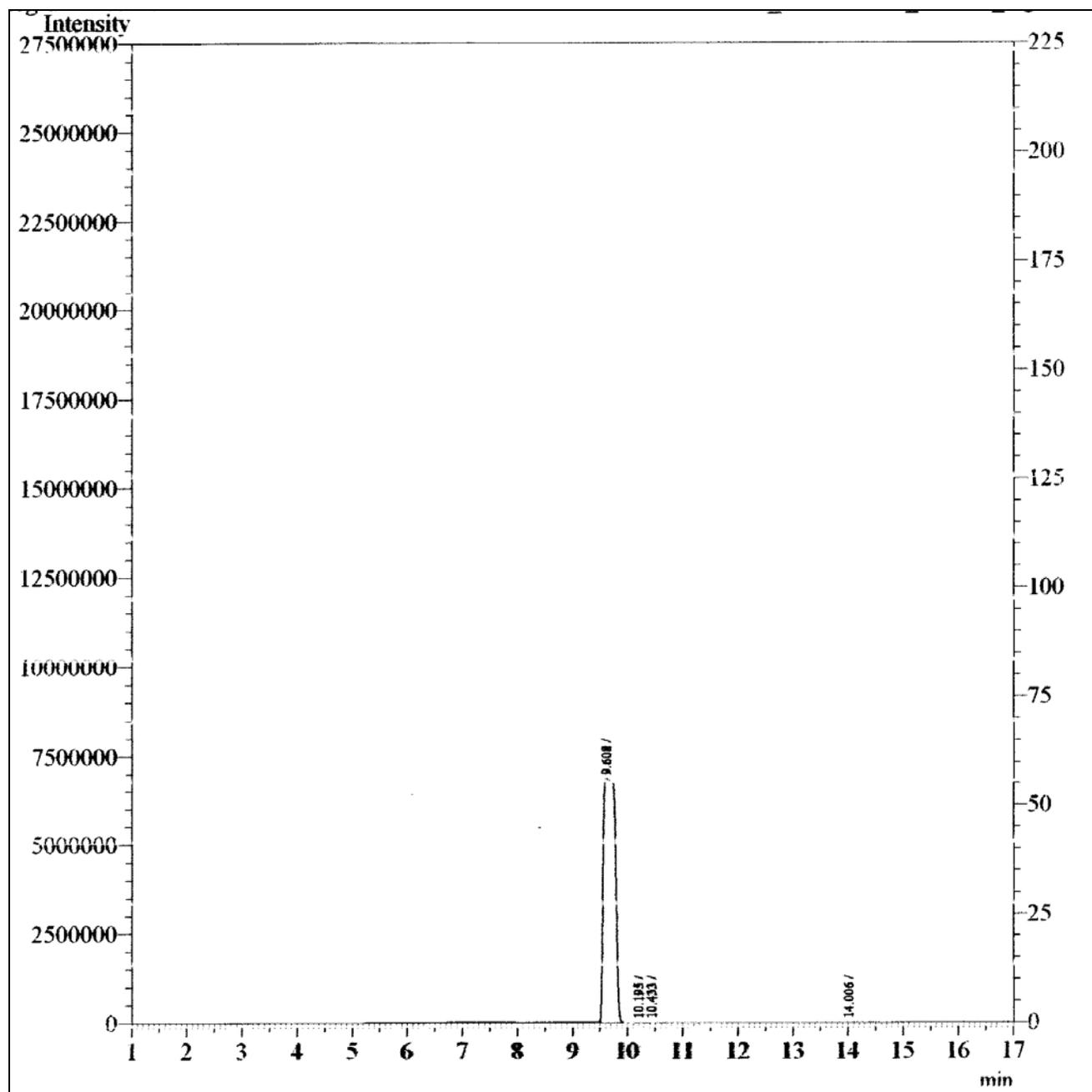
Gráfica 10. Cromatograma del gas producido en el Microbiodigestor A8



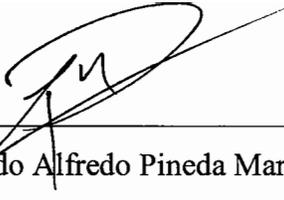
Fuente: Experimental

# Anexo 10

Gráfica 11. Cromatograma del gas producido en el Microbiodigestor A9



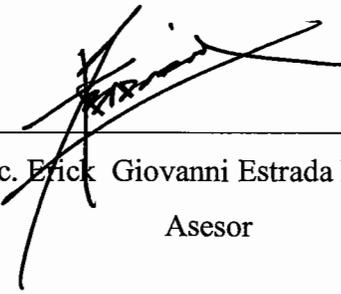
Fuente: Experimental



---

Br. Gerardo Alfredo Pineda Martínez

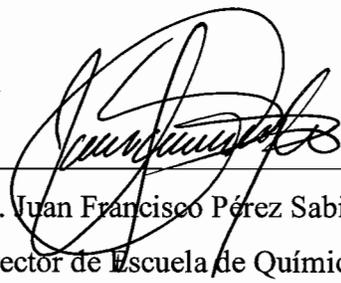
Tesista



---

Lic. Erick Giovanni Estrada Palencia

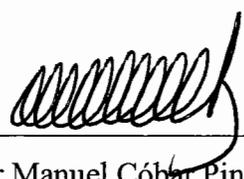
Asesor



---

PhD. Juan Francisco Pérez Sabino

Director de Escuela de Química



---

PhD. Oscar Manuel Cobar Pinto

Decano de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia