



UNIVERSIDAD ABIERTA Y A DISTANCIA DE MÉXICO  
PROYECTO TERMINAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN  
BIOTECNOLOGÍA.

**PROYECTO: Uso de Biorreactores de Fabricación Propia para Obtención de  
Biogás a partir de Excretas de Animales Domésticos.**

Asesor interno: Dra. Diana Elinos Calderón.

Asesor externo: Dr. Carlos Baudel Manjarréz Domínguez.

Estudiante: Héctor Esteban Rodríguez Ramírez,

Matrícula: AL10506481.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente la orientación, apoyo y seguimiento al Dr. Carlos Baudel Manjarrez Domínguez en el desarrollo del presente trabajo, así como a la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua, por el respaldo institucional, a través del Dr. Manjarrez.

Por su objetividad, orientación, convicción y confianza, agradezco a la Dra. Diana Elinos Calderón que con su trabajo, esfuerzo y atención, ha logrado un vínculo con sus alumnos, como facilitadora, orientadora y asesora, dentro del trabajo desempeñado en la asignatura de Proyecto Terminal, a pesar de lo difícil que es actualmente, para personas que pasamos la etapa de niñez y adolescencia en otro momento, adaptarse al cambio, y estar dispuestos a romper paradigmas, en el aspecto educativo, en el uso de Tecnologías de la Información, además de su siempre amable y atenta disposición vía telefónica y por correo electrónico.

Agradezco a mi familia su paciencia ya que esta actividad, ocupó tiempo valioso que podría haber sido dedicado a convivir con ellos.

Agradezco a mis amigos su apoyo y atención, que siempre me escucharon con interés y atención cuando tuve comentarios que compartir y me dieron su opinión respecto a esta aventura de estudiar una Licenciatura en Línea que empezó hace muchos años, en un momento que considero, era complicado.

Agradezco a Nora, su apoyo y comprensión para permitirme utilizar el tiempo tan valioso que nos corresponde compartir, en actividades distintas, así mismo, su ayuda en los momentos más complicados para el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a Dios (creo en Dios, como la entidad superior que tiene en orden todo el universo, desde el nivel macroscópico y hasta el nivel microscópico, con tantas cosas que aún no comprendemos y que por nuestro paso en esta vida, no alcanzaremos a comprender, quizás otras generaciones posteriores, lleguen a conocerlo mejor) que nunca me ha dejado de su mano.

## **DEDICATORIA**

A la primera persona que siempre ha estado y sigue ahí, junto a mí, a Nora Angélica Pando Rodríguez.

A mis padres, hermanos, a mi hijo, que, de una u otra manera han sacrificado su espacio y su tiempo juntos, para que nosotros, en nuestro rol de estudiantes, podamos continuar con la formación que con este trabajo, culmina.

A todos mis amigos que con su atención, me permitieron compartir momentos y opiniones, dándome ánimo de continuar.

A mis abuelos que hace buen tiempo partieron de este mundo y aun así, con sus enseñanzas, continúan en mi corazón, dándome fuerza y ánimo de seguir siempre adelante.

A Dios, porque siempre me escucha y me retroalimenta a través de las señales que a diario nos rodean, permitiéndome continuar adelante porque, aunque siendo este un trabajo sencillo, que muchas veces costó esfuerzo adicional, superar el cansancio, el sueño, la falta de tiempo y a veces hasta vencer la falta de voluntad que se sufre de pronto.

## ÍNDICE GENERAL.

ÍNDICE DE FIGURAS.....	e
ÍNDICE DE CUADROS.....	f
ECUACIONES.....	g
1. RESUMEN.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
3. MARCO TEÓRICO.....	2
3.1. <i>Producción de biogás</i> .....	2
3.2. <i>Una alternativa sustentable como fuente de energía</i> .....	3
3.3. <i>Experiencias en producción de biogás y aspectos técnicos</i> .....	6
3.4. <i>Aspectos a considerar en el diseño del biodigestor y parámetros de operación</i> .....	8
3.5. <i>Operación del biodigestor y producción de biogás</i> .....	10
4. HIPÓTESIS.....	11
5. OBJETIVOS.....	11
5.1. <i>General:</i> .....	11
5.2. <i>Particulares:</i> .....	11
6. METODOLOGÍA.....	12
6.1. <i>Operación de los biodigestores a escala de laboratorio (Etapa 1)</i> .....	12
6.2. <i>Operación de los biodigestores para uso en hogar (Etapa 2)</i> .....	15
6.3. <i>Operación del sistema de digestión</i> .....	15
6.4. <i>Diseño del biodigestor para uso en hogar</i> .....	15
6.5. <i>Análisis estadístico (ver Figura 3, con el esquema de la metodología a usar)</i> .....	16
7. RESULTADOS.....	18
7.1. <i>Producción de biogás a partir de estiércol de especies zootécnicas domésticas (etapa 1)</i> .....	18
7.2. <i>Comparación de la producción de biogás entre tratamientos (etapa 1)</i> .....	19
7.3. <i>Efecto del bicarbonato de sodio (etapa 1)</i> .....	21
7.4. <i>Producción de biogás a partir de estiércol de Bovino (etapa 2)</i> .....	21
7.5. <i>Costos de elaboración de los biodigestores</i> .....	21
8. DISCUSIÓN.....	22
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	24
10. BIBLIOGRAFÍA.....	24

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Biodigestores para etapa 1. ....	12
Figura 2. Bidón para uso como biofermentador de elaboración propia con base en el diseño de Reyes-Aguilera (2017). ....	16
Figura 3. Esquema de la metodología a usar.....	17
Figura 4. Producción promedio de biogás por tipo de materia prima en tratamientos sin bicarbonato de sodio a los 36 d. ....	19
Figura 5. Biodigestores de prueba en etapa 1, en producción. ....	20
Figura 6. Curva de producción de biogás (con datos de Etapa 1).....	20

## ÍNDICE DE CUADROS.

Cuadro 1. Tiempo de retención con base en temperatura. ....	10
Cuadro 2. Tratamientos a evaluar en la etapa 1. ....	13
Cuadro 3. Cálculos a realizar para estimar la cantidad de sólidos totales requeridos para la producción de biogás en la etapa 1.....	14
Cuadro 4. Tiempo de evaluación en etapa 2.....	17
Cuadro 5. Sólidos totales en el estiércol utilizado como materia prima a fermentar. ....	18

### ECUACIONES.

Ecuación 1) Con estiércol de bovino:  $y=13.197x^2-148.07x+451.73$  ( $R^2 = 0.9989$ ).

..... 21

Ecuación 2) Con estiércol de ovino:  $y=8.5129x^2-184.09x+670.66$  ( $R^2 = 0.9808$ ). 21

## 1. RESUMEN

Los déficits y costos crecientes del abastecimiento de petróleo, han impulsado a muchos países para obtener energía de sistemas energéticos renovables, siendo el biogás una alternativa. El estiércol de bovino, es base para el desarrollo del proceso de digestión anaeróbica. Para producción de biogás, es posible utilizar cualquier tipo de estiércol (Reyes-Aguilera, 2017), siendo un combustible barato y útil en comunidades alejadas, eliminando residuos, atendiendo una demanda social, disminuyendo el impacto ambiental, y constituyendo una aplicación biotecnológica sencilla (Corona-Zúñiga, 2007). Los equipos a escala de bajo costo, permiten la obtención de gas, satisfaciendo demandas en lugares de difícil acceso, con baja inversión y con re-uso de la materia inicial. Para operar un biodigestor, se necesita un ambiente anaerobio, llegando a producir hasta 0.5 metros cúbicos de biogás (con hasta 70% de metano) por kilogramo de masa (Reyes-Aguilera, 2017). El diseño de un biodigestor, debe tomar en cuenta la carga orgánica, tiempos de retención hidráulica y la producción de metano; se ha sugerido aplicar bicarbonato de sodio como buffer del lixiviado al arranque del proceso ( $11 \text{ g}^*\text{L}$ ). Este trabajo, evaluó la producción de biogás a partir de estiércol de especies zootécnicas domésticas, utilizando biofermentadores de elaboración propia, en dos etapas, en la primera, con biodigestores para una prueba piloto, comparando la producción de estiércol de bovino, ovino y caprino. En la etapa 1 del trabajo, el tratamiento con estiércol de bovino como biomasa sin uso de bicarbonato (BOVSB) fue el que presentó más producción de biogás ( $17.36 \text{ L}^*\text{kgST}^{-1}$ ), sin embargo no hubo diferencia ( $P>0.1$ ) con respecto a otros tratamientos debido a una alta variabilidad (varios biodigestores no mostraron producción), aun así, el costo de elaboración de los biodigestores y los gasómetros para pruebas (etapa 1), mostraron ser funcionales y económicos, comparados con el material comúnmente utilizado para pruebas de laboratorio; el costo de un biodigestor para uso casero, puede alcanzar los \$1,300.00 (mil trescientos pesos 00/100 MN, costos al 11/05/2019) con materiales nuevos de buena calidad, incluyendo garrafones para recuperación del biogás, costo que puede ser menor, con materiales económicos disponibles en el mercado; es recomendable repetir la Etapa 1 del presente experimento.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Los déficits y costos del abasto de petróleo, han impulsado a muchos países para obtener energía de sistemas energéticos renovables, siendo el biogás una opción (mezcla de metano (50-70%), anhídrido carbónico (30-45%), hidrógeno (1-3%), oxígeno (0.5-1%), gases diversos (1-5%) y vestigios de anhídrido sulfuroso; Lockett 1997, citado por Reyes-Aguilera, 2017). Las energías no renovables, incrementan costos y disminuyen su disponibilidad (Odngam *et al.*, 2014).

## 3. MARCO TEÓRICO

Lockett (1997), citado por Reyes-Aguilera (2017), menciona que los déficits y costos crecientes del abastecimiento de petróleo, han impulsado a muchos países para obtener energía de sistemas energéticos renovables, considerando entre esos, el gas obtenido a partir de estiércol, gas de los pantanos o gas de granja, producido por la fermentación de estiércol de animales, de la paja y residuos agrícolas en general, siendo el biogás, una mezcla de metano (50-70%), anhídrido carbónico (30-45%), hidrógeno (1-3%), oxígeno (0.5-1%), gases diversos (1-5%) y vestigios de anhídrido sulfuroso. Las formas de energía no renovables, siguen incrementando sus costos y su disponibilidad disminuirá (Odngam *et al.*, 2014).

### 3.1. Producción de biogás.

En explotaciones ganaderas, se pueden obtener de 30-50 kg de heces por día de cada vacuno, de 20-50 kg de cada equino, 4-8 de cada porcino y/u ovino y de 0.1 a 0.5 kg de heces por día de cada ave, siendo su composición nutritiva, variable y distinta entre especies, así mismo, sus características varían en función a raza, alimentación y época del año (Reyes-Aguilera, 2017), siendo la gallinaza (desechos de la producción avícola, un residuo con elevado potencial de generación de energía (Echaendia y Menoyo, 1990, citados por Reyes-Aguilera, 2017).

Las mayores aplicaciones de biogás se han presentado en China, India y Europa; siendo China de los pioneros, con un programa iniciado en los años setenta, con un resultado de más de 7 millones de digestores aunque con varias fallas en su inicio (Boyle, 2004, citado por Reyes-Aguilera, 2017), siendo Alemania, el actual líder en uso de esta tecnología, con hasta 3,891 plantas en 2008 (Poeschl, Ward y Owende, 2010, citados por Reyes-Aguilera, 2017).

En Chile, la implementación de biodigestores representa una solución limpia y sustentable para tratamiento y aprovechamiento de la actividad ganadera y agrícola, generando un beneficio medioambiental y poblacional, así mismo, los biodigestores, además de generar el biogás, son excelentes productores de bioabono, asegurando la producción en periodos cortos (Gajardo-Alarcón, 2013).

A partir de la digestión anaerobia de desechos de pollo en Marruecos, se puede obtener una alta calidad de biogás, siendo hasta  $230.58 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$  sustrato DQO (Demanda química de oxígeno, o COD por sus siglas en inglés), con un 60.2% de metano en su composición, siendo entonces, la industria de producción de pollo, una potencial fuente de energía renovable diariamente, sin embargo, de acuerdo a ese trabajo, la metanización de los desechos, requiere un pretratamiento de calor, molido y adición de inóculo, antes de introducir el desecho al digestor (Elasri y El amin-Afilal, 2016).

### ***3.2. Una alternativa sustentable como fuente de energía.***

El biogás, al ser un derivado de la biomasa, constituye una fuente de energía renovable. En muchos países, la producción se encuentra subvencionada o presenta incentivos económicos, proporcionando ingreso adicional a los agricultores, además de que su obtención corresponde a una gestión mejorada de nutrientes, al reducir emisiones de gases de efecto invernadero liberados al ambiente, debido a su captura y uso en forma de biogás. Las plantas de biogás, reducen significativamente la presión sobre los rellenos sanitarios, reduciendo

costos de disposición de residuos orgánicos y permitiendo obtención de sub-productos, protegiendo aguas subterráneas ya que el proceso, disminuye el riesgo de lixiviación de nitratos; constituye entonces un sistema de gestión integral de residuos orgánicos, con beneficios sociales, económicos y ambientales. La digestión anaerobia con la que se obtiene un biogás, se puede llevar a cabo con uno o más residuos con la única premisa de que sea líquido, que contenga material fermentable y una composición y concentración estable. El metano (principal componente del biogás obtenido en una fermentación anaeróbica), se ha duplicado en la atmósfera, y es importante entender que contribuye en un 20% al efecto invernadero antropogénico y, del generado por el ser humano, el 50% proviene de la actividad ganadera (FAO, 2011; Reyes-Aguilera, 2017).

Se ha reportado que el estiércol de bovino, es una excelente base para el desarrollo del proceso de digestión anaeróbica considerando su capacidad tamponadora (buffer), su contenido de nutrientes para el desarrollo de poblaciones de microorganismos anaerobios (Eastman y Ferguson, 1981, citados por Reyes-Aguilera, 2017), además de que el aumento de la superficie agrícola útil, hace equiparable el sector ganadero con la industria de la transformación de materias primas agroindustriales en cuanto a la intensa problemática de gestión de los residuos (Hashimoto y Chen, 1982, citados por Reyes-Aguilera, 2017); el uso eficiente de la acumulación de deyecciones sólidas y líquidas provenientes de explotaciones ganaderas, así como su uso eficiente, con menor daño al medio ambiente, son objetivo prioritario de muchos investigadores (Bernal y Roig, 1993, citados por Reyes-Aguilera, 2017).

Para la producción de biogás, es posible utilizar cualquier tipo de estiércol, ya sea de vaca, cerdo, cabra, aves incluso, desechos humanos (Rodríguez, 2007, citado por Reyes-Aguilera, 2017).

El biogás es un combustible barato y útil en comunidades alejadas, la biomasa aportada, se convierte en un beneficio para el entorno, elimina residuos, equilibra

excedentes agrícolas; al usar el estiércol, responde a una demanda social, mejora el manejo e impacto positivo ambiental, por el manejo del residuo y es una aplicación biotecnológica sencilla de aplicar (Corona-Zúñiga, 2007).

El sistema de biodigestión anaeróbico, es un proceso centralizado de manejo de excretas, con el cual se puede obtener energía eléctrica a través de la combustión de biogás; el sistema puede ser dimensionado de acuerdo a la cantidad disponible de excretas, tipo y disponibilidad, características físicas, químicas y biológicas de la biomasa, así como los aspectos geográficos de la zona; la producción de biogás, es determinada de acuerdo al tipo de biodigestor, así como los factores determinantes que influyen en el proceso de fermentación como son: pH, temperatura, relación Carbono-Nitrógeno (C:N), presencia de agentes inhibidores; es importante que de acuerdo al volumen del biodigestor, se realicen los cálculos pertinentes para producción de biogás (SEMARNAT-SAGARPA, 2010).

Se pueden generar equipos técnica y económicamente viable para solventar necesidades energéticas de pequeños ganaderos y lecheros, aquellos que poseen al menos 20 animales, pueden generar hasta 4.4 kilowatts hora, aprovechando la producción de biogás para utilizarlo en un generador eléctrico, además de obtención de biofertilizantes y líquidos que pueden ser aprovechados (Pérez-Medel, 2010).

Un reporte de producción de biogás a partir de excretas porcinas, indica que la sencillez de implementar biodigestores para obtención de biogás, es una alternativa interesante e importante para desarrollo en México, en particular en Guanajuato, donde el inventario de cabezas porcícolas, podrían generar energía para 60,000 viviendas (Martínez-Lozano, 2015), obteniendo 100,000 m<sup>3</sup>/día de biogás, sustituyendo 114,000 barriles de petróleo al año.

Para efectos de análisis de costos, asumiendo que un calentador de agua a partir de biogás, opera al 70% de eficiencia y que se consume todo el biogás producido

para este efecto, sería más económico calentar agua con biogás en lugar de electricidad (Homan, s.f.).

### **3.3. Experiencias en producción de biogás y aspectos técnicos.**

La producción de gas, es el mejor indicador en la digestión de excrementos animales, la cual debe ser en promedio,  $0.53 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$  del total de los sólidos volátiles, añadidos a un digestor a  $35^\circ\text{C}$  (Filippín *et al.*, s.f.).

Los sólidos volátiles, son la porción de un material que es susceptible para biodegradarse y que está disponible para los microorganismos que producen la fermentación o la digestión (Pacheco-González, 2016).

Los equipos a escala de bajo costo, pueden permitir la obtención de gas, satisfaciendo ciertas demandas en lugares de difícil acceso, siendo efectiva la producción de biogás usando estiércol de vaca, siendo rentable, con baja inversión y permitiendo el ciclo de re-uso de la materia inicial, haciendo factible la generación de energía eléctrica y térmica como valor agregado; sin embargo, los resultados económicos no pueden generalizarse por las circunstancias que se presentan en cada lugar; los biodigestores, tienen un papel importante en sistemas de cultivo integrados, reduciendo la contaminación generada por excretas de ganado, con disponibilidad de un área para disponer el biodigestor (Arce-Cabrera, 2011).

Para operar un biodigestor, se debe procurar un ambiente estrictamente anaerobio, sellando el recipiente; el material de carga, puede ser estiércol porcino y/o vacuno, inoculando estiércol fresco y agua proporciones 1:1, suspendiendo la carga por algunos días para que la población de bacterias metanogénicas crezca y se estabilice. El material puede reunirse de 20 a 30 días antes del arranque; la mezcla con excretas de ave y residuos vegetales poco degradables, se pueden tratar con sales, revisando que no tengan inhibidores; el arranque se puede iniciar con material de otro digestor que ya tenga una población alta de bacterias activas; la población

máxima de mezcla de estiércol fresco y agua es de a lo más 1:3 y la carga puede ser diaria (biodigestores de carga continua), para mantener una producción constante de biogás y abono; la selección de los materiales a usar como materia prima, debe ser correcta para evitar mal funcionamiento, tomando en cuenta la proporción de carbono-nitrógeno (20:1); así mismo, el pH es un factor importante para promover el hábitat adecuado para las bacterias (de 6.5 a 7.5; Olaya-Arboleda y González Salcedo, 2009).

Nizami et al. (2012), citado por Pacheco-González (2016), indica que el biogás se puede generar a partir de diversos materiales como estiércol líquido, lodos de tratamientos de aguas residuales, residuos de poda, residuos de la industria de alimentos y residuos domésticos, incluso, desde residuos de cosechas, de poda y de jardinería; en Colombia, se reportó en 2016 que aunque se ha evaluado el potencial de aprovechamiento de residuos orgánicos con tecnologías anaerobias, hay pocos reportes de ello (se sugiere que algo similar sucede en México); diversos reportes, indican que se pueden obtener desde 41 hasta 595 litros de metano por kilogramo de sólidos volátiles, de sustratos que van desde composta pretratada químicamente, hasta frutas y vegetales mezclados, incluyendo residuos y lodos de diversa índole (Pacheco-González, 2016).

La digestión anaerobia, es un proceso microbiológico que se presenta en ambientes libres de oxígeno y produce biogás, principalmente metano y dióxido de carbono, tratamiento que puede aplicarse a un amplio rango de materias primas, incluyendo aguas residuales industriales y municipales, agricultura, desechos de alimentos, entre otros, a estas materias primas, cuando su origen es biológico, se le denomina biomasa, y se convierte en energía a través de procesos bioquímicos (biogás) o termoquímico; al aprovecharla a través de la fermentación anaerobia, y transformarse en metano y otros gases, su calidad depende de la materia prima del sistema, llegando a producir hasta 0.5 metros cúbicos de biogás (hasta 70% de metano) por kilogramo de masa; su beneficio al ambiente es alto, debido a que la descomposición a través de la fermentación en una biodigestión, permite un

ambiente controlado, usando el metano para beneficio humano, sustituyendo el uso de combustibles fósiles (Pacheco-González, 2016).

En el proceso, hay una cadena de diferentes tipos de bacterias; inicialmente producen hidrólisis (en este caso del estiércol), generando ácidos orgánicos, los cuales son digeridos por otro tipo de bacterias, que a través de una deshidrogenación y acetogénesis dan como resultado ácido acético e hidrógeno; al final, las bacterias metanogénicas, digieren el hidrógeno y el ácido acético para transformarlo en metano, el principal de los que componen al biogás y el que permite la combustión (Reyes-Aguilera, 2017).

Las materias primas fermentables incluyen un amplio espectro de residuos, el proceso microbiológico, requiere fuentes de carbono, nitrógeno y además un cierto equilibrio de sales minerales, siendo las sustancias con alto contenido de lignina, no directamente aprovechables, por lo que deben someterse a tratamientos previos; en caso de los estiércoles, la degradación depende del tipo de animal y alimentación recibida, presentando grandes diferencias en la producción y rendimiento de gas (Reyes-Aguilera, 2017).

La obtención de biogás a partir de tallos de maíz mezclados con estiércol de vaca, incrementa la producción de biogás, aumenta la eficiencia de la degradación de la materia orgánica y reduce el ciclo de fermentación anaerobio, en pruebas de reactores anaerobios de 500 ml, la proporción de estiércol y tallos de maíz fue de 3:1 en un estudio realizado por Lv *et al.* (2018).

#### ***3.4. Aspectos a considerar en el diseño del biodigestor y parámetros de operación.***

El diseño de un biodigestor, debe tomar en cuenta la carga orgánica, tiempos de retención hidráulica y la producción de metano; así mismo, se debe considerar el contenido de materia seca, solubilidad, tasa de hidrólisis, tipo de biodigestor y su

diseño. En los digestores tipo Batch, se realiza una carga con una cantidad determinada de materia prima por un periodo de tiempo y se inocula con el digestato o lixiviado de otro reactor, en este tipo de digestores, la biomasa se introduce en un tanque hermético, donde permanecerá por un tiempo y las bacterias anaeróbicas realizarán la digestión de los residuos, denominándose digestor de lecho fijo, donde el relleno es regular, orientado verticalmente y su flujo es descendente (en caso de tener flujo); los residuos de alimentos, son altamente biodegradables (Pacheco-González, 2016). Se consideran 4 tipos de biodigestores: de cúpula fija, de cúpula móvil y tipo salchicha; así como los de carga y vacío completo de una sola vez; en estos últimos, la fermentación de materia orgánica anaerobia, con condiciones ambientales y operacionales óptimas, pueden permitir producción de biogás en un periodo de 15 días (Reyes-Aguilera, 2017).

Los parámetros que regulan la digestión anaerobia, y en los cuales se presenta la formación de metano son principalmente: Temperatura (formación de metano, con microorganismos mesofílicos: 32-42°C, termofílicos: 50-58°C), Valor del pH: 6.7-7.5, Razón C/N: 20:1-30:1, Contenido de sólidos secos <30%, Potencial redox <-250 mV, Razón C:N:P:S: 600:15:5:3 (Pacheco-González, 2016). Se ha propuesto que para la fermentación, los microorganismos metanogénicos requieren material de carga con un contenido de sólidos del 5 al 10% (Valdivia, 2000, citado por Reyes-Aguilera, 2017).

Para el tiempo de retención hidráulica, se recomienda lo indicado en el Cuadro 1, de acuerdo a la temperatura de operación (Pérez, 2010, citado por Pacheco-González, 2016). La biodigestión anaerobia, puede ocurrir en un amplio rango de temperaturas, desde los 5 hasta 60°C, siendo las bacterias metanogénicas las más sensibles a la temperatura, por su velocidad de crecimiento lento; la disminución de temperatura, puede retardar la producción de metano, sin afectar la actividad de bacterias acidificantes, favoreciendo la falla en la producción de biogás, para evitar esto, se debe procurar un microclima cálido (Osorio, Ciro y González, 2007, citados por Reyes-Aguilera, 2017), así también, valores de pH por debajo de 5 y encima de 8 pueden inhibir el proceso de fermentación o detenerlo (Reyes-Aguilera, 2017).

Cuadro 1. Tiempo de retención con base en temperatura.

Temperatura de operación, °C	Tiempo de retención hidráulico, días	Tiempo de retención recomendado, días
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

### ***3.5. Operación del biodigestor y producción de biogás.***

Pacheco-González (2016), indica que las causas que pueden generar una falla en la producción de biogás, son: a) Pérdida de calor, b) Fugas neumáticas e hidráulicas, c) Fluctuaciones de temperatura y por lo tanto, falla en el calentamiento del sistema, d) Malas condiciones de alcalinidad, poca capacidad buffer, e) Obstrucción de la válvula de salida del lixiviado y problemas en la bomba de recirculación (en caso de aplicar movimiento); el autor encontró que el rendimiento de producción de metano de la co-digestión de residuos de alimento y poda fue de 216.18 litros de metano por kilogramo de sólidos volátiles ( $L CH_4 \cdot kg SV^{-1}$ ), así mismo, sugiere aplicar bicarbonato de sodio como buffer del lixiviado al arranque del proceso ( $11 g \cdot L$ ).

El seguimiento de la generación de Biogás, se puede realizar a través de métodos volumétricos, por indicador de combustión de gas y por análisis cromatológico, el más usado es el volumétrico (Pacheco-González, 2016).

Pacheco-González (2016), reporta que para evaluar la obtención de metano a partir de residuos, la caracterización de las muestras de sustratos puede describirse con la composición elemental del porcentaje de Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Azufre, Oxígeno y Cenizas, así como la Humedad total y la Materia Volátil a través del método ASTM Internacional; para los ensayos, determinó 3 cargas de acuerdo con valores máximos recomendados en la literatura para ensayos de la Biodigestión,

determinando el potencial de metano durante 30 días. Para la construcción del digestor de lecho fijo tipo Batch, el sustrato fue empacado y mantenido a un nivel de humedad por debajo del 30%, siendo la capacidad en la zona de retención del sustrato de 400 gramos. Para medir la producción de gas, utilizó un gasómetro tipo mariotte, cuya construcción y operación es simple, sus resultados son claros y precisos, recomendando su uso a escala de laboratorio y piloto para estudios de digestión anaerobia; los ensayos fueron con volúmenes de 400 mililitros.

#### **4. HIPÓTESIS**

La producción de biogás a partir de estiércol de diversas especies, es diferente de acuerdo a la materia prima utilizada, además, existe la posibilidad de que al usar bicarbonato de sodio como tampón (buffer) para arrancar la producción biogás a partir de estiércol, se establezca la producción de manera favorable, en una fermentación con equipos (biodigestores) económicos de elaboración propia.

#### **5. OBJETIVOS**

##### **5.1. General:**

Evaluar producción de biogás a partir de estiércol, con biodigestores de bajo costo de elaboración propia.

##### **5.2. Particulares:**

- a) Conocer la producción de biogás a partir de estiércol de especies zootécnicas domésticas.
- b) Comparar la producción de biogás a partir de estiércol de especies zootécnicas domésticas.
- c) Identificar si es necesario utilizar bicarbonato de sodio como tampón (buffer) para arrancar la producción biogás a partir de estiércol.
- d) Evaluar la factibilidad del uso de biodigestores de bajo costo y elaboración propia para producción y estudio de la producción de biogás.

## 6. METODOLOGÍA

La producción de biogás a evaluar, se obtuvo en todos los casos en biodigestores de tipo discontinuo o de carga estacionaria (FAO, 2011).

### 6.1. Operación de los biodigestores a escala de laboratorio (Etapa 1).-

El estiércol se vació en directamente en 18 biodigestores de 4.13 L cada uno, utilizando recipientes comerciales de un galón de capacidad (ver Figura 1), herméticamente cerrados, con estiércol de especies de ganado doméstico: 1) de bovino (*Bos indicus*, n=6), 2) de caprino (*Capra aegagrus hircus*, n=6), 3) de ovino (*Ovis aries*, n=6) con y sin bicarbonado de sodio (11 gramos por litro de mezcla a fermentar), con el objetivo de evaluar su efecto sobre la producción de gas ya que según Pacheco-González (2016), la amortización del lixiviado puede estabilizar el sistema; el diseño de tratamientos de la etapa 1 se muestra en el Cuadro 2. La cantidad de sólidos totales se obtuvo por secado de una muestra de cada tipo de estiércol a 100°C durante 24 h, en estufa, para determinar materia seca, posteriormente se calculó la cantidad de cada tipo de estiércol en cada biodigestor para obtener un 8% de sólidos totales en la mezcla.

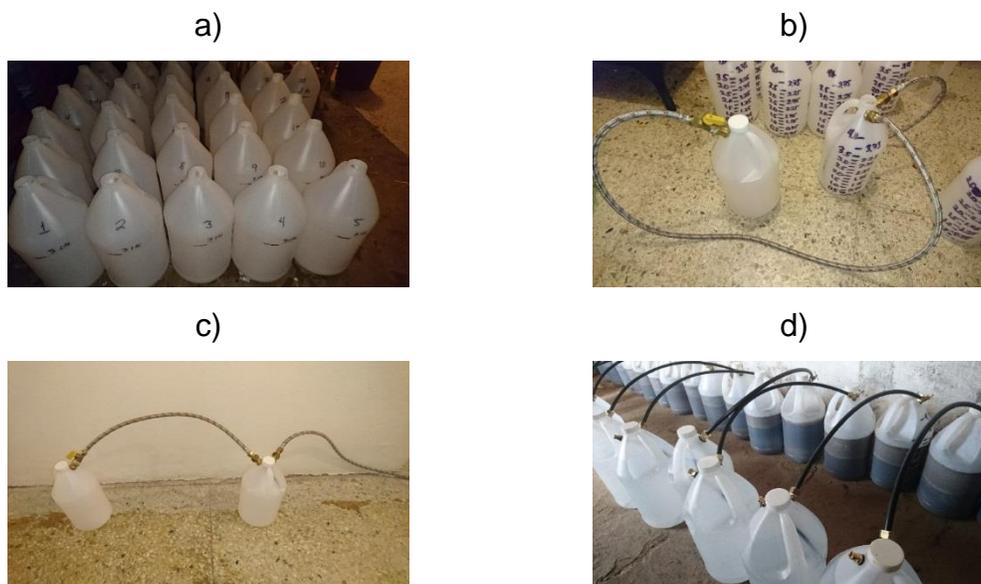


Figura 1. Biodigestores para etapa 1.

(a; n=18), conectados a gasómetro de botella tipo mariotte, graduado cada 0.25 mL (b), el diseño incluye válvula para cierre en el biodigestor en caso de que sea necesario volver a llenar el gasómetro (c, d).

Cuadro 2. Tratamientos a evaluar en la etapa 1.

Tratamientos		Variables a medir	
Estiércol de bovino (n=3) BOVCB	Con Bicarbonato de Sodio (n=9)	Producción de gas 0-40 d.	Biogás obtenido en función a sólidos totales
Estiércol de caprino (n=3) CAPCB			
Estiércol de ovino (n=3) OVICB			
Estiércol de bovino (n=3) BOVSB	Sin Bicarbonato de Sodio (n=9)		
Estiércol de caprino (n=3) CAPSB			
Estiércol de ovino (n=3) OVISB			

La solución agua-excreta, se preparó, agregando agua para obtener una concentración del 8% de sólidos totales en la solución a fermentar (Corona-Zúñiga, 2007), llenando al 72% (3 litros de mezcla) cada biodigestor con la mezcla a fermentar (los cálculos se realizaron de acuerdo al Cuadro 3); Lv *et al.* (2018) reportaron en su trabajo, que usaron el 70% de la capacidad total del biodigestor. Se obtuvo el total de materia volátil de la muestra seca, por el método de determinación de cenizas (Elasri y El amin Afilal, 2016); la producción de biogás en la etapa 1, se programó para realizarse durante un periodo máximo de 40 días; la producción de gas se midió con Gasómetros de Botella tipo Mariotte (Pacheco-González, 2016), elaborados en este caso, con recipientes de plástico, de aproximadamente un galón de capacidad para almacenamiento de químicos de uso comercial, graduados cada 0.25 mL, desde 0.25 hasta 4 L (la graduación se realizó

manualmente, con ayuda de probetas de 0.25 mL, ver Figura 1); la fermentación se realizó a temperatura ambiente y sin agitación, tomando nota de la temperatura diaria presentada, de acuerdo a lo reportado por AccuWeather a través de su portal de internet (<https://www.accuweather.com/es/mx/chihuahua/242375/april-weather/242375>).

Cuadro 3. Cálculos a realizar para estimar la cantidad de sólidos totales requeridos para la producción de biogás en la etapa 1.

Datos	Cálculo de materia seca (sólidos totales) y agua requeridos al inicio de la fermentación	Variable o valor	Comentarios y cálculos (literales indicadas con base en la columna "Datos")
a	Cantidad de sólidos (materia seca) en sustrato	x	en porcentaje
b	Cantidad de cenizas en sustrato	y	en porcentaje
c	Volumen del biodigestor	z	litros
d	Porcentaje de llenado del biodigestor	72%	en porcentaje, valor obtenido con base en revisión de literatura
e	Cantidad a agregar	u	(z*72%) litros
f	Cantidad de sólidos deseada en mezcla	8%	(peso/volumen), valor obtenido con base en revisión de literatura
g	Cantidad de sólidos requerida en mezcla	v	(u*8%) kilogramos (peso/volumen)
h	Cantidad total de sustrato a agregar	w	(v/x) kilogramos
i	Cantidad de agua a agregar	---	(u-w) litros
j	Cantidad de biodigestores	6	Cantidad
k	Cantidad de sustrato requerido al inicio de la prueba	---	(w*6) kilogramos

x, y, z, u, v, w, son variables a obtener en el proceso, con base en mediciones y con los cálculos aquí propuestos, los espacios sin variable, son cálculos finales.

a, b, ..., k, indican la fila de referencia para tomar los datos para los cálculos correspondientes.

### **6.2. Operación de los biodigestores para uso en hogar (Etapa 2).-**

Se seleccionó estiércol de bovino para la producción de gas en esta etapa, con base en los resultados de la Etapa 1. La producción se llevó a cabo, vaciando directamente en 2 biodigestores, elaborados con un bidón de plástico de 50 litros de capacidad total, llenados al 70%, utilizando 32 litros de agua y 3 kg de estiércol de bovino (el que mostró mejor resultado en la Etapa 1), equivalente este último, a 2.88 kg de materia seca (obtenida por secado de una muestra de 1 gramo obtenida del estiércol a usar, a 100°C en estufa por 24 h; similar a lo realizado por adaptado de Elasri y El amin Afilal, 2016); teniendo en la mezcla a fermentar, de aproximadamente 35 litros de volumen, una concentración de 8% de sólidos totales a fermentar (Corona-Zúñiga, 2007).

La producción de gas, se programó para realizarse durante un periodo máximo de 30 días, medible con un gasómetro tipo Mariotte (Pacheco-González, 2016), el costo del biodigestor de uso casero, se muestra como parte de los resultados, con los datos de producción acumulada de biogás, se obtendrá una ecuación de regresión.

### **6.3. Operación del sistema de digestión.-**

La operación se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- a) Alimentación del biodigestor con la materia prima y agua.
- b) Verificación del cierre hermético de las válvulas.
- c) Medición de la producción de biogás en el gasómetro tipo Mariotte.

### **6.4. Diseño del biodigestor para uso en hogar.-**

El modelo utilizado, es similar al mostrado en la revisión de literatura de Reyes-Aguilera (2017), utilizando un bidón de uso comercial, con tapa sanitaria para carga, y una adaptación para tener disponible una válvula y manguera de salida de gas, (ver Figura 2).



Figura 2. Bidón para uso como biofermentador de elaboración propia con base en el diseño de Reyes-Aguilera (2017).

**6.5. Análisis estadístico (ver Figura 3, con el esquema de la metodología a usar).-**

Los datos obtenidos de la etapa 1, se compararon con un modelo factorial, donde los tratamientos a evaluar son: Tipo de Estiércol (T), adición de bicarbonato de sodio como amortiguador o tampón para estabilización de la mezcla a digerir (NaOH), y su interacción (T\*NaOH), el diseño se mostró en el Cuadro 2.

Con los datos obtenidos de la etapa 1 y etapa 2, se utilizaron para obtener una regresión lineal, el diseño se describe en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Tiempo de evaluación en etapa 2.

<b>Reposo de la materia prima y determinación de sólidos totales</b>	<b>Establecimiento de la población microbiana</b>	<b>Producción del gas generado</b>
-2 d	Día 0 a 15	Del día 0 al 30, o hasta que la producción del biogás sea imperceptible.

La Figura 3 de este trabajo, muestra un diagrama de flujo indicando de manera resumida, el proceso utilizado para la evaluación de los biodigestores y la producción de biogás a partir de estiércol de especies domésticas.

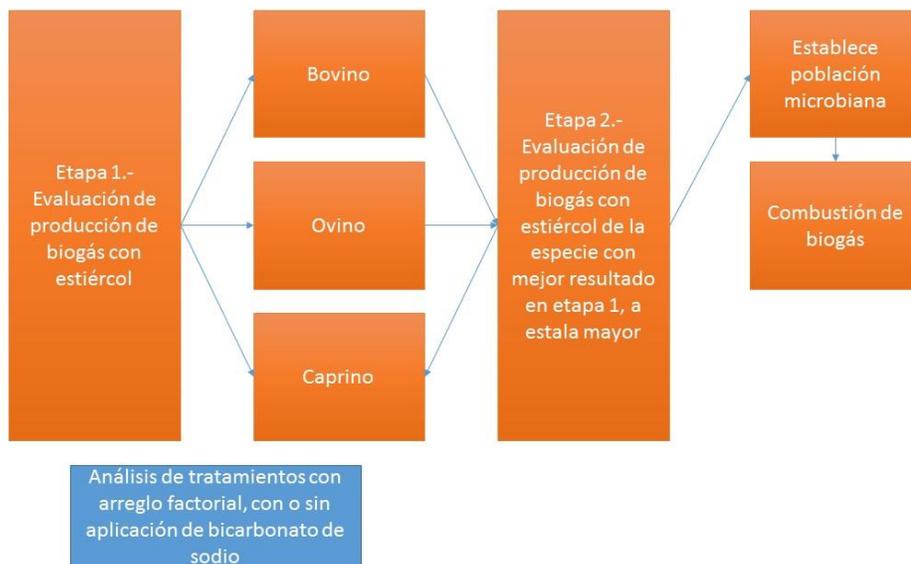


Figura 3. Esquema de la metodología a usar.

## 7. RESULTADOS

La cantidad de humedad y sólidos (materia seca) en el sustrato (estiércol o materia prima), así como la cantidad de cenizas, de acuerdo a los análisis en laboratorio, se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Sólidos totales en el estiércol utilizado como materia prima a fermentar.

<b>Estiércol</b>	<b>Sólidos totales (%)</b>	<b>Cenizas (%)</b>
Bovino	96.20	28.24
Ovino	92.50	44.12
Caprino	92.10	29.12

### ***7.1. Producción de biogás a partir de estiércol de especies zootécnicas domésticas (etapa 1).***

Solo los biodigestores del tratamiento de estiércol de bovino y de ovino sin bicarbonato (BOVSB; OVISB), mostraron producción de biogás, la producción del tratamiento BOVSB inició a los 4 d después de cargar los biodigestores, con una producción visible de 33.3 ml de gas a partir de 3 litros de mezcla de estiércol y agua lo que es equivalente a un promedio de 0.138 litros de biogás por kilogramo de sólidos totales ( $L \cdot kgST^{-1}$ ) en ese momento, el tratamiento OVISB, mostró producción de gas hasta el día 21 de iniciada la prueba.

El tratamiento con estiércol de bovino como biomasa (BOVSB) fue el que mostró mayor producción de biogás de los 0 a los 36 d en la etapa 1, sin embargo, la diferencia no fue significativa entre tratamientos ( $P > 0.1$ ), debido a una alta variabilidad, generada por varios biodigestores en los cuales no se observó producción. La producción promedio para el tratamiento BOVSB fue de 4.17 L ( $17.36 L \cdot kgST^{-1}$ ), el resumen de datos en los tratamientos sin bicarbonato se muestran en la Figura 4.

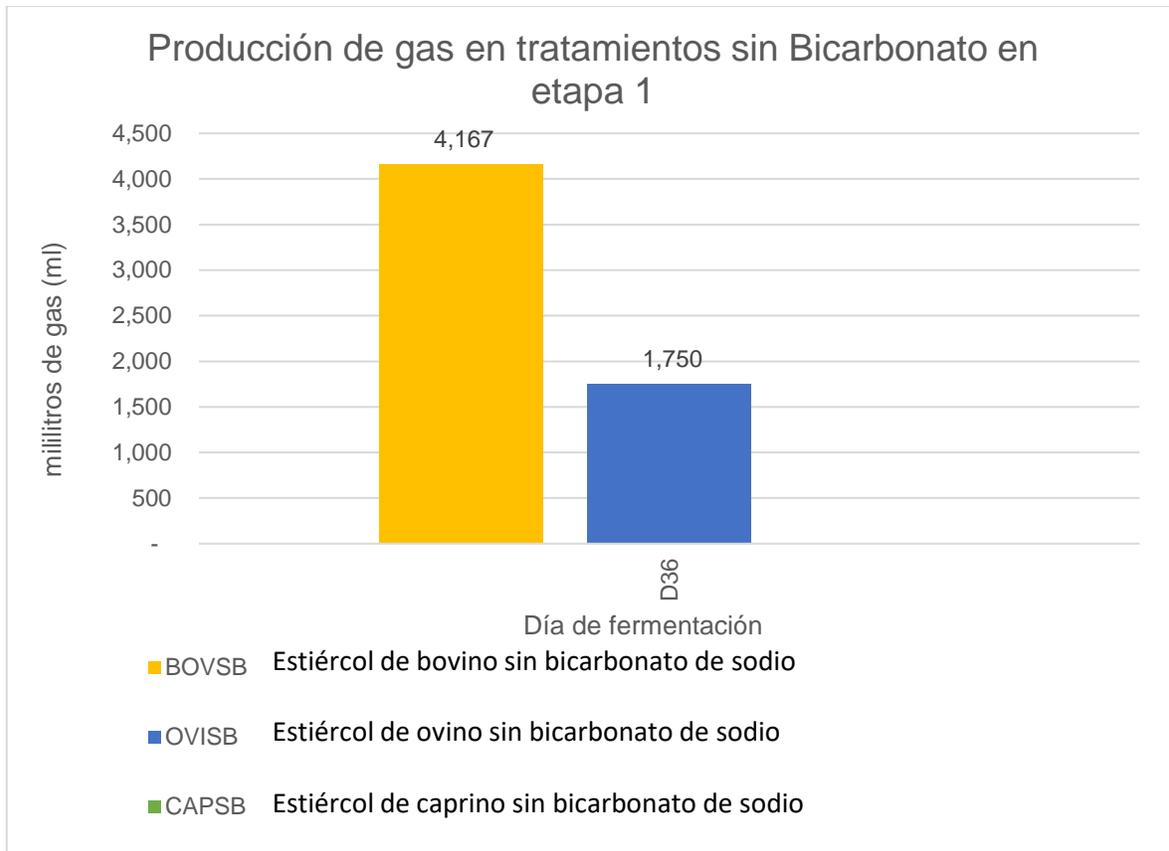


Figura 4. Producción promedio de biogás por tipo de materia prima en tratamientos sin bicarbonato de sodio a los 36 d.

### 7.2. Comparación de la producción de biogás entre tratamientos (etapa 1).

Dados los resultados a los 36 d de fermentación, considerando las condiciones del presente trabajo, se considera que de acuerdo a las características de los biodigestores, el estiércol de bovino es para este caso, fue mejor opción para la producción en un biodigestor de mayor tamaño para uso doméstico, se sugiere en un momento dado, repetir la prueba, con la misma cantidad de biodigestores y tratamientos para valorar y verificar la repetición de los resultados aquí obtenidos, dado que no se tuvo diferencia ( $P > 0.1$ ) entre tratamientos. La Figura 5, muestra la imagen de los biodigestores y la Figura 6, el gráfico con la curva de producción de gas de la Etapa 1.



Figura 5. Biodigestores de prueba en etapa 1, en producción.

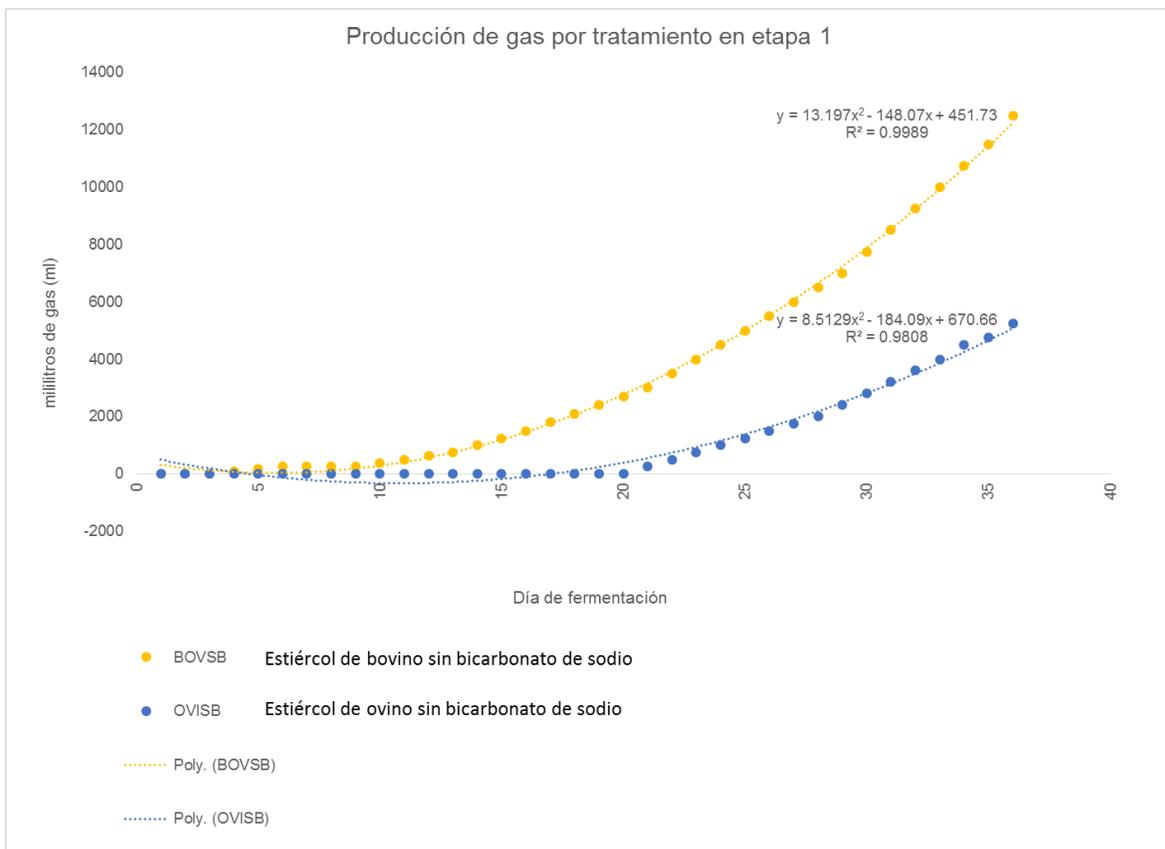


Figura 6. Curva de producción de biogás (con datos de Etapa 1).

Excluyendo todos los datos donde no se observó producción, se obtuvieron las siguientes ecuaciones de regresión, las cuales indican el potencial de producción de biogás que se obtiene en un biodigestor de elaboración propia, para pruebas, de 4.13 L de capacidad, llenados al 72% de su capacidad con una mezcla que contiene 8% de sólidos totales provenientes de la materia seca.

Ecuación 1) Con estiércol de bovino:  $y=13.197x^2-148.07x+451.73$  ( $R^2 = 0.9989$ ).

Ecuación 2) Con estiércol de ovino:  $y=8.5129x^2-184.09x+670.66$  ( $R^2 = 0.9808$ ).

### **7.3. Efecto del bicarbonato de sodio (etapa 1).**

No se observó producción de gas, en los biodigestores en los que se añadió Bicarbonato de Sodio como estabilizador de la fermentación. En este trabajo, no es posible definir de momento, si el efecto de nula producción observable de biogás se deba a la adición de Bicarbonato de Sodio, o bien a fallas y fugas en el sistema del gasómetro, dado que no se observó producción en ninguna repetición del tratamiento de CAPSB (uso de estiércol de caprino sin Bicarbonato de Sodio).

### **7.4. Producción de biogás a partir de estiércol de Bovino (etapa 2).**

Hasta el día siete (7 d) de fermentación, no se observó producción de biogás en los 2 biodigestores de 50 L de capacidad total.

### **7.5. Costos de elaboración de los biodigestores.**

Para la elaboración de los Biodigestores de la Etapa 1, con el medidor de producción de gas (gasómetro) tipo botella Mariotte, se puede utilizar el siguiente material (costos al 05 de mayo de 2019 en la ciudad de Chihuahua, Chih., México):

- 2 galones para químicos de plástico con un costo de cerca de \$20.00 (veinte pesos 00/100 MN) cada uno.
- Unión compresión reducida 3/8\*1/4, costo de \$38.00 (treinta y ocho pesos 00/100 MN).
- Adaptador compresión hembra 3/8\*1/4, costo de \$38.00 (treinta y ocho pesos 00/100 MN).
- Empaque "O-rings" (2 piezas), costo de \$5.00 (cinco pesos 00/100 MN), cada uno.
- Tubo negro 1/4 (0.5 metros), costo de \$1.50 (un peso 50/100 MN).
- Tubo negro 3/8 (0.5 metros), costo de \$1.50 (un peso 50/100 MN).

- Válvula Silleta 3/8, costo de \$59.00 (cincuenta y nueve pesos 00/100 MN).

Costo total del material para elaboración de un Biodigestor con Gasómetro para pruebas (etapa 1) de producción de Biogás, fue de \$188.00 (ciento ochenta y ocho pesos 00/100 MN) antes de impuestos, lo cual es muy económico, comparado con el material comúnmente utilizado en laboratorio.

Para la elaboración de los Biodigestores de la Etapa 2, con el medidor de producción de gas (gasómetro) tipo Mariotte, se puede utilizar el siguiente material (costos al 11 de mayo de 2019 en la ciudad de Chihuahua, Chih., México):

- Bote lechero plástico de 50 litros con tapa y aro \$473.72 (cuatrocientos setenta y tres pesos 72/100 MN).
- Garrafón plástico de 20 litros (2 piezas) \$126.47 (ciento veintiséis pesos 47/100 MN) cada uno.
- Manguera inoxidable de 10 mm \* 1 metro (3 piezas) \$89.73 (ochenta y nueve pesos 73/100 MN) cada una.
- Conector campana hembra (dos piezas) \$37.38 (treinta y siete pesos 38/100 MN).
- Niple terminal macho (siete piezas) \$26.22 (veintiséis pesos 22/100 MN) cada uno.
- Válvula esfera CNX, \$41.38 (cuarenta y un pesos 38/100 MN).

Costo total del material para elaboración de un Biodigestor con Gasómetro (cámara para captura de gas y garrafón para recuperación de agua desplazada) para pruebas y capacidad de producción para uso en una vivienda (etapa 2), fue de \$1,295.53 (mil doscientos noventa y cinco pesos 53/100 MN) antes de impuestos.

## **8. DISCUSIÓN.**

En el tratamiento BOVSB la producción promedio de biogás fue de 4.17 L (17.36 L\*kgST<sup>-1</sup>) cantidad que es mucho menor a la reportada en la literatura, la cual dice que se pueden alcanzar hasta 0.5 metros cúbicos de biogás, por kilogramo de masa (Reyes-Aguilera, 2017), en este trabajo, se reporta la cantidad directa de volumen desplazado de agua, sin embargo, Ramírez-Sánchez (2016) describe que la producción obtenida de biogás, equivale al doble del líquido desplazado, aun así, la producción es baja comparado con lo que indica Reyes-Aguilera (2017).

Posiblemente continuando con la producción y midiendo durante un periodo más largo, la obtención de biogás con este tipo de biodigestores, llegue a niveles mayores, pero la producción en el periodo reportado, fue lenta y en algunas repeticiones dentro de tratamientos, no se observó producción de biogás.

Rivas-Solano *et al.* (2010), indican que la producción de metano tiene un límite que depende de la naturaleza de la materia dispuesta en el sistema digestor, además de la estructura de la comunidad microbiana presente. La materia prima utilizada en este trabajo, mostró un contenido alto de cenizas (materia inorgánica), y bajo contenido de humedad, lo que podría haber contribuido a que dé inicio, se afectara el proceso de biogás, generando condiciones para un arranque lento y baja producción, sin embargo, para corroborar esto, tendría que realizarse un trabajo donde se comparara la producción de biogás, con materiales que aportaran diferente contenido de cenizas, para correlacionar el efecto del contenido de materia seca, orgánica e inorgánica en el material a digerir, con la producción de biogás, sin embargo, dada la falta de obtención de gases en este trabajo en las repeticiones dentro de tratamientos, y considerando que no se encontraba dicho objetivo planteado dentro del proyecto, no es posible considerar este efecto.

Con respecto a la nula producción observable de biogás en los tratamientos con Bicarbonato de Sodio, Rivas-Solano *et al.* (2010), indican que debe ser tomado en cuenta que adicionar residuos domésticos e industriales a un biodigestor en funcionamiento, puede afectar la productividad, en lugar de favorecerla, en este caso, la adición de bicarbonato de sodio fue planeada y realizada con el propósito de evaluar si estabiliza la fermentación como lo ha mencionado Pacheco-González (2016), posiblemente, en las condiciones del presente trabajo, el efecto fue contrario por las características del sistema del biodigestor en pequeña escala (Etapa 1), sin embargo, dada la alta variabilidad de los datos por la falta de producción observable en algunas repeticiones, no es posible afirmar este efecto, a reserva de repetir el experimento, y obtener mejores resultados.

A pesar de la baja productividad, los biodigestores para pruebas y comparación de producción de biogás, mostraron su utilidad, con la producción observable y medible en algunos biodigestores, con los cuales se logró obtener datos cuantificables para

análisis, con un costo bajo, además, dado que se utilizaron piezas de cobre para la conexión de los sistemas del biodigestor con el gasómetro, en actividades similares posteriores, los costos se pueden reducir, conexiones de plástico para uso hidráulico, previendo con más tiempo, la evaluación para evitar fugas en el sistema.

### **9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se recomienda repetir el experimento de la etapa 1, en las mismas condiciones, asegurando que no existan fugas de gas para asegurar la comparación y producción de todos los biodigestores. Los biodigestores de bajo costo para pruebas de la etapa 1, mostraron ser útiles para este tipo de trabajos, disminuyendo por bastante, los gastos operativos de los trabajos experimentales. En las condiciones del presente trabajo, fue más práctico el uso de estiércol de bovino como materia prima, observando producción a partir del quinto día de fermentación.

### **10. BIBLIOGRAFÍA**

- Arce-Cabrera, J. J. (2011). Diseño de un Biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del Litoral. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador.
- Corona-Zúñiga, I. (2007). Biodigestores. Monografía. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.
- Elasri, O. & El amin-Afilal, M. (2016). Potential for biogas production from the anaerobic digestion of chicken droppings in Morocco. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agricult.*, 5:195-204.
- FAO. (2011). Manual de Biogás. Santiago de Chile.
- Filippín, C., Follari, J. & Vigil, J. (s.f.). Diseño de un biodigestor para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de vacas lecheras en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de la Pampa. Recuperado el 15 de agosto de 2018 desde [http://cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/28bib\\_arch.pdf](http://cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/28bib_arch.pdf).
- Gajardo-Alarcón, N. L. (2013). Estudio de la producción de biogás en función de la temperatura, en un biodigestor tipo chino. Memoria de Título. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile.

- Homan, E. (s.f.). Biogas from Manure. PennState Extension. Pennsylvania State University. Recuperado el 19 de Agosto de 2018 desde <https://extension.psu.edu/biogas-from-manure>.
- Lv, Z., Feng, L., Shao, L., Kou, W., Liu, P., Gao, P., Dong, X., Yu, M., Wang, J. & Zhang, D. (2018). The Effect of Digested Manure on Biogas Productivity and Microstructure Evolution of Corn Stalks in Anaerobic Cofermentation. *Hindawi BioMed Research International*, 2018:1-10.
- Martínez-Lozano, M. (2015). Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 7(3):96-115.
- Odnagam, S., Khaewnak, N., Dolwichai, T. & Srisertpol, J. (2014). A comparative study on gasoline, LPG and Biogas affecting the dynamic responses of SI engine. *Future Information Technology, Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Pp:927.
- Olaya-Arboleda, Y. & González-Salcedo, L. O. (2009). *Fundamentos para el Diseño de Biodigestores*. Universidad Nacional de Colombia.
- Pacheco-González, S. I. (2016). *Construcción y evaluación de un digestor anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia.
- Pérez-Medel, J. A. (2010). *Estudio y Diseño de un Biodigestor para Aplicación en Pequeños Ganaderos y Lecheros*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Ramírez-Sánchez, G. C. (2016). *Valoración de la Producción de Biogás durante un Proceso de Digestión Anaerobia con Contenido Ruminal de Origen Bovino bajo Condiciones de Tiempo, Carga y Temperatura Diferenciales*. Tesis de Maestría. Universidad de Manizales. Colombia.
- Reyes-Aguilera, E. A. (2017). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos*.

Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano, 24(60-81).

Rivas-Lozano, O., Faith-Vargas, M. & Guillén-Watson, R. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Tecnología en Marcha, 23(1):39-46.

SEMARNAT-SAGARPA. (2010). Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de biodigestores en México. Recuperado el 16 de agosto de 2018 desde <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/CD001057.pdf>.