

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA**



Obtención de biogás por digestión anaerobia a partir de la  
fermentación de tres mezclas de sustratos orgánicos en la  
comunidad de la Huaquilla

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR

Alexis Julinho Montalbán Romero

ASESOR

Alberto Zacarías Hurtado Merino

Morropón, Perú

2020

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 013- 2020/UCSS/FIA/DI

Siendo las 09:00 a.m. del día 26 de agosto de 2020 - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- |                                    |                 |
|------------------------------------|-----------------|
| 1. José Luis Sosa León             | presidente      |
| 2. Mario Antonio Anaya Raymundo    | primer Miembro  |
| 3. Bertha Marcelina Ruiz Jange     | segundo Miembro |
| 4. Alberto Zacarias Hurtado Merino | asesor          |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada: **“OBTENCIÓN DE BIOGÁS POR DIGESTIÓN ANAEROBIA A PARTIR DE LA FERMENTACIÓN DE TRES MEZCLAS DE SUSTRATOS ORGÁNICOS EN LA COMUNIDAD DE LA HUAQUILLA”**, que presenta la bachiller en Ciencias Ambientales, **Alexis Julinho Montalbán Romero** cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el Jurado acuerda:

APROBAR

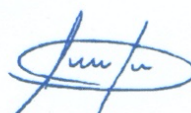
DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **BUENA** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare **EXPEDITA** para conferirle el **TÍTULO** de **INGENIERO AMBIENTAL**.

Lima, 26 de agosto de 2020.



José Luis Sosa León  
PRESIDENTE



Mario Antonio Anaya Raymundo  
1° MIEMBRO



Bertha Marcelina Ruiz Jange  
2° MIEMBRO



Alberto Zacarias Hurtado Merino  
ASESOR

## **DEDICATORIA**

A Dios por otorgarme la dicha de seguir adelante en mi vida personal y profesional, por concederme sabiduría y bendecir cada paso que doy.

A mis padres, Luis Montalbán y Yanet Romero por estar siempre a mi lado apoyándome en los momentos más difíciles del desarrollo de esta investigación. También por contribuir con valores éticos y morales, exigencias, consejos y su amor incondicional hacia mí persona.

A mi abuelo Luis Romero que desde el cielo guía mi caminar y me ayuda a seguir adelante, a pesar de las circunstancias de la vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

- A mi papá y mamá por estar siempre apoyándome en el desarrollo de esta investigación y confiar plenamente en mí. Además, por permitirme desarrollar la ejecución del proyecto en su parcela.
- Al microbiólogo Alberto Hurtado Merino por aceptar ser el asesor de esta investigación y por su apoyo con las apreciaciones críticas para su ejecución y desarrollo.
- A mi hermana, tíos y tías que me apoyaron cordialmente en todo momento.
- A cada uno de los profesores de la UCSS que me impartieron sus conocimientos y de alguna forma contribuyeron en mi formación profesional.
- A mis amigos y amigas por brindarme su amistad, consejos, y por los momentos vividos en nuestra formación académica.

## ÍNDICE GENERAL

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Índice general .....   | iv          |
| Índice de tablas.....  | vi          |
| Índice de figuras .....  | vii         |
| Índice de apéndices .....  | viii        |
| Resumen.....   | ix          |
| Abstract .....   | x           |
| Introducción .....   | 1           |
| Objetivos .....  | 3           |
| CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....   | 4           |
| 1.1.    Antecedentes .....   | 4           |
| 1.2.    Bases teóricas especializadas .....  | 13          |
| 1.2.1. Residuos sólidos.....   | 13          |
| 1.2.2. Tipos de residuos sólidos .....   | 13          |
| 1.2.3. Biocombustibles .....   | 15          |
| 1.2.4. Biogás.....   | 17          |
| 1.2.5. Digestión anaeróbica.....   | 19          |
| 1.2.6. Procesos de digestión para tratar residuos orgánicos.....   | 25          |
| 1.2.7. Biorreactor.....  | 26          |
| CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....   | 29          |
| 2.1.    Diseño de la investigación .....   | 29          |
| 2.1.1. Lugar y fecha.....  | 29          |
| 2.1.2. Descripción del experimento.....  | 30          |
| 2.1.3. Tratamientos.....   | 36          |
| 2.1.4. Unidades experimentales.....  | 37          |
| 2.1.5. Identificación de variables y su mensuración.....   | 37          |
| 2.1.6. Diseño del experimento.....   | 38          |
| 2.2.    Análisis estadístico de los datos .....  | 39          |
| CAPÍTULO III: RESULTADOS .....   | 39          |
| 3.1.    Resultados .....   | 40          |
| 3.1.1. Formulación de 3 mezclas de banano orgánico, excretas de vaca y cerdo con una relación C: N de 20:1; 25:1; 30:1 ..... | 40          |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| CAPÍTULO IV: DISCUSIONES.....      | 49 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....      | 53 |
| CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES ..... | 54 |
| REFERENCIAS .....                  | 56 |
| TERMINOLOGÍA .....                 | 63 |
| APÉNDICES.....                     | 65 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1. <i>Proceso de obtención de biocombustibles</i> .....  | 17          |
| Tabla 2. <i>Composición bioquímica del biogás</i> .....  | 18          |
| Tabla 3. <i>Número de tratamientos con relación C:N, 20:1; 25:1 Y 30:1</i> .....                         | 36          |
| Tabla 4. <i>Variables utilizadas en la investigación</i> .....   | 38          |
| Tabla 5. <i>Distribución aleatoria de los diferentes tratamientos para la producción de biogás</i> ..... | 38          |
| Tabla 6. <i>Determinación de la relación C:N DE 20:1</i> .....   | 40          |
| Tabla 7. <i>Determinación de la relación C: N de 25:1</i> .....  | 41          |
| Tabla 8. <i>Determinación de la relación C: N de 30:1</i> .....  | 41          |
| Tabla 9. <i>Cantidad de sustratos para cada tratamiento de acuerdo a la relación C: N</i> .....          | 42          |
| Tabla 10. <i>Determinación de los sólidos totales en los tres tratamientos</i> .....                     | 43          |
| Tabla 11. <i>Producción de biogás del tratamiento 1, tratamiento 2 y tratamiento 3</i> .....             | 44          |
| Tabla 12. <i>Test:Duncan Alfa = 0.05</i> .....   | 46          |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <i>Figura 1.</i> Etapas de la fermentación metanogénica. ....  | 200         |
| <i>Figura 2.</i> Biodigestor chino. ....   | 277         |
| <i>Figura 3.</i> Biodigestor Indio.....  | 277         |
| <i>Figura 4.</i> Biodigestor Horizontal.....   | 288         |
| <i>Figura 1.</i> Ubicación geográfica donde se desarrolló el proyecto, comunidad de<br>"La Huaquilla".....                               | 30          |
| <i>Figura 6.</i> Diseño del biorreactor anaerobio para la obtención de biogás. ....  | 311         |
| <i>Figura 2.</i> Diseño del biorreactor anaerobio para la producción de biogás<br>a partir de sustratos orgánicos.....                   | 32          |
| <i>Figura 8.</i> Colección de los residuos orgánicos para la producción de biogás. ....  | 322         |
| <i>Figura 9.</i> Preparación de la mezcla de los sustratos orgánicos para la prefermentación..   | 333         |
| <i>Figura 10.</i> Determinación de sólidos totales de la mezcla.....   | 344         |
| <i>Figura 11.</i> Cuantificación del biogás producido por la fermentación anaerobia.....   | 355         |
| <i>Figura 12.</i> Diagrama de actividades para la obtención de tratamientos y sus repeticiones.<br>.....                                 | 366         |
| <i>Figura 13.</i> Producción de biogás del Tratamiento 1.....  | 455         |
| <i>Figura 14.</i> Producción de biogás del Tratamiento 2.....  | 455         |
| <i>Figura 15.</i> Producción de biogás del tratamiento 1, según la temperatura ambiente. <b>¡Error!</b><br><b>Marcador no definido.7</b> |             |
| <i>Figura 16.</i> Producción de biogás del tratamiento 2 según la temperatura ambiente. ....   | 477         |
| <i>Figura 17.</i> Funcionamiento de una cocina a gas con el biogás producido. ....   | 488         |
| <i>Figura 18.</i> Presión del gasómetro con el biogás producido.....   | 488         |



## ÍNDICE DE APÉNDICES

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Apéndice 1. Registro interdiario de la temperatura ambiente del mes de diciembre de 2017.....          | 65          |
| Apéndice 2. Registro interdiario de la temperatura ambiente del mes de enero de 2018.....              | 65          |
| Apéndice 3. Registro interdiario de la temperatura ambiente del mes de febrero de 2018.....            | 65          |
| Apéndice 4. Registro interdiario de la temperatura ambiente del mes de marzo de 2018.....              | 66          |
| Apéndice 5. Registro interdiario de la temperatura ambiente del mes de abril de 2018.....              | 66          |
| Apéndice 6. Temperatura ambiente en meses en la producción de biogás.....                              | 67          |
| Apéndice 7. Producción de biogás de acuerdo a la temperatura ambiente en meses del tratamiento 1 ..... | 67          |
| Apéndice 8. Producción de biogás de acuerdo a la temperatura ambiente en meses del tratamiento 2 ..... | 67          |
| Apéndice 9. Análisis de Varianza (tipo III).....   | 68          |

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue evaluar la producción de biogás a partir de la fermentación de tres mezclas de banano orgánico, estiércol de vaca y cerdo en una parcela de la comunidad de La Huaquilla (Piura). La metodología se desarrolló en dos fases: en la fase 1, se obtuvo biogás por fermentación anaerobia de las mezclas de los sustratos y en la Fase 2, se determinó la cantidad del biogás producido por los 3 tratamientos. Se prepararon tres tratamientos de materia orgánica, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub> con una concentración de C: N de 20:1, 25:1 y 30:1 respectivamente con un rango de 25 a 30 % de sólidos totales, por triplicado, constituyendo nueve unidades experimentales. Las mezclas resultantes fueron sometidas a pre fermentación aeróbica durante cuatro días a temperatura ambiente y luego se fermentaron anaeróbicamente en biorreactores de 18 L de capacidad durante 132, 151 y 170 días para los tratamientos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub> respectivamente. El biogás producido por los tratamientos T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> fue de 216 L cada uno, el T<sub>3</sub> no produjo biogás durante el tiempo de estudio. Finalmente, se pudo comprobar la producción de biogás en una cocina de cuatro hornillas donde se observó su funcionamiento. Se concluyó que las mezclas de banano orgánico, estiércol de vaca y cerdo son adecuados para la producción de biogás.

**Palabras clave:** Anaerobio, biodegradables, biogás, orgánico, producción, sostenible y relación C/N.

## **ABSTRACT**

The objective of the present research was to evaluate the production of biogas from the fermentation of three mixtures of organic banana, cow and pig manure in a plot of the community La Huaquilla (Piura). The methodology was developed in two phases: Phase 1, biogas was obtained by anaerobic fermentation from the mixtures of substrates and Phase 2, the quantity of biogas produced by the 3 treatments was determined. Three treatments of organic matter T1, T2 and T3 were prepared with a concentration of C: N of 20:1, 25:1 and 30:1 respectively, with a range of 25 to 30 % of total solids per triplicate, constituting nine experimental units. The resulting mixtures were subjected to aerobic pre-fermentation for 4 days at room temperature, then exposed to anaerobic fermentation in 18 L capacity bioreactors during 132, 151 and 170 days for the T1, T2 and T3 treatments respectively. The biogas produced by the T1 and T2 treatments was 216 L respectively, while T3 did not produce biogas during the study time. The biogas produced by the T1 and T2 treatments was 216 L respectively, while T3 did not produce biogas during the study time. Finally, the biogas production could be verified in a four-burner stove where its operation was observed. It was concluded that mixtures of organic bananas, cow and pig manure are suitable for biogas production.

**Keywords:** Anaerobic, biodegradable, biogas, organic, production, sustainable and C: N ratio.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe un interés mayor por el ambiente donde vivimos debido a los estudios elaborados para saber cómo influye el CO<sub>2</sub> en la capa de ozono y el daño que causa a la tierra. Los combustibles fósiles son los que aportan gran cantidad de gases a la atmósfera cuando estos son procesados o combustionados. El gas que se emana con mayor frecuencia y abundancia es el CO<sub>2</sub>. Por esta razón, la preocupación por obtener otras fuentes que reemplacen a los combustibles fósiles persistirá para que la contaminación sea menor (Navarro, 2016).

La mayoría de los países del mundo están optando por utilizar la energía renovable debido a la gran importancia que tiene al no generar contaminación en el ambiente donde vivimos, es por ello que la producción de biogás es una alternativa viable que permite tratar de manera adecuada los residuos orgánicos, generando impactos positivos en las comunidades que lo requieren (Union Concerned Scientist, 2017). Por otro lado, el estiércol de los animales, como el ganado porcino y vacuno, y desperdicios vegetales (banano orgánico) hace que la producción de biogás sea más eficiente, accesible y amigable con el ambiente al reducir la emisión de gases contaminantes (Corcio, 2006). Actualmente la mayoría de la población desconoce los beneficios que tiene el tratar adecuadamente las excretas de los animales y los desperdicios agrícolas (Altamirano, 2017).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el aprovechamiento de los residuos orgánicos provenientes de los establos, de las parcelas o agroindustrias, etc., evitan la aglomeración de los mismos, la polución de plagas y enfermedades, entre otros; por lo tanto el impacto negativo al ambiente es menor.

En el Alto Piura existen comunidades campesinas donde el manejo de los residuos agroindustriales es deficiente; pese a que su buen manejo y aprovechamientos son beneficiosos para el hombre y el ambiente (Municipalidad Provincial de Morropón Chulucanas, 2014). Se escogió la comunidad “La Huaquilla” debido a la gran cantidad de

residuos orgánicos que existen en dicha zona, sobre todo los residuos de cultivos del banano. La mayoría de los pobladores cuentan con terrenos dedicados a la producción de banano orgánico y plátano convencional, por lo que la producción de estas especies es de gran importancia para la economía de esta comunidad.

El biogás es un tipo de energía ambientalmente amigable y sostenible que puede ser producido a través del aprovechamiento de residuos agropecuarios y agroindustriales. Por lo tanto, la presente investigación aborda la evaluación y cuantificación de la producción de biogás a partir de sustratos orgánicos (descarte de banano orgánico, estiércol de cerdo y de vaca), siendo relevante en el ámbito ambiental, social y científico, ya que representa una alternativa de solución integral a diversos problemas actuales.

Esta investigación está estructurada en seis capítulos, el primero corresponde al marco teórico, en el cual se presentan las evidencias científicas de otros investigadores empleadas como respaldo de la investigación; por otro lado en el segundo capítulo se describen los materiales y metodologías requeridos y aplicadas al estudio. Cabe destacar que dentro de la metodología se ha estructurado en dos fases, en la primera se ha evaluado la producción de biogás de los tres sustratos orgánicos, mientras que en la segunda se ha cuantificado el biocombustible obtenido, mediante métodos matemáticos establecidos por otros investigadores.

En el tercer capítulo se presentan los resultados obtenidos de la investigación, asimismo, en el cuarto y quinto capítulo se argumentan las discusiones y se establecen las conclusiones del estudio. Por último se formulan recomendaciones para posibles extensiones del estudio que realicen otros investigadores.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Evaluar la producción de biogás a partir de la fermentación de 3 mezclas de banano orgánico, estiércol de vaca y estiércol de cerdo en la comunidad de la Huaquilla, distrito de Morropón.

### **Objetivos específicos**

- Estimar la relación C: N necesaria para producir la mayor cantidad de biogás.
- Determinar el tiempo máximo de producción de biogás por cada tratamiento.
- Valorar el funcionamiento de una cocina de uso doméstico con el biogás producido a partir de la fermentación anaerobia de los sustratos orgánicos.

## CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

### 1.1. Antecedentes

#### Internacional

Sarabia *et al.* (2015) realizó una investigación titulada “Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales (México). El objetivo de esta investigación fue comparar la digestión anaerobia de excretas de borrego con la digestión anaerobia de excretas de borrego más lodos de aguas residuales y la codigestión anaerobia de excretas de borrego más rumen. La metodología empleada fue bajo el método de cuarteo, determinada por la norma Mexicana NMX-AA-015-1985 con el fin de conseguir una muestra específica. El sistema de codigestión estuvo compuesto de botellas de 1 L para que sirvan de depósitos de reserva, constituyendo 9 unidades experimentales debido a que se formularon 3 tratamientos con sus respectivas repeticiones. Los 3 tratamientos estuvieron constituidos: T1) excretas de borrego - lodos, T2) excretas de borrego - rumen y T3) excretas de borrego. Asimismo, se utilizó un diseño completamente aleatorio de un factor. Los resultados mostraron que la codigestión de las excretas de borrego con rumen y la codigestión de excretas de borrego daban una producción de 42.14 y 43.83 L, respectivamente. Los resultados antes mencionados produjeron mayor cantidad de biogás en comparación a la codigestión del estiércol de borrego y lodos de aguas residuales con 35.47 L. El análisis estadístico de la composición de biogás demostró que significativamente no fueron diferentes los valores de metano (CH<sub>4</sub>) ( $p = 0.5660$ ) y dióxido de carbono (CO) ( $p = 0.2589$ ). Los valores de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) ( $p = 0.0379$ ), mostraron que la concentración fue menor en el tratamiento de estiércol de borrego con lodos de aguas residuales, que en el tratamiento de estiércol de borrego. Los autores concluyeron que los residuos agrícolas pueden reaprovecharse mediante el desarrollo de codigestión anaerobia para convertirse en energía.

Guevara *et al.* (2015) realizaron el siguiente estudio “Biorrefinería a partir de banano de rechazo: un sistema integrado para la co-producción de etanol, proteína unicelular, biogás y compost” en la zona de Urabá (Colombia). El objetivo principal del estudio fue producir etanol, proteína unicelular, biogás y compost a partir de banano de descarte. La metodología empleada en la investigación fue realizar una biorrefinería de segunda generación con la finalidad de utilizar 40 kg de banano de descarte en la fermentación anaerobia para producir etanol y biogás a partir de los residuos resultantes, los ensayos se hicieron por triplicado. La degradación de los azúcares y extracción de los sólidos solubles fue realizado por el proceso de hidrólisis endógena, obteniendo como producto los jugos entre 14 y 16 ° Brix; logrando la producción de abono orgánico a partir de la porción insoluble. Para la obtención del etanol con un contenido de alcohol entre 7 y 8 % v/v y adicionalmente proteína unicelular (levadura), los jugos fueron fermentados y llevados a un proceso de destilación del fermento logrando producir un contenido de etanol de 40 a 50 % como producto final y vinaza. Se realizó la fermentación anaerobia de la vinaza resultante, en un biorreactor anaerobio híbrido UASB-Filtro de 97 L, en tres fases en serie con un flujo continuo de 2 L/día para la obtención de biogás (3 m<sup>3</sup> de biogás / m<sup>3</sup> de vinaza). Finalmente, obtuvieron etanol, biogás y co-productos provenientes de la biomasa del banano. La conclusión del estudio fue que los productos energéticos como el etanol y biogás fueron similares a los que se obtienen de la caña de azúcar.

Guevara *et al.* (2012) en su investigación “La obtención de Etanol y Biogás a partir de banano de rechazo” en Medellín (Colombia), tuvieron como objetivo desarrollar un proceso fermentativo mediante hidrólisis endógena estimulada para la producción de etanol y biogás a partir del descarte de banano. La metodología del estudio estuvo basada en tres técnicas para la hidrólisis y extracción de los jugos: hidrólisis endógena, hidrólisis por enzimas exógenas y finalmente la hidrólisis química. Se utilizó un biodigestor discontinuo de 5 L de capacidad para fermentar las vinazas resultantes de la extracción de alcoholes. Las vinazas fueron mezcladas con y sin inóculo (excretas de cerdo y rumen), es decir se realizaron tres tratamientos por triplicado. En el tratamiento 1, se consideró solo vinaza; tratamiento 2, vinaza y excretas de cerdo y en el tratamiento 3, vinaza y rumen. Los resultados fueron significativos, debido a que hubo rendimientos favorables aumentando la producción de biogás en los tratamientos con inóculos. Rendimiento del tratamiento 1 fue 0.92 L,



tratamiento 2, 2.09 L y tratamiento 3, 2.24 L. El rendimiento promedio de etanol fue de 0.065 L/kg de banano verde y 2.24 L de biogás por litro de vinaza. La conclusión fue que dicho proceso obtuvo rendimientos comparables a la fermentación de caña de azúcar. Asimismo, tiene beneficios como su bajo costo, fácil operación y por ser una alternativa de solución ambientalmente compatible en el área del manejo de residuos de cosecha.

Magaña *et al.* (2006) realizaron la tesis titulada “Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabras” en el estado de Guanajuato (México). El objetivo de este estudio fue obtener la producción de metano controlando las variables básicas como lo son el pH y la temperatura. Efectuaron dos tipos de experimentos, en el primer experimento fue determinar la producción diaria de biogás al utilizar estiércol de cabras. Para esto emplearon matraces de kitazato de cristal de 1 L de capacidad, por triplicado que fueron usados como recipiente para la mezcla de agua-excremento. Estos matraces fueron introducidos en una tina con resistencia eléctrica con la finalidad de mantener la temperatura óptima para el crecimiento de las bacterias metanogénicas. El segundo experimento fue determinar la cantidad de metano del biogás mediante análisis cromatográfico. Implementaron un biodigestor de 9 L de capacidad a una escala de laboratorio, como unidad experimental sin repeticiones. Para ello, 1400 g de estiércol de cabra con 3 L de agua fue utilizado y se homogenizaron el estiércol de cabra con agua. Los resultados demostraron que en el primer experimento la producción diaria de biogás máxima a nivel laboratorio fue 196.67 ml, teniendo un manejo adecuado de las variables comprendidas durante el proceso de digestión anaeróbica. Además, observaron una relación directamente proporcional entre la temperatura y el pH de la mezcla, manteniendo constante la producción de gas con tendencia creciente. El segundo experimento mostró una producción de biogás en los primeros cinco días debido al incremento de la presión con una temperatura y pH constantes. Asimismo, se concluye que probando en el laboratorio con los dos experimentos de los matraces como el biodigestor a escala, la producción fue mayor cuando las mezclas se agitaban.

## **Nacional**

Garavito (2018) en su tesis titulada “Relación entre la producción de biogás y biol a partir de restos de trucha y estiércol vacuno” en Lima (Perú), tuvo como objetivo identificar la

relación entre la producción de biogás y biol a partir de los restos de trucha y estiércol vacuno. Para esto, un biodigestor tipo batch fue utilizado, el cual permitió evaluar tres tratamientos y un control (por triplicado), es decir 12 biorreactores como unidades experimentales con diferentes cantidades de estiércol de ganado vacuno y restos de trucha durante 10 semanas. El diseño experimental fue completamente al azar (DCA). Es así que el primer tratamiento estuvo contenido de 6 kg de estiércol de ganado vacuno y 66 L de restos de trucha, el segundo tratamiento de 12 kg de estiércol de ganado vacuno y 57 L de restos de trucha y tercer tratamiento de 24 kg de estiércol de ganado vacuno y 39 L de restos de trucha. Al finalizar el estudio, los resultados demostraron que la producción de biogás fue de 159.30 L, 121.57 L y 95.57 L para los tratamientos 1, 2 y 3 respectivamente. La composición del biol representó las siguientes concentraciones: nitrógeno 6600 mg.L<sup>-1</sup>; potasio 1136.67 mg.L<sup>-1</sup>; fósforo 565.89 mg.L<sup>-1</sup>; magnesio 563.33 mg.L<sup>-1</sup>; calcio 1603.33 mg.L<sup>-1</sup> y sodio 1408.33 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente. Concluyó que la producción de biogás tuvo un rendimiento mayor, debido a la adición del estiércol de vacuno en distintas concentraciones a los restos de trucha.

Altamirano (2017) realizó una investigación sobre “Potencial de producción energética de biogás a partir de residuos pecuarios” en La Libertad (Perú). El objetivo principal de la investigación fue evaluar el potencial de producción de biogás a partir de los residuos pecuarios generados para estimar el potencial de producción energética en la región. El estudio comprendió el cálculo de producción promedio de estiércol de ganado vacuno, ovino, caprino y aves en base a datos de diferentes fuentes de referencia de producción pecuaria. Para el cálculo de la cantidad de estiércol, rumen y sangre, consideró el tamaño y peso del animal, es así que obtuvo como resultado promedio de estiércol generado 16.41 kg/d para grandes rumiantes, 1.58 kg/d para rumiantes pequeños y 0.097 kg/d para aves; de igual manera consiguió de los rumiantes grandes 22.98 kg/d de sangre, 32.82 kg/d de rumen y de los rumiantes pequeños 0.95 kg/d de sangre y 7.89 kg/d de rumen. Finalmente, logró estimar una producción de biogás de 817 178 221.00 m<sup>3</sup>/año equivalente a una producción energética de 1 470 920.81 mv/año. El autor concluyó que con todo el potencial eléctrico mencionado, el 76.72 % sería el total de la energía eléctrica consumida en el año 2015 y en el año 2016, 72.86 % beneficiando a la región La Libertad a partir de los residuos generados.

Zambrano (2016) en su tesis “Rendimiento de biogás a partir de mezclas entre estiércol de vacuno y suero de quesería mediante digestión anaeróbica” en Lima (Perú), tuvo como objetivo principal determinar el rendimiento de biogás a partir de mezclas entre estiércol de vacuno y suero de quesería mediante digestión anaeróbica, obtenido artesanalmente. El diseño experimental fue desarrollar la investigación en dos etapas: en la etapa 1, realizó la caracterización y acondicionamiento de los sustratos; y la producción de biogás en la homogenización de los sustratos (estiércol de vacuno y suero de quesería) en la etapa 2. La metodología fue realizar biodigestores anaeróbicos con una carga fija a escala piloto y con una temperatura de 26 °C. Asimismo, el pH fue regulado con hidróxido de calcio (cal) al 65 % de pureza, estabilizándose las mezclas mediante una fase aeróbica y anaeróbica. Las muestras constaron en 3 repeticiones por tratamiento para probar si existen igualdad en las unidades experimentales, los datos estadísticos se obtuvieron del programa MINITAB 16 ( $\alpha = 0.05$ ). Utilizó tres mezclas de estiércol de vacuno y suero de quesería con proporciones (tratamientos) de 1:3, 1:5 y 1:7. Los resultados demostraron, que la proporción de 1:7 en referencia a la mezcla de estiércol de vacuno y suero de quesería generó una producción de biogás mayor a las demás proporciones (1:7, 8.930 ml; 1:5, 6.560 ml; 1:3, 6.190 ml). La autora concluyó que la mezcla de estiércol de vacuno y de suero de quesería con una proporción de 1:7 fue óptima para la generación de biogás generando 27.67 % de metano y 66.38 % de nitrógeno gaseoso.

Bedoya y Chaparro (2016) llevaron a cabo una investigación sobre el “Uso del estiércol de animales para la producción de biogás” en Moquegua (Perú). El objetivo de este estudio fue evaluar la producción de biogás (gas metano) utilizando estiércol de animales en condiciones ambientales controladas. El diseño experimental de la investigación estuvo compuesto por un tratamiento y tres repeticiones. Cada biodigestor obtuvo un volumen de 100 L de agua en ausencia de cloro y un volumen de 60 L de estiércol de cordero y chivo (12 kg c/u relación de 1 a 1). Emplearon el coeficiente de determinación mediante el programa estadístico Sigma Plop ( $\alpha = 0.05$ ) para el análisis de los datos. El resultado de producción de biogás a los 63 días fue de 445 L, a una temperatura de 28 °C de noche y 58 °C de día a sol directo. Los mayores resultados de producción de biogás fueron obtenidos a partir de los 35 días de iniciada la fermentación anaeróbica. Los autores corroboraron la presencia de biogás

mediante la quema, lo que produjo una llama azul, concluyéndose que es posible obtener biogás en condiciones ambientales a partir de la mezcla de estiércol de cordero y chivo.

Vega (2015) desarrollo una investigación para la Institución Educativa Privada Cristiana Bereshi, titulada “Diseño, construcción y evaluación de un biodigestor semicontinuo para la generación de biogás con la fermentación anaerobica del estiércol de conejo y cuy” en Chimbote (Perú). El objetivo principal de este estudio fue obtener biogás a partir de la fermentación anaeróbica del estiércol de cuy en un biodigestor semicontinuo. El diseño de la investigación que utilizó fue descriptiva. La metodología que efectuó fue en dos etapas: la etapa 1 en referencia al proceso de la biodigestión de los sustratos y en la etapa 2 la estabilización de los parámetros de acuerdo a los procesos. La materia prima fue excretas de cuy y de conejo para la producción de biogás. El desarrollo de la investigación involucró la definición de las características de la materia prima y la cantidad total de estiércol producido, con la finalidad de determinar la capacidad del biodigestor. Es así que definieron que la producción diaria de estiércol de cuy representó 5.6 kg y 9.8 kg de estiércol de conejo. De acuerdo a ello, los autores demarcaron la cantidad de mezcla en una proporción de 1:3, es decir, por cada kilogramo de estiércol 3 L de agua. Por lo tanto, la cantidad total de mezcla a utilizarse en el biodigestor fue de 39.2 kg por día. Siendo el volumen total del biodigestor de 2.27 m<sup>3</sup>. Como resultado, el investigador obtuvo una producción total de biogás de 6 m<sup>3</sup>, con una velocidad de producción de 0.194 m<sup>3</sup>/día.

García (2014) en la tesis titulada “Influencia de la pulpa y agua de despulpado del café (*Coffea arabica*) sobre la producción de biogás con estiércol de bovino” en Chachapoyas (Perú). El objetivo principal fue evaluar mezclas diferentes de agua de despulpado, deyecciones y pulpa de café para generar biogás. El autor evaluó tres variables independientes, pulpa de café (volumen de estiércol con respecto al volumen de pulpa de café = %peso), agua sin pulpa de café (volumen de agua de despulpado de café con respecto al volumen del biodigestor = %volumen) y relación estiércol:agua a partir del diseño estadístico de Box Behnken. Se utilizó envases plásticos de gaseosa de 1750 ml como biorreactores. Asimismo, se recolectó con la técnica del desplazamiento de agua el biogás generado en envases calibrados de plástico de gaseosas de 500 ml de capacidad, El tiempo máximo de fermentación fue de 35 días. El volumen superior de biogás generado fue de 375

ml, utilizando 70 ml de agua de despulpado de café (4% volumen/ volumen), 875 ml de estiércol (relación estiércol: agua de 1:1), y 13 g de pulpa de café (3% peso/ volumen). Se utilizó el software Statgraphics para mostrar los resultados experimentales, se demostró que se puede obtener un máximo de biogás de 275.2 ml, valor mínimo al obtenido experimentalmente, cuando los valores de las variables independientes son: 875.0 ml de estiércol de bovino, 79.3361 ml de agua de despulpado de café y 13.0 g de pulpa de café, siendo los valores de la primera y la tercera variables iguales a los utilizados en la presente investigación. Concluyó que, el agua de despulpado no es considerable para la mayor producción de biogás y debe haber una óptima relación entre la pulpa de café y el estiércol.

Salazar *et al.* (2012) evaluó la “Producción de biogás y biol a partir de excretas de ganado” en la ciudad de Tacna (Perú). Los investigadores con el desarrollo de la investigación, dieron a conocer a la población de Tacna la gran importancia de los biodigestores, dadas las condiciones ambientales óptimas para la ejecución de la misma. El objetivo fue diseñar, construir y evaluar un biodigestor tipo manga de polietileno alimentado por excretas de ganado ovino para la producción y promoción del biogás y biol. El diseño de la investigación lo realizaron en cuatro fases: diseño del sistema de biodigestión, construcción del sistema de biodigestión, evaluación del funcionamiento del biodigestor y por último, investigación de los biodigestores en Tacna. El biodigestor tubular o de manga semicontinua, tuvo una capacidad de 2 m<sup>3</sup> (1677 L). Asimismo, se procedió a realizar una carga inicial de la mezcla de 429 kg de estiércol y 1257 L de agua, posteriormente se dejó reposar por un período de 30 días. Los autores evaluaron el sistema en los meses de marzo y abril del año 2011, tiempo en que realizaron el control de diferentes condiciones como: pH del lodo, obtención de biogás por día, temperatura de la manga y la temperatura ambiental y lo recargaron diariamente con una proporción de 3:1 de la mezcla del sustrato con agua. Los resultados demostraron a partir del día 30 una producción promedio diaria de 400 L/d con una temperatura del biodigestor de 30 a 40 °C mientras que la temperatura ambiente oscilaba entre 20 y 30 °C durante los meses de estudio. Además, concluyeron que, a diferencia de la zona urbana, los pobladores rurales tienen mayor conocimiento sobre biodigestores. Ellos están dispuestos a desarrollarlas de acuerdo a las condiciones de la zona.

Cueva (2012) desarrolló la “Obtención de biogás de estiércol porcino y restos vegetales, por fermentación semicontinua” en la Universidad Jorge Basadre Grohmann en Tacna (Perú). El objetivo del presente estudio fue producir biogás por fermentación semicontinua, a partir de restos vegetales y estiércol de cerdo. Asimismo, utilizó un diseño descriptivo, transversal prospectivo y en el análisis estadístico se procedió a emplear el software EXCEL y el programa STATGRAPHICS PLUS versión 5,1 para desarrollar la estadística descriptiva del resultado de la producción de biogás con el tiempo de fermentación. Para el desarrollo de la investigación, el investigador utilizó un biodigestor tipo chino modificado de fibra de vidrio con capacidad de 250 L. Antes de iniciar la fermentación anaerobia obtuvo compost a partir del excremento de cerdo, hojas de pecana, restos de vegetales del mercado y agua en un período de 17 días, a partir de la fermentación aerobia. Los residuos orgánicos fueron introducidos dentro del biodigestor para realizar la producción de biogás, a temperatura ambiente por un tiempo de 4 meses; después de esto, obtuvo un rendimiento promedio de  $14.864 \text{ cm}^3$  desde los primeros 18 días de inicio del proceso fermentativo y un rendimiento acumulado hasta los 58 días al término de la fermentación y un volumen total de biogás de  $644.668 \text{ cm}^3$ . Concluyó, resaltando la gran importancia en el proceso de fermentación del excremento de ganado porcino, debido a que se conoce muy poco de sus beneficios y su contribución al cuidado del ambiente.

Castillo y Tito (2011) desarrollaron la “Obtención de biogás a partir de excremento de cuy en condiciones ambientales” en Tacna (Perú). El objetivo de este estudio fue obtener biogás a partir del excremento de cuy por fermentación en batch en condiciones ambientales en Tacna. La metodología que emplearon fue haciendo uso de dos mezclas de substratos (2 tratamientos, sin repeticiones) para obtener biogás: la primera mezcla estuvo formada por rastrojo del alimento de cuy y estiércol de cuy; la segunda mezcla estuvo compuesta por estiércol de cuy, rastrojo de alimento de cuy, residuos de grass. Las mezclas fueron acondicionadas con agua y agregados al prefermentador (con capacidad de 230 L). La composición de materia orgánica fue de excremento de cuy soleado, rastrojo de alimento vegetal de cuy y agua de caño con un volumen de 30 L, 60 L y 30 L respectivamente. El tratamiento uno y dos tuvieron un proceso de prefermentación por separado, tanto el rastrojo vegetal de cuy soleado y el residuo de gras soleado fueron mezclados previamente en proporciones iguales para ser agregados al prefermentador. Como resultado final, los autores

obtuvieron 104 L de biogás en el tratamiento 1 por un periodo de 7 meses y 6 días, mientras que en el tratamiento 2 en un periodo de 7 meses y 19 días obtuvieron una producción de 452 L. Concluyendo que el biogás obtenido fue de calidad muy buena.

Corcio (2006) logró la “Producción de biogás a través de la digestión anaeróbica de lodos flotantes de oxidación de las aguas residuales” en Chepén (Perú). El objetivo principal de dicho estudio fue reducir la materia putrescible a condiciones más estables. Para esto construyó un biodigestor de plástico con una capacidad de 3 L con un mecanismo de medición de presión, evacuación de lodo y toma de muestra, así como un sistema de recolección de gas acumulado. El biodigestor almacenó 1.5 L de lodo flotante para el proceso de digestión anaeróbica por 45 días. Los lodos flotantes fueron tomados de la planta de tratamiento con un periodo de acumulación de 60 días en 10 puntos de muestreo, tomando 2 litros de lodo en cada uno haciendo un total de 80 L, tomadas en diferentes distancias y profundidades. Los resultados demostraron una producción de biogás de 12.08 L durante 45 días, logrando remover 87.63 % de DBO, 95.86 % DQO, 59.76 % de sólidos volátiles totales, 46.24 % de aceites y de grasas y 99.9 % de coliformes termotolerantes. Concluyendo, que la digestión anaeróbica fue una buena opción para producir biogás y un método muy importante para la remoción de la carga orgánica de los lodos flotantes.

## **Local**

Hurtado (2019) desarrolló la “Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la biomasa de residuos orgánicos agropecuarios Chulucanas” en Piura (Perú). El objetivo principal de la investigación fue evaluar la generación de biogás a partir de estiércol de vaca, cerdo y residuos celulósicos en Chulucanas. El enfoque fue mixto dado que, a partir de la actividad agropecuaria y el tratamiento de los residuos orgánicos logró la producción de biogás para reducir los efectos adversos al ambiente. El diseño fue descriptivo aplicativo con aspectos cualitativos y cuantitativos. La metodología fue en dos fases: en la fase 1, produjo biogás por digestión anaerobia de los sustratos; y luego determinó la cantidad de biogás generado en la fase 2. Posteriormente formuló la mezcla adecuada con una relación C25:N1 y 30 % de sólidos totales; con la mezcla resultante, el autor realizó una prefermentación por 4 días con agua de cal al 2 % a temperatura ambiente, luego la mezcla

la fermentó anaeróbicamente durante 90 días en digestores de 20 L de capacidad, para posteriormente determinar el volumen de biogás producido. Como resultado, el autor obtuvo 232 L de biogás después de 90 días de digestión, con un porcentaje de 65 % de metano.

## **1.2. Bases teóricas especializadas**

### **1.2.1. Residuos sólidos**

La Ley General de Residuos Sólidos N° 27314 (2000) definió a los residuos sólidos como aquellas sustancias, productos o subproductos en estado sólido o semisólido que se generan por diferentes actividades humanas.

### **1.2.2. Tipos de residuos sólidos**

Los residuos sólidos se clasifican según su origen en: residuos domiciliarios, comerciales, de limpieza de espacios públicos, de establecimientos de salud, industriales, actividades de construcción, agropecuario y actividades especiales (Ley de Gestión Integral de Residuos sólidos N°27314, 2000).

#### **a) Residuos agropecuarios**

Weber *et al.* (2012) definieron que los residuos agrícolas son generados en el campo, los cuales pueden ser transformados en digestores de escala pequeña que no generan elevados costos. De igual manera los residuos orgánicos secundarios proveniente de los animales, como las heces que pueden ser aprovechados por digestión anaerobia y obtener la relación carbono y nitrógeno equilibrada en el digestor. Es importante para el desarrollo de los microorganismos.

A continuación, se describen los residuos agrícolas de uso en la investigación:

#### **- Residuos de banano orgánico (*Musa sp.*)**

El Banano Orgánico (*Musa sp.*) es un producto que se considera por ser una importante alternativa nutritiva e impulsor de aportes económicos. La costa norte del país se ha



convertido en un importante productor y Piura ha aportado el 81 % de producción total en los últimos 10 años (Rojas, 2013).

El banano está compuesto por pseudotallos que se forman de cormos, donde se originan yemas laterales (hijos) y es una planta herbácea. El pseudotallo está formado de bases foliares que circundan el tallo (cormo) y la distribución helicoidal (filotaxia espiral) está en las hojas. La inflorescencia se desarrolla en el centro y es terminal (Torres, 2012).

La principal fuente generadora de residuos en la agricultura proviene de raíces, tallos, hojas o una parte de la planta los cuales no son aprovechados y gran parte son originados de subproductos del cultivo de café, banano, arroz y otros; los cuales se convierten en desechos por no utilizarlos adecuadamente, algunos se descomponen y adhieren al suelo, algunos son utilizados como abonos, otros para la ganadería o son eliminados con la finalidad de que no perjudiquen las labores agrícolas (Haro *et al.*, 2017).

Es así como, durante toda la cadena productiva del banano se generan diferentes residuos orgánicos, en las primeras actividades del manejo del cultivo como la etapa de poda, deshoje y limpieza de malezas y también en la etapa de manejo de la fruta, en la actividad de eliminar la bellota, eliminar manos y desflore (Rojas, 2013).

#### **- Residuos de crianza de animales**

Los residuos de la crianza de animales son obtenidos en su mayoría por la producción y reproducción ganadera. El estiércol en algunos países no se considera como residuo ni presenta efectos considerables para el medio ambiente debido a que se usa como abono para las plantas y se realiza un manejo adecuado de las mismas. (Chávez y Rodríguez, 2016).

Los residuos provenientes de la ganadería en el Perú corresponden en su mayoría a residuos de ganado vacuno, ovino, porcino y avícola, dentro de estos el 16 % corresponde a residuos que incluye subproductos de sangre, pezuña, cachos y excremento, mientras que el 51 %

pertenece a los cortes de carne. En los ovinos el 10 % corresponde a residuos de pezuña, sangre, excremento y cachos y el 40 % es carne aprovechable. En los porcinos solo existe un 10 % de residuos que van relacionados a estiércol y residuos de sangre, este sector es aquel del cual existe un mayor aprovechamiento de los animales, por el contrario, la producción avícola tiene un 18 % de residuos, incluyendo sangre, plumas, buche, cloaca y grasa (Chávez y Rodríguez, 2016).

### **1.2.3. Biocombustibles**

El origen del biocombustible es a base de biomasa, la cual es una sustancia orgánica de origen animal o vegetal, por lo tanto, la energía que almacena proviene de estos seres vivos; los vegetales mediante la fotosíntesis forman sustancias orgánicas, es por ello que hacen uso de la energía del sol y de esta manera forman sustancias orgánicas de igual manera los animales incorporan y almacenan energía a su organismo mediante el consumo de vegetales. El resultado de la transformación de sustancias considerados residuos puede ser de usos energético (Flores y Lara, 2011). De igual manera Salinas y Gasca (2009) definieron a la biomasa como diferente tipo de material orgánico cuyo origen es por un proceso biológico de los organismos vivos, ya sea plantas o animales o sus desechos metabólicos.

Así también señalaron que son aquellos biocarburantes que sustituyen en mayor o en menor parte el uso de combustibles fósiles, además disminuye las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en comparación al uso de hidrocarburos mediante los usos de biomasa para consumo energético; permitiendo de esta manera disminuir el impacto negativo de los combustibles fósiles sobre el cambio climático (Salinas y Gasca, 2009). De igual manera Friedman y Penner (2009) definieron al biocombustible como cualquier tipo de combustible derivado de biomasa organismos vivos o recientemente metabólicos.

Los biocombustibles se producen haciendo uso de tecnología convencional aplicado a azúcares y carbohidratos mediante el proceso de fermentación, para aceites y grasas proceso de transesterificación y para los residuos orgánicos la digestión anaeróbica. Es así que mediante estos procesos en los azúcares obtienen etanol, metanol y n-butanol; en los aceites

obtienen biodiesel y en la combinación de metano, anhídrido carbónico y dióxido de carbono (gases naturales) producida de residuos orgánicos se obtiene biogás (Álvares, 2009).

#### **a. Tipos de Biocombustibles**

Los biocombustibles son originados a partir de biomasa y considerados como energía renovable, que se puede presentar en forma sólida mediante residuos vegetales y parte biodegradable de residuos urbanos, en forma líquida en bioalcoholes y biodiesel; por último, en forma gaseosa mediante biogás e hidrógeno (Flores y Lara, 2011).

Salinas y Gasca (2009) clasificaron a los biocombustibles en tres tipos: biocombustibles sólidos, biocombustibles líquidos y gaseosos. Mientras que Ganduglia *et al.* (2009) definieron criterios para clasificar los biocombustibles:

- De acuerdo al estado físico: combustibles sólidos, dentro de los cuales se tiene por ejemplo a los residuos de origen vegetal, así también líquidos y gaseosos.
- De acuerdo al origen: agro combustibles como bioetanol y biodiesel de cultivos anuales y dendrocombustibles (leña).
- De acuerdo al uso final: biocombustibles para generación de energía térmica dentro de ellos tenemos a la leña y biogás, y los biocombustibles para generación de energía eléctrica está la cascarilla de arroz, biogás, bagazo de caña, biodiesel para generadores y biocombustibles para transporte como el biodiesel y bioetanol.
- De acuerdo al proceso de conversión: Son tres los procesos:
  - Los químicos que obtiene el biodiesel por transesterificación
  - Los térmicos que engloban a los residuos forestales de combustión directa para la obtención de gas por pirolisis.

- Los bioquímicos dentro del cual está el biogás por fermentación anaeróbica, etanol.

Es así que Salinas y Gasca (2009) establecieron también el tipo de proceso para la obtención de un biocombustible, el cual depende del tipo de biomasa, el uso energético y el biocombustible deseado.

Tabla 1

*Proceso de obtención de biocombustibles*

|                 | <b>Técnicas</b>      | <b>Productos</b>         | <b>Aplicaciones</b>              |
|-----------------|----------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Mecánicos       | Astillado            | Leñas                    | Calefacción                      |
|                 | Trituración          | Astillas                 | Electricidad                     |
|                 | Compactación         | Briquetas<br>Aserrín     |                                  |
| Termoquímicos   | Pirólisis            | Carbón                   | Calefacción                      |
|                 | Gasificación         | Aceites                  | Electricidad                     |
|                 |                      | Gasógeno                 | Transporte<br>Industria química  |
| Biotecnológicos | Fermentación         | Etanol                   | Transporte                       |
|                 | Digestión anaeróbica | Biogás                   | Industria química<br>Calefacción |
|                 |                      |                          |                                  |
| Extractivos     | Extracción           | Aceites                  | Transporte                       |
|                 | Físico-química       | Ésteres<br>Hidrocarburos | Industria química                |

*Fuente:* Salinas y Gasca (2009, p. 77)

#### **1.2.4. Biogás**

El biogás es definido como la mezcla de metano y otros gases originados por la degradación anaeróbica de materia orgánica y acción de microorganismos, con la ayuda de un biodigestor conectado a un vertedero controlado. La temperatura del digestor alcanza unos 50 °C

logrando un pH de 6.2 y 8 favoreciendo el desarrollo de los microorganismos. Así también la degradación bioquímica tiene un tiempo de duración que oscila entre 10 y 25 días, comprendida en tres fases: la hidrólisis y acidogénesis, la acetogénesis, y la metanogénesis. Las condiciones del proceso, el grado en el que se alcanzan y el sustrato orgánico logran que se alcance ciertas proporciones de los componentes del biogás, por ejemplo: El metano entre 54 – 70 %, el dióxido de carbono entre 27 – 45 %, y en los demás gases varía. La energía mecánica o eléctrica se obtiene mediante la combustión empleando el biogás (Ganduglia *et al.*, 2009).

Silva (2002) definió al biogás como un gas combustible que se puede originar por digestión de biomasa orgánica (desechos de humanos y de animales, residuos agrícolas, aceite de palma y plantas acuáticas), que comprende diferentes procesos bacterianos y enzimáticos simultáneamente. El cual según Weber *et al.* (2012) se compone de gases como dióxido de carbono y metano, y es obtenido por reacciones que llevan a cabo en diferentes puntos del proceso degradativo. Todo esto, se da por la acción microbiana de diferentes bacterias y arqueas las cuales producen metano.

El biogás está compuesto por metano, dióxido de carbono y pequeñas cantidades de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y nitrógeno, los cuales forman parte de un proceso elemental dentro del ciclo de vida de materia orgánica (Tabla 2) (Silva, 2002).

Tabla 2

*Composición bioquímica del biogás*

| <b>Componente</b>   | <b>Fórmula química</b> | <b>%volumen</b> |
|---------------------|------------------------|-----------------|
| Metano              | CH <sub>4</sub>        | 60-70           |
| Gas carbónico       | CO <sub>2</sub>        | 30-40           |
| Hidrógeno           | H <sub>2</sub>         | 1.0             |
| Nitrógeno           | N <sub>2</sub>         | 0.5             |
| Monóxido de carbono | CO                     | 0.1             |

(Continuación)

---

|                   |                  |     |
|-------------------|------------------|-----|
| Oxígeno           | O <sub>2</sub>   | 0.1 |
| Ácido sulfhídrico | H <sub>2</sub> S | 0.1 |

---

Fuente: Silva (2002).

### 1.2.5. Digestión anaeróbica

La biodigestión es un proceso en el cual se da una fermentación anaeróbica de la materia orgánica dentro de un biodigestor, descomponiéndola sin presencia de oxígeno atmosférico, para obtener dióxido de carbono, metano y agua (Magaña *et al.*, 2006, p. 28).

El biogás contiene un porcentaje alto en metano, que oscila entre 60-70 %; así también dióxido de carbono el cual oscila entre 30-40 % y 1 % de sulfuro de hidrógeno que aporta el olor desagradable antes de que sea filtrado (Tapia, 2016).

El biogás es producido por bacterias anaeróbicas, es decir, que solo pueden sobrevivir en ausencia de oxígeno atmosférico. Dichas bacterias son muy sensibles a perturbaciones ambientales, motivo por el cual se debe mantener los niveles de temperatura constantes (Hilbert, 2011), dicha digestión anaerobia es el método común de producción de biogás, la cual se da en un biodigestor, medio en que la materia orgánica se mezcla en el biodigestor junto con agua y forma una suspensión (Silva, 2002).

El desarrollo de los microorganismos se da por la presencia de nutrientes en el medio que son aportados por el sustrato. Asimismo, se considera la relación carbono nitrógeno de 16:1 y 25:1, por lo que tiende a reducirse durante la digestión debido a la remoción de carbono y así mejora la calidad para ser empleado como fertilizante. Sí se usa el estiércol de ganado como sustrato la relación carbono nitrógeno es 8:1, dicha relación es menor para estiércol de cerdo y aves, es por ello que no está incluido dentro del rango adecuada para llevar a cabo la digestión, es por ello que para obtener un equilibrio del carbono nitrógeno se realiza

cofermentación con otro sustrato, así como es la paja de arroz, la cual tiene una relación C:N de 80:1 y otros nutrientes tienen que encontrarse en cierta proporción como el fósforo y el azufre los cuales deben tener una relación C:P:S de (500-1000:5:3) (Weber *et al.*, 2012).

La digestión anaeróbica se realiza en etapas, la primera también llamada licuefacción en la que la biomasa es descompuesta por hidrólisis enzimática y se descompone para producir ácidos. Asimismo, seguido se da la etapa de gasificación, en la que las bacterias metanogénicas rompen los ácidos y los alcoholes, para así producir metano y dióxido de carbono (Figura 1).

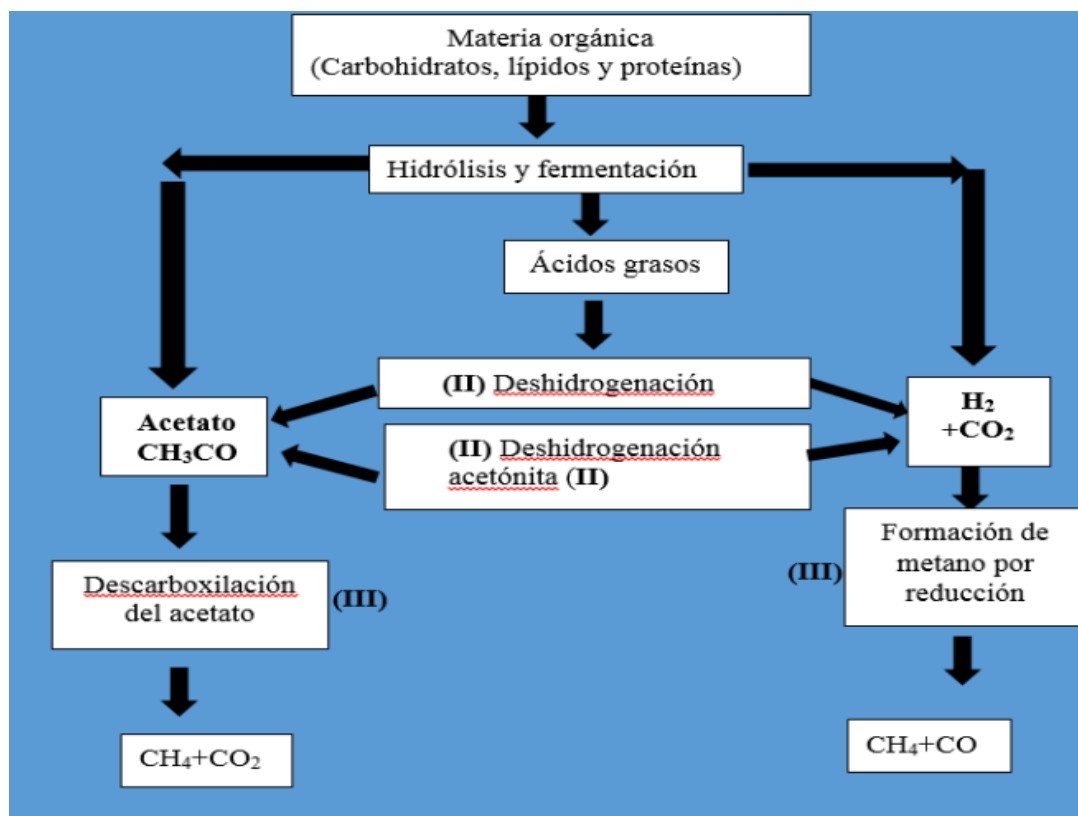


Figura 3. Etapas de la fermentación metanogénica.

Fuente: Guevara, (1996).

### a) Etapa de hidrólisis

Es el proceso mediante el cual se brindan los sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica, este es llevado a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la

Alimentación [FAO], 2011). Es la primera fase en la cual las bacterias, generalmente anaeróbicas facultativas, rompen y transforman en cadenas cortas y simples (ácidos orgánicos) las grandes cadenas de estructura carbonadas de la materia orgánica, liberando hidrógeno y dióxido de carbono (Hilbert, 2011).

Según la FAO (2011), la etapa hidrolítica puede llegar a ser muy lenta por diferentes factores como el contenido de sólidos en los residuos, temperatura, nivel de pH, composición bioquímica del sustrato, tiempo de retención hidráulica, volumen de las partículas, concentración de  $\text{NH}_4^+$  y de la concentración de los productos de la hidrólisis. Los principales microorganismos involucrados en el proceso de hidrólisis son: *Lactobacillus*, *Megasphaera*, *Sphingomonas*, *Sporobacterium*, *Bacteroides*, *Propioni- bacterium*, *Bifidobacteriu* (FAO, 2011).

En la hidrólisis las moléculas son reducidas de tamaño y pasan a ser moléculas complejas solubles e insolubles (MW 100 - 350) los cuales no son metabolizados directamente por los microorganismos anaeróbicos, la hidrólisis de polímeros orgánicos se lleva a cabo por enzimas extracelulares (proteasas, celulasas, lipasas y amilasas), los cuales son producidos por bacterias fermentativas primarias facilitando el transporte a través de la membrana para el metabolismo de los monómeros (Weber *et al.*, 2012 ).

## **b) Etapa de acidificación**

En esta etapa los monómeros liberados en la etapa de hidrólisis se degradan por reacciones fermentativas y los compuestos orgánicos funcionan como aceptores y donadores de electrones. Los productos más importantes de esta etapa son los ácidos grasos volátiles (AGV), los que cumplen una función de intermediarios degradativos como ácido propiónico, son alcoholes, n-valérico, n-butírico, caprónico y láctico (Weber *et al.*, 2012).

Es realizada por las bacterias acetogénicas, que degradan los ácidos orgánicos llevándolos a un grupo acético  $\text{CH}_3\text{-COOH}$  y liberando como productos hidrógeno y dióxido de carbono. Es una reacción endoenergética debido a la demanda de energía para poder realizarse, esto



se da por la relación simbiótica con bacterias metanogénicas, estas reducen los niveles de ácidos orgánicos quedando finalmente las bacterias acetogénicas (Hilbert, 2011).

Las bacterias involucradas son las facultativas, aquellas que pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno, tienen una tasa reproductiva rápida y son poco sensibles a las tasas de acidez y temperatura (Hilbert, 2011).

Los microorganismos involucrados en el proceso acidogénico, participan en el proceso hidrolítico; pero los géneros *Clostridium*, *Paenibacillus* y *Ruminococcus* se encuentran en las diferentes etapas de la fermentación; asimismo, son los dominantes en la fase acidogénica; también se encuentran presentes en la fase de hidrólisis y acetogenesis, el grupo grande de *Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides*, que se presentan en menor cantidad en la etapa metanogénica (FAO, 2011). Por otro lado, Mara y Horan (2003), citados por Rojas (2012), los monómeros son degradados por *Micrococcus*, *Streptococcus*, *Escherichia*, *Bacillus*, *Lactobacillus*, *Pseudomonas* y *Staphylococcus*.

#### **c) Etapa acetogénica**

Es el proceso mediante el cual productos que no son metabolizados directamente por organismos metanogénicos como los compuestos aromáticos, el etanol y los ácidos grasos volátiles son modificados en productos menos complejos a través de bacterias acetogénicas en acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ). Los principales microorganismos involucrados son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini* (FAO, 2011).

#### **d) Etapa metanogénica**

Las bacterias que intervienen en esta etapa son las bacterias anaeróbicas estrictas, aquellas que no pueden vivir en presencia de oxígeno, las cuales son muy sensibles ante fluctuaciones de cambios de acidez y temperatura. Es así que se obtiene como productos resultantes el metano y dióxido de carbono (Hilbert, 2011).

Los microorganismos encargados de producir metano son muy sensibles al oxígeno y a los ácidos, y su desarrollo y reproducción es muy lenta es así que solo pueden usar como sustrato a los compuestos orgánicos e inorgánicos más sencillos (Guevara, 1996). Los principales son las Arqueas metanogénicas, de estas se tiene *Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatii* y *Methanosarcina* (FAO, 2011).

Existen diferentes factores que influyen en la fermentación metanogénica, entre los que se tiene:

- Composición bioquímica de diferentes residuos, que permitan el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico, como el potasio, hierro, zinc, fósforo, níquel, azufre, calcio, molibdeno, cobalto, tungsteno, manganeso, selenio, magnesio y otros (FAO, 2011).
- Material de carga para la fermentación (residuos de cultivos, excretas de humanos y de animales), el cual debe ser en la cantidad necesaria para que se lleve a cabo un proceso de fermentación continuo, y además rico en nitrógeno y carbono (Guevara, 1996).
- Relación carbono nitrógeno es determinante en el proceso fermentativo, la relación ideal es C: N de 20-30:1. El estiércol de animal contiene una mayor cantidad de nitrógeno con una relación C: N menor a 25:1 y una generación de biogás en menor tiempo; a diferencia los residuos de origen agrícola tienen una mayor contenido de carbono con una relación superior a 30:1 y con una producción de gas más lento (Guevara, 1996).

Según la FAO (2011), para la obtención de una relación carbono nitrógeno apropiada, se necesita realizar la mezcla de materia en adecuada proporción, no muy concentrada ni muy diluida, una concentración de 5 a 10 %. Para el cálculo de la relación C: N se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$K = \frac{C1 * Q1 + C2 * Q2 + \dots + Cn * Qn}{N1 * Q1 + N2 * Q2 + \dots + Nn * Qn}$$

Donde:

K= C: N de la mezcla de materias primas

C= Contenido de carbono orgánico en cada materia prima (%)

N= Contenido de nitrógeno orgánico en cada materia prima (%)

Q= Peso fresco de cada materia (kg, ton)

Es recomendable que se manejen medidas volumétricas y se determinen parámetros como: densidad, masa y volumen.

- El contenido de sólidos totales de la mezcla con que se carga el biodigestor es de suma importancia para el desarrollo del proceso debido a que la movilidad de las bacterias se ve limitada a un mayor aumento de sólidos totales, y, por ende, afecta directamente en la producción de biogás (FAO, 2011).
- La temperatura es un factor importante para la fermentación ya que influye directamente en la digestión y fermentación, a mayor temperatura hay una mayor degradación, lo que aumenta la producción de biogás en menor tiempo (Guevara 1996).

Los microorganismos anaeróbicos pueden desarrollarse en tres rangos de temperatura: psicrófilos (por debajo de 25 °C), mesófilos (entre 25 y 45 °C) y termófilos (entre 45 y 65 °C), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento ( $\mu_{\text{máx}}$ ) mayor (FAO, 2011).

Por otro lado, Tapia (2016) precisó que la degradación anaeróbica se produce a una temperatura que oscila entre 3 y 70 °C. Existen diferentes bacterias que intervienen en el proceso de digestión anaerobia, por lo tanto, requieren de diferente rango de temperatura es así que las bacterias Psicrófilas actúan por debajo de los 20 °C, las bacterias Mesófilas entre los 20 °C y los 40 °C y las bacterias Termófilas está por encima de los 40 °C.

- El valor del pH adecuado para una digestión metanogénica es de 6.5 a 7.5. La disminución o aumento de este nivel afecta el proceso de fermentación (Guevara, 1996). Así también Tapia (2016) definió que el valor adecuado de pH para la digestión metanogénica es de 6.5 – 7.5 cercano a pH neutro, pero cuando este disminuye a 5 inhibe el crecimiento de las bacterias metanogénicas, por lo tanto se reduce la

producción de metano, aumentando el nivel de CO<sub>2</sub> y asimismo, hay aumento de sulfuro de hidrógeno.

### **1.2.6. Procesos de digestión para tratar residuos orgánicos**

La digestión de residuos orgánicos es realizada por diferentes microorganismos, a los cuales se necesita brindar condiciones necesarias para que se obtenga una producción óptima de biogás. Guevara (1996) describió una serie de procesos de digestión por la forma de alimentación y temperatura que se describen a continuación:

#### **a) Por la manera de alimentación:**

- La fermentación se puede dar de manera continua, la misma que se da en el digestor sin interrupción alguna, en la que la cantidad de descarga es igual al material que se incorpora, con lo que se produce gas de manera continua en el tiempo. Los digestores son de una capacidad 6.3 metros cúbicos hasta 15 metros cúbicos (Guevara, 1996).
- Fermentación semicontinua, es un proceso en el cual en un inicio del proceso se introduce una gran cantidad de materia prima que ocupa un 80 % del biodigestor y a medida que va reduciendo la producción de gas se va incorporando la reserva del 20 % (Guevara, 1996).
- Así también se tiene la fermentación por lotes que consiste en que los digestores se cargan una sola vez y si el rendimiento de gas disminuye se descargan a su totalidad y se vuelven a llenar nuevamente (Guevara, 1996).

#### **b) Por la temperatura**

- Fermentación termofílica, se da a una temperatura de 51 a 55 °C, lo que favorece una fermentación rápida con mayor rendimiento de gas en menor tiempo (Guevara, 1996).

- Fermentación mesofílica, con una temperatura de 28 a 35 °C, temperatura que hace que el sistema realice una digestión un poco más lenta con un consumo de energía menor en comparación con la fermentación termofílica (Guevara, 1996).
- Fermentación a temperatura ambiente, ocasiona que la fermentación varíe de una estación a otra debido a las fluctuaciones de temperatura, con la ventaja que necesita de poca inversión (Guevara, 1996).

### **1.2.7. Biorreactor**

Un biorreactor es un equipo empleado para desarrollar el proceso de cultivo o fermentación, ya sea en estado sólido o líquido. El diseño tiene que garantizar la homogeneidad entre los componentes del sistema y las condiciones adecuadas para el crecimiento microbiano y obtención del resultado deseado (Salazar y Porras, 2013).

Un biodigestor es un recipiente cerrado herméticamente. Es un sistema en el cual el proceso de cultivo de microorganismos es realizado, debe presentar igualdad en los componentes del sistema que se ha diseñado, para el desarrollo de microorganismos y producción de metano debe estar en perfectas condiciones. (García y Gómez, 2016).

Un biodigestor está compuesto por las siguientes partes según Guevara (1996):

Tubo de entrada de materia orgánica, cámara de fermentación o cuerpo del digestor, cámara de depósito de gas, cámara de salida de materia estabilizada o fermentada, conducto de gas (lleva el gas para ser usado), tapa hermética, gasómetro.

#### **a) Tipos de biodigestores**

##### **- Biodigestor chino**

Estructura constituida a base de hormigón, ladrillos, bloques y adobes; con un gasómetro adicionado. La estructura del biodigestor permanece debajo de la superficie el cual favorece

el proceso fermentativo debido a los cambios de temperatura. La presión del gas depende de su volumen (Guevara, 1996). Este tipo de biodigestor está constituido por tanques cilíndricos donde el tanque y el piso tienen forma de arco y permanecen debajo de la superficie (FAO, 2011).

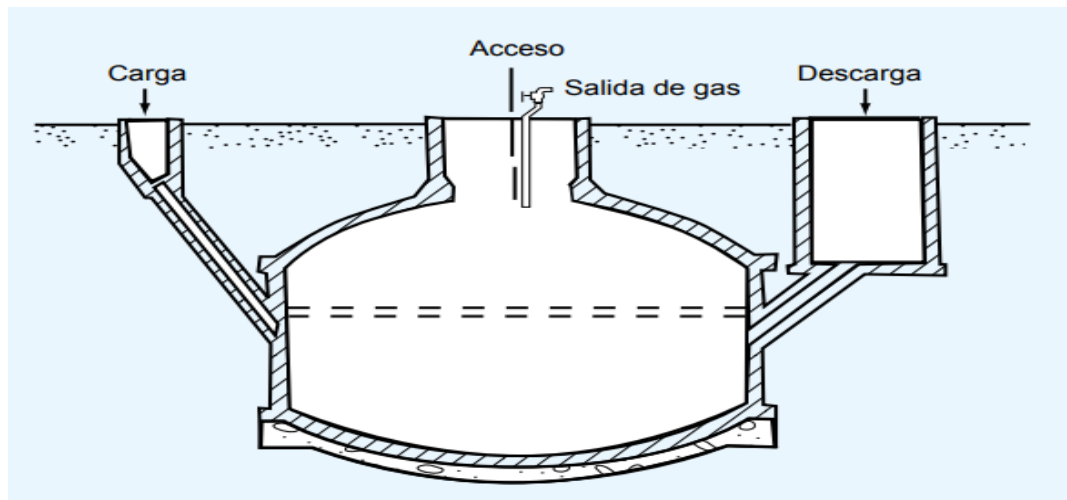


Figura 4. Biodigestor chino.

Fuente: FAO (2011).

#### - Biodigestor indio

Este biodigestor se ubica bajo la superficie verticalmente, se carga por gravedad una vez al día según el proceso fermentativo. La producción de biogás es diaria según las condiciones de operación las cuales deben permanecer estables (FAO 2011).

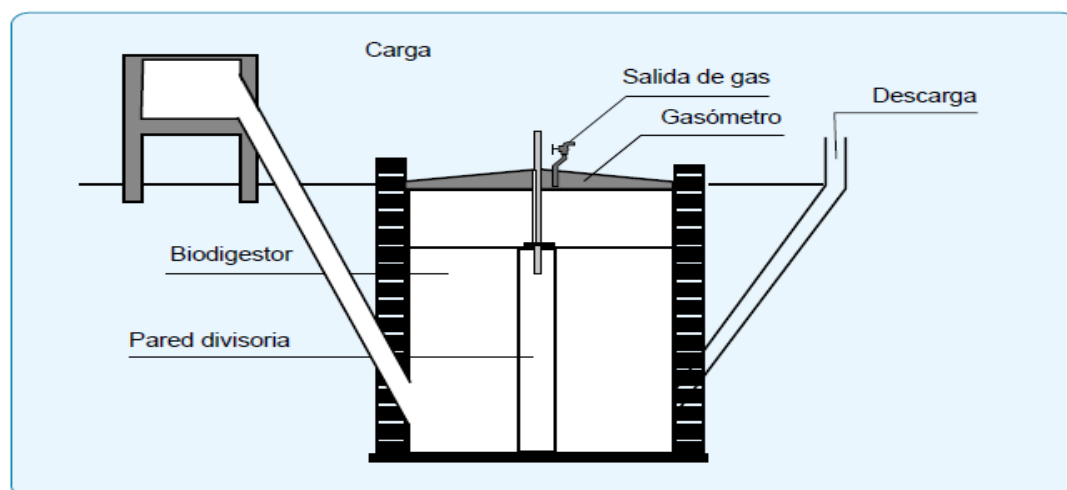
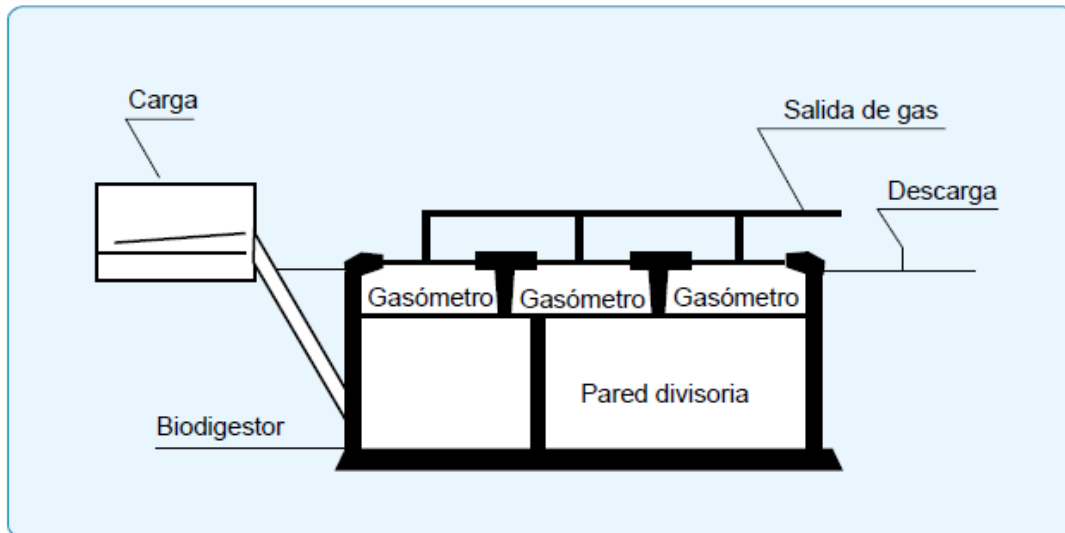


Figura 5. Biodigestor Indio.

Fuente: FAO (2011).

### - **Biodigestor horizontal**

Este biodigestor tiene poca profundidad y se dispone de manera rectangular, su estructura puede ser de concreto armado debido a que es sometida a una alta presión. Usada generalmente para el saneamiento de aguas cloacales debido a que facilita la salida del efluente, el flujo de retención es bajo favoreciendo su degradación (Guevara, 1996).



*Figura 6.* Biodigestor Horizontal.

*Fuente:* FAO (2011).

### - **Biodigestor Batch por lotes**

Este biodigestor se carga una sola vez, tiene una cúpula metálica con sello de agua. Su estructura se distribuye en bloques y concreto fuerte; presenta un gasómetro el cual puede ser afectado por la temperatura ambiente. Se utiliza para degradar materia orgánica sólida con restos de vegetales y desechos sólidos orgánicos, se debe tener en cuenta una buena inoculación para tener resultados exitosos.

## **CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Diseño de la investigación**

El presente estudio fue de alcance experimental, con tres tratamientos, cada uno con tres repeticiones sumando 9 unidades experimentales, las que fueron evaluadas y manipuladas (variables independientes) para observar sus efectos dentro de otras variables (variable dependiente). Asimismo, presentó un enfoque cuantitativo debido a que sigue un proceso secuencial y probatorio, basado en la recolección de valores cuantificables y su posterior análisis estadístico para establecer el comportamiento de las variables de estudio (Hernández *et al.*, 2010). Cada tratamiento tiene mezclas de los sustratos de descarte de banano orgánico, estiércol de cerdo y de vaca. Estimando una relación C:N de 20:1, 25:1 y 30:1 para cada tratamiento.

#### **2.1.1. Lugar y fecha**

La investigación se desarrolló en la parcela de un productor de banano orgánico de la comunidad de “La Huaquilla” (Figura 5), a 5 km del distrito de Morropón, provincia de Morropón, departamento de Piura. Para la determinación de los sólidos totales se realizó en el Laboratorio General de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería Agraria de la Universidad Católica Sedes Sapientiae (UCSS).





Figura 7. Ubicación geográfica donde se desarrolló el proyecto, comunidad de "La Huaquilla".

Fuente: Google Earth (2020)

### 2.1.2. Descripción del experimento

La investigación se realizó en dos fases. En la primera fase se obtuvo biogás por digestión anaerobia de banano orgánico, excretas de vaca y de cerdo. En la segunda fase, se determinó la cantidad de biogás producida por cada tratamiento.

#### a) Primera Fase: producción de biogás por digestión anaerobia de banano orgánico, excretas de cerdo y vaca

Con la mezcla de estos residuos orgánicos se llevó a cabo la biodigestión anaerobia para la producción de biogás que contiene gases como  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ . Las mezclas de los sustratos orgánicos que se utilizaron en la investigación se muestra en la tabla 9, en la sección de resultados.

## - Diseño y acondicionamiento del biorreactor anaerobio

Para acondicionar los biorreactores en el proyecto, se tomó el diseño que fue elaborado de forma propia (Figura 6) y luego se acondicionaron los 9 biorreactores anaerobios (Figura 7). Cada biorreactor fue constituido por latas de aceite con una capacidad de 18 L, cuyas dimensiones fueron 35.5 cm de altura, 24 cm de ancho y 24 cm de largo. En la parte superior del biorreactor, se realizó una abertura para luego adaptarle una llave de agua y una manguera plástica de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro y 1  $\frac{1}{2}$  metro de longitud para la salida del biogás. Posteriormente, el biogás producido fue almacenado en un gasómetro, el cual estuvo constituido por una pelota de polietileno de 27 L de capacidad.

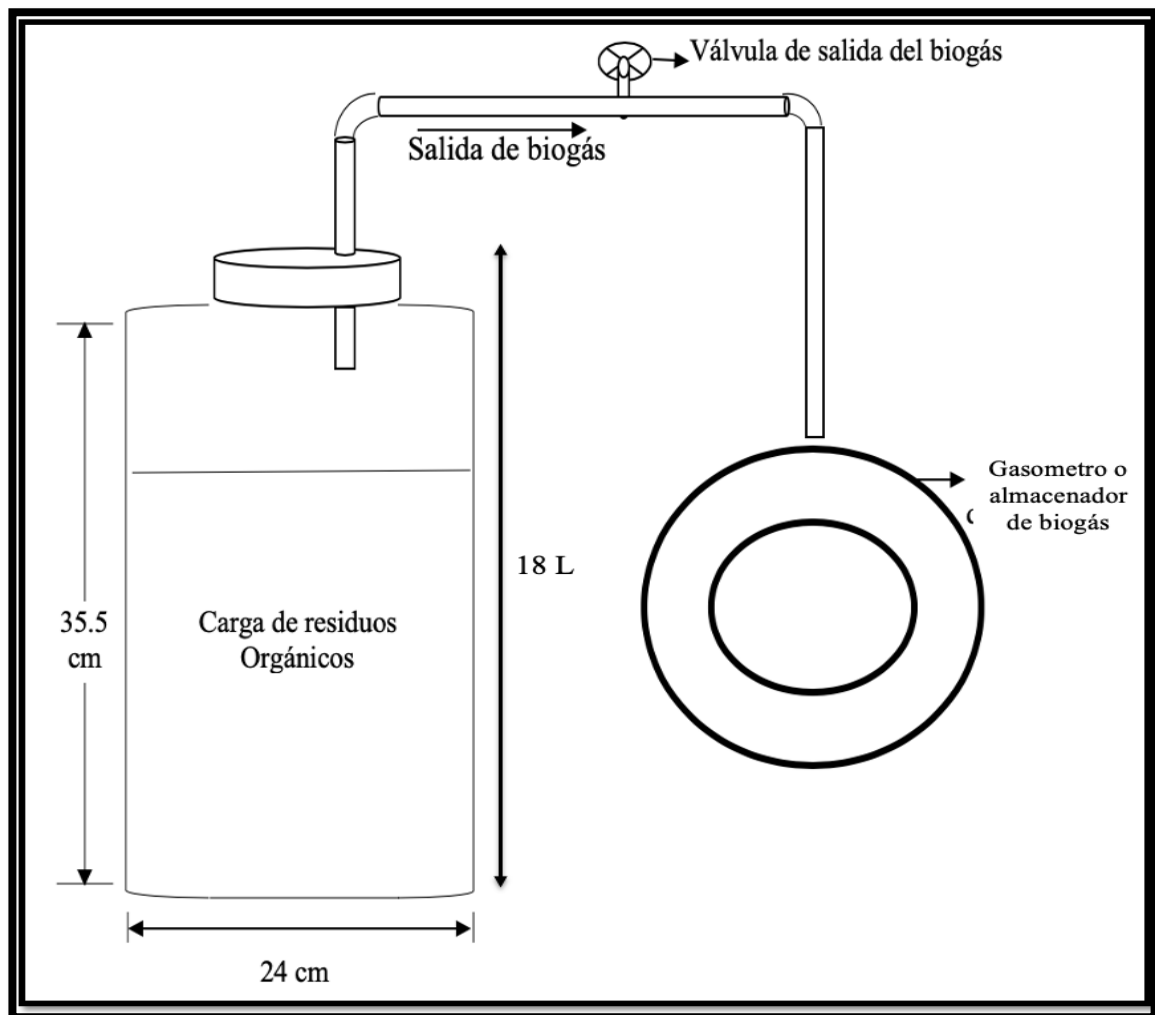


Figura 8. Diseño del biorreactor anaerobio para la obtención de biogás.

Fuente: Elaboración propia



Figura 9. *Diseño del biorreactor anaerobio para la producción de biogás a partir de sustratos orgánicos.*

Fuente: *Elaboración propia.*

#### - **Colección de la materia prima para la producción de biogás**

El banano orgánico de descarte fue recogido en la misma parcela, mientras que el estiércol de vaca y cerdo fueron colectados en los establos y lugares de crianza de la zona (Figura 8).



Figura 10. *Colección de los residuos orgánicos para la producción de biogás.* Fuente: *Elaboración propia.*

- **Formulación de las mezclas de sustratos de materia orgánica con una relación de C: N de 20:1, 25:1 y 30:1**

Según la literatura consultada, el porcentaje de carbono y nitrógeno en el banano orgánico es de 48 y 1 %, respectivamente (Steiner, 2006); en el estiércol de cerdo es de 25 y 1.5 %, respectivamente; mientras que en el estiércol de vaca es de 30 y 1.3 %, respectivamente (Varnero, 2011). Conociendo estos datos, se estimaron las cantidades de los sustratos usados en las tres mezclas, las cuales consistieron en: biomasa del banano orgánico, estiércol de cerdo y estiércol de vacuno, para aproximarse a una proporción de C: N de 20:1, 25:1 y 30:1. Cada proporción perteneció a un tratamiento con sus respectivas repeticiones según la capacidad del biodigestor.

- **Preparación y pre fermentación de la carga inicial para la producción de biogás**

Una vez estimada la relación C: N necesaria para la producción de biogás, se mezclaron los sustratos. Para ello, se utilizó (42.4035 kg) de estiércol de vaca, (49.0275 kg) de estiércol de cerdo. Estos residuos estuvieron frescos y fueron previamente desmenuzados para posteriormente, depositarlos en plásticos dentro de la parcela. Asimismo, se utilizó (29.7075 kg) de descarte de banano, se ralló en ralladores de cocina con la finalidad de obtener fragmentos de 3 - 5 cm (Figura 9). Para la pre fermentación, el material resultante se mezcló y se determinó el total de mezcla para cada tratamiento según la proporción C: N establecida. Posteriormente se le agregó agua de cal al 2 %, se homogenizó, y durante 4 días se removieron las mezclas.



*Figura 11.* Preparación de la mezcla de los sustratos orgánicos para la pre fermentación.

*Fuente:* Elaboración propia.

## - Digestión anaerobia para la producción de biogás

Antes y después de la pre fermentación, se determinó el contenido de sólidos totales para realizar la dilución correspondiente de agua de cal al 2 % para la fermentación en los biodigestores experimentales (18 L) teniendo en cuenta que un cultivo discontinuo requiere entre 25 – 30 % de sólidos totales (Sosa *et al.*, 1998). Este ensayo se realizó por duplicado, y para ello los sustratos fueron pesados, también se le determinó los sólidos totales iniciales de las mezclas utilizando el método gravimétrico (Oyuela, 2010) para lo cual se obtuvo 25 g de cada muestra por tratamiento en recipientes de vidrio vacíos y secos de peso conocido. Asimismo, se determinó el peso húmedo “P<sub>A</sub>” y se llevó a evaporación en estufa a 90 °C por 24 horas (Figura 10). Luego, se determinó la fase sólida peso seco “P<sub>B</sub>”. La determinación de los sólidos totales a través de la siguiente fórmula propuesta por Oyuela (2010).

$$ST = \frac{PB}{PA} \times 100$$

Donde:

ST: Sólidos totales

P<sub>A</sub>: Peso húmedo

P<sub>B</sub>: Peso seco



Figura 12. Determinación de sólidos totales de la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

- **Medición de la temperatura ambiente en la producción de biogás**

La temperatura fue medida en forma interdiaria usando un termómetro digital marca Winco en la parcela del productor, lugar donde se ejecutó la investigación. La medición se realizó durante todo el proceso fermentativo en tres momentos diferentes: las 8:00 a.m.; las 12:00 y las 4:00 p.m.

**b) Segunda fase: Cuantificación del biogás producido por cada tratamiento**

Para cuantificar la producción de biogás según Acuña y León (1998), el gasómetro fue presionado tal que el biogás se desplazó por la manguera de polietileno de 0.02 mm de diámetro hacia un matraz de 1 L, que contenía un volumen conocido de agua (Figura 11). El volumen de agua se midió y se consideró equivalente al volumen de biogás presente en el gasómetro. A través de este método, se pudo concluir que la capacidad total del gasómetro es de 27 L.



*Figura 13.* Cuantificación del biogás producido por la fermentación anaerobia.

*Fuente:* Elaboración propia.

### 2.1.3. Tratamientos

La investigación se desarrolló de acuerdo al diseño de investigación de Sánchez y Reyes (2005), es decir, tres grupos experimentales. Cada grupo es un tratamiento, haciendo un total de 3 tratamientos con tres repeticiones tal como se muestra en la Tabla 3.

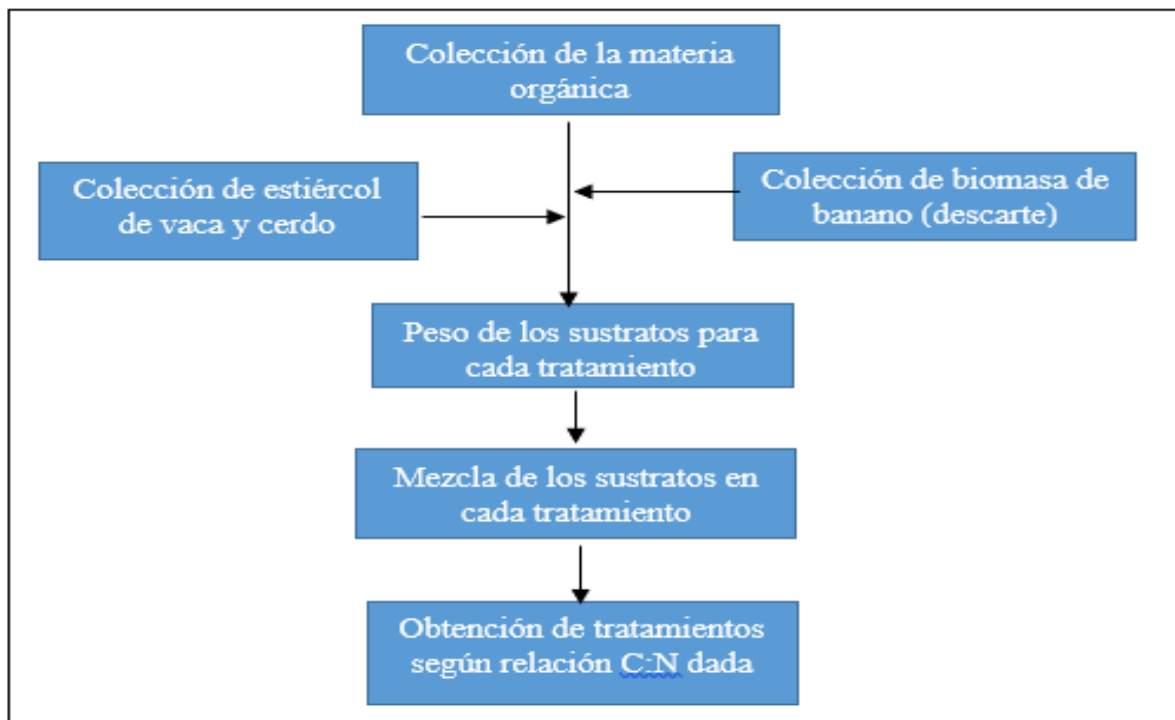
Tabla 3

*Número de tratamientos con relación C: N, 20:1; 25:1 Y 30:1.*

| TRATAMIENTOS   | RELACIÓN C:N |
|----------------|--------------|
| T <sub>1</sub> | 20:1         |
| T <sub>2</sub> | 25:1         |
| T <sub>3</sub> | 30:1         |

*Fuente:* Elaboración propia.

En la investigación, fue necesario definir los tratamientos con la relación C: N para poder determinar las cantidades necesarias de residuos orgánicos para la producción de biogás. Es por ello que en el siguiente diagrama se detalla cómo se obtuvo cada tratamiento (Figura 12).



*Figura 14.* Diagrama de actividades para la obtención de tratamientos y sus repeticiones.

*Fuente:* Elaboración propia.

#### 2.1.4. Unidades experimentales

Las unidades experimentales fueron cada uno de los biodigestores a los cuales se les aplicó aleatoriamente cada tratamiento teniendo cada uno de ellos 3 repeticiones, haciendo una muestra de tamaño 9.

#### 2.1.5. Identificación de variables y su mensuración

Tabla 4

*Variables utilizadas en la investigación*

|               | Variable             | Unidad      |
|---------------|----------------------|-------------|
| Dependiente   | Producción de biogás | Volumen (L) |
| Independiente | Residuos orgánicos   | Masa (kg)   |

*Fuente:* Elaboración propia.

- a) Sustratos orgánicos:** Los diferentes sustratos orgánicos utilizados para la digestión anaeróbica fueron recolectados en la misma comunidad, debido a la presencia de parcelas que cultivan el banano orgánico en el caso del descarte de banano. El estiércol de vaca y de cerdo fue fácil adquirirlo ya que los pobladores se dedican a la crianza de los mismos.
- b) Temperatura:** Fue registrada y medida diariamente desde el inicio de la investigación hasta su termino con un termómetro digital.
- c) Relación C/N:** Para establecer la relación C:N de 20:1, 25:1 y 30:1 fue de acuerdo a los datos obtenidos por Steiner (2006) y Varnero (2011). Con la comprensión de los datos, se realizó las mezclas de los sustratos orgánicos para la obtención de la relación C:N y posteriormente, los tratamientos con sus repeticiones.



**d) pH:** Fue medido al momento de la pre fermentación de los sustratos mezclados de acuerdo a la relación C: N establecida, empleándose una solución de cal al 2 % para regularizar el sistema.

**e) Sólidos totales:** Cuando se realizó la mezcla de los sustratos orgánicos (descarte de banano, estiércol de cerdo y vaca) con los tratamientos establecidos previamente, se efectuó la determinación de sólidos totales (Sosa *et al.*, 1998). El método usado de Oyuela (2010) fue necesario para medir los sólidos totales mediante el método gravimétrico.

**f) Producción de biogás:** Para la cuantificación de la producción de biogás se utilizó el método de desplazamiento del agua, según Acuña y León (1998). El biogás fue almacenado en pelotas de polietileno durante el proceso de fermentación.

#### 2.1.6. Diseño del experimento

El diseño de investigación para cada uno de los tratamientos es según lo explicitado por Sánchez y Reyes (2005). Se utilizó tres grupos experimentales, con tres repeticiones cada uno (cada tratamiento es un grupo experimental) (Tabla 5).

Tabla 5

*Distribución aleatoria de los diferentes tratamientos para la producción de biogás*

| Relación C:N | Concentración de biogás (unidades) |    |    |
|--------------|------------------------------------|----|----|
|              | R1                                 | R2 | R3 |
| 20:1         | X                                  | X  | X  |
| 25:1         | X                                  | X  | X  |
| 30:1         | X                                  | X  | X  |

*Fuente:* Elaboración propia

## 2.2. Análisis estadístico de los datos

En el presente estudio se utilizó el Diseño completamente al azar DCA, y para las comparaciones entre promedios de los tratamientos se usó la prueba de comparación múltiple de Duncan. Para el procesamiento de los datos se trabajó con el software estadístico Infostat versión 2020. El modelo estadístico se detalla a continuación:

### Modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + e_{ij}$$

$Y_{ij}$  = Producción de biogás en litros con la  $i$  – ésima mezcla de sustrato, en la  $j$  – ésima repetición.

$\mu$  = Efecto de la media poblacional de la producción de gas en litros.

$t_i$  = Efecto de la  $i$  – ésima mezcla de sustrato.

$e_{ij}$  = Efecto del error experimental en la  $i$  – ésima mezcla de sustrato, en la  $j$  – ésima repetición.

## CAPÍTULO III: RESULTADOS

### 3.1. Resultados

#### 3.1.1. Formulación de 3 mezclas de banano orgánico, excretas de vaca y cerdo con una relación C: N de 20:1; 25:1; 30:1

##### a) Determinación de la relación C: N para cada tratamiento

Se formuló las mezclas adecuadas de la biomasa del banano orgánico, estiércol de vaca y cerdo para alcanzar una proporción de C: N de 20:1, 25:1 y 30:1 (Tablas 6, 7 y 8). Según la capacidad del biodigestor de 18 L.

Tabla 6

*Determinación de la relación C: N de 20:1*

| SUSTRATO  | Peso (kg) | C (%)   | N (%) | Carbono | Nitrógeno |
|---|-----------|---------|-------|---------|-----------|
| <b>Banano orgánico (%<br/>C=48; % N=1)</b>      | 0.300     | 48.000  | 1.000 | 0.144   | 0.003     |
| <b>Estiércol de cerdo (%<br/>C=25; % N=1.5)</b> | 3.000     | 25.000  | 1.500 | 0.750   | 0.045     |
| <b>Estiércol de vaca (%<br/>C=30; % N=1.3)</b>  | 1.650     | 30.000  | 1.300 | 0.495   | 0.021     |
| <b>Total</b>                                    | 4.950     | 103.000 | 3.800 | 1.389   | 0.069     |

*Fuente:* Elaboración propia.

$$C: N = 1.389 \div 0.069$$

$$C: N = 20.1304$$

Tabla 7

*Determinación de la relación C: N de 25:1*

| <b>SUSTRATO</b>                                 | <b>Peso (kg)</b> | <b>C (%)</b> | <b>N (%)</b> | <b>Carbono</b> | <b>Nitrógeno</b> |
|---|------------------|--------------|--------------|----------------|------------------|
| <b>Banano orgánico (%<br/>C=48; % N=1)</b>      | 0.850            | 48.000       | 1.000        | 0.408          | 0.009            |
| <b>Estiércol de cerdo (%<br/>C=25; % N=1.5)</b> | 1.250            | 25.000       | 1.500        | 0.313          | 0.019            |
| <b>Estiércol de vaca (%<br/>C=30; % N=1.3)</b>  | 1.550            | 30.000       | 1.300        | 0.465          | 0.020            |
| <b>Total</b>                                    | 3.650            | 103.000      | 3.800        | 1.186          | 0.047            |

*Fuente:* Elaboración propia.

$$C:N = 1.186 \div 0.047$$

$$C:N = 25.2340$$

Tabla 8

*Determinación de la relación C: N de 30:1*

| <b>SUSTRATOS</b>                                | <b>Peso (kg)</b> | <b>C (%)</b> | <b>N (%)</b> | <b>Carbono</b> | <b>Nitrógeno</b> |
|---|------------------|--------------|--------------|----------------|------------------|
| <b>Banano orgánico (%<br/>C=48; % N=1)</b>      | 2.500            | 48.000       | 1.000        | 1.200          | 0.025            |
| <b>Estiércol de cerdo (%<br/>C=25; % N=1.5)</b> | 1.500            | 25.000       | 1.500        | 0.375          | 0.023            |
| <b>Estiércol de vaca (%<br/>C=30; % N=1.3)</b>  | 1.650            | 30.000       | 1.300        | 0.495          | 0.021            |
| <b>Total</b>                                    | 5.650            | 103.000      | 3.800        | 2.070          | 0.069            |

*Fuente:* Elaboración propia.

$$C:N = 2.070 \div 0.069$$

$$C:N = 30$$

**b) Determinación de la cantidad de sustratos de descarte de banano, estiércol de cerdo y vaca para cada tratamiento**

Para el tratamiento 1 con una relación C: N de 20:1 se necesitaron 8.16 kg de estiércol de cerdo; 4.488 kg de estiércol de vaca y 0.816 kg de residuos de banano orgánico. Para el tratamiento 2 con una relación C: N de 25:1 se necesitaron 4.6125 kg de estiércol de cerdo; 5.7195 kg de estiércol de vaca y 3.1365 kg de residuos de banano orgánico. Para el tratamiento 3 con una relación C: N de 30:1 se necesitaron 3.95 kg de estiércol de cerdo; 3.927 kg de estiércol de vaca y 5.9500 kg de residuos de banano orgánico (Tabla 9). Estos valores fueron obtenidos a partir de la estimación de las cantidades de los sustratos que fueron proporcionados para determinar la relación C:N de 20:1, 25:1 y 30:1. Por lo tanto, se consideró la capacidad del biodigestor (18 L) para poder llegar a la cantidad de las mezclas deseadas para cada tratamiento.

Tabla 9

*Cantidad de sustratos para cada tratamiento de acuerdo a la relación C: N*

| TRATAMIENTOS  | RELACIÓN<br>C: N | MEZCLAS                       |                               |                              | TOTAL          |
|---------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------|
|               |                  | Descarte<br>de banano<br>(kg) | Estiércol<br>de cerdo<br>(kg) | Estiércol<br>de vaca<br>(kg) |                |
| Tratamiento 1 | 20:1             | 0.8160                        | 8.1600                        | 4.4880                       | 13.4640        |
| Tratamiento 2 | 25:1             | 3.1365                        | 4.6125                        | 5.7195                       | 13.4685        |
| Tratamiento 3 | 30:1             | 5.9500                        | 3.9500                        | 3.9270                       | 13.8270        |
| <b>TOTAL</b>  |                  | <b>9.9025</b>                 | <b>16.7225</b>                | <b>14.1345</b>               | <b>40.7595</b> |

*Fuente:* Elaboración propia.

**c) Determinación de los sólidos totales**

El peso seco (g) obtenido de cada uno de los tratamientos fueron 6.2, 6.6 y 5.5 representando el 24.60, 26.19 y 21.82 % de sólidos totales respectivamente (Tabla 9). De acuerdo a estos resultados solo se agregó 10 L de la solución de cal al 2 % para cada tratamiento en los biodigestores de 18 L de capacidad.

Tabla 10

*Determinación de los sólidos totales en los tres tratamientos*

| <b>Tratamientos</b> | <b>Peso húmedo (g)</b> | <b>Sólidos totales (%)</b> |
|---------------------|------------------------|----------------------------|
| Tratamiento 1       | 25.20                  | 24.60                      |
| Tratamiento 2       | 25.20                  | 26.19                      |
| Tratamiento 3       | 25.20                  | 21.82                      |

*Fuente:* Elaboración propia.

**- Biogás producido con residuos orgánicos de descarte de banano y excretas de vaca y cerdo**

La producción de biogás por digestión anaerobia de excretas de cerdo, vaca y residuos de banano orgánico tuvo una duración de 151 días (Tabla 11, Figura 13 y 14) a partir del primer día de iniciada la digestión anaerobia. El volumen de biogás fue de 216 L a los 132 días de iniciada la digestión anaerobia para el tratamiento 1. En el tratamiento 2, el volumen de biogás fue de 216 L a los 151 días de iniciada la digestión anaerobia mientras que en el tratamiento 3, no hubo producción de biogás hasta finalizada la investigación.

La capacidad total del gasómetro fue de 27 L el cual fue removido no bien alcanzaba su capacidad máxima y renovado por uno nuevo. Según la literatura (Silva, 2002) el biogás obtenido producto de la fermentación microbiana de residuos celulósicos y excretas está constituido por una mezcla de gases como metano, dióxido de carbono y otros gases en menor proporción como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y sulfuro de hidrógeno. Los resultados evidenciaron la presencia de metano al prender el biogás en una cocina convencional.

Tabla 11

*Producción de biogás del tratamiento 1, tratamiento 2 y tratamiento 3*

| TRATAMIENTO 1 |             | TRATAMIENTO 2 |             | TRATAMIENTO 3 |             |
|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| DÍA           | VOL. BIOGÁS | DÍA           | VOL. BIOGÁS | DÍA           | VOL. BIOGÁS |
| 43            | 14.40       | 39            | 27.00       | 40            | 0           |
| 50            | 27.00       | 44            | 34.50       | 44            | 0           |
| 56            | 37.80       | 50            | 43.50       | 48            | 0           |
| 61            | 46.80       | 55            | 51.00       | 52            | 0           |
| 65            | 54.00       | 57            | 54.00       | 56            | 0           |
| 70            | 62.40       | 60            | 60.80       | 60            | 0           |
| 77            | 74.30       | 64            | 69.80       | 64            | 0           |
| 81            | 81.00       | 67            | 76.50       | 68            | 0           |
| 89            | 96.40       | 69            | 81.00       | 72            | 0           |
| 95            | 108.00      | 73            | 90.00       | 76            | 0           |
| 99            | 121.50      | 76            | 96.80       | 80            | 0           |
| 103           | 135.00      | 79            | 103.50      | 84            | 0           |
| 106           | 143.10      | 81            | 108.00      | 88            | 0           |
| 110           | 153.90      | 85            | 115.70      | 92            | 0           |
| 113           | 162.00      | 89            | 123.40      | 96            | 0           |
| 118           | 177.00      | 93            | 131.10      | 100           | 0           |
| 122           | 189.00      | 95            | 135.00      | 104           | 0           |
| 128           | 205.20      | 98            | 145.10      | 108           | 0           |
| 132           | 216.00      | 101           | 155.30      | 112           | 0           |
| 136           | 216.00      | 103           | 162.00      | 116           | 0           |
| 140           | 216.00      | 107           | 168.40      | 120           | 0           |
| 145           | 216.00      | 113           | 177.90      | 124           | 0           |
| 149           | 216.00      | 117           | 184.20      | 128           | 0           |
|               |             | 120           | 189.00      | 132           | 0           |
|               |             | 125           | 193.40      | 136           | 0           |
|               |             | 130           | 197.70      | 140           | 0           |
|               |             | 135           | 202.10      | 144           | 0           |
|               |             | 140           | 206.40      | 148           | 0           |
|               |             | 145           | 210.80      | 152           | 0           |
|               |             | 149           | 214.30      | 156           | 0           |
|               |             | 151           | 216.00      | 160           | 0           |
|               |             | 154           | 216.00      | 164           | 0           |
|               |             | 160           | 216.00      | 168           | 0           |
|               |             | 165           | 216.00      | 172           | 0           |
|               |             | 170           | 216.00      | 176           | 0           |

*Fuente:* Elaboración propia.

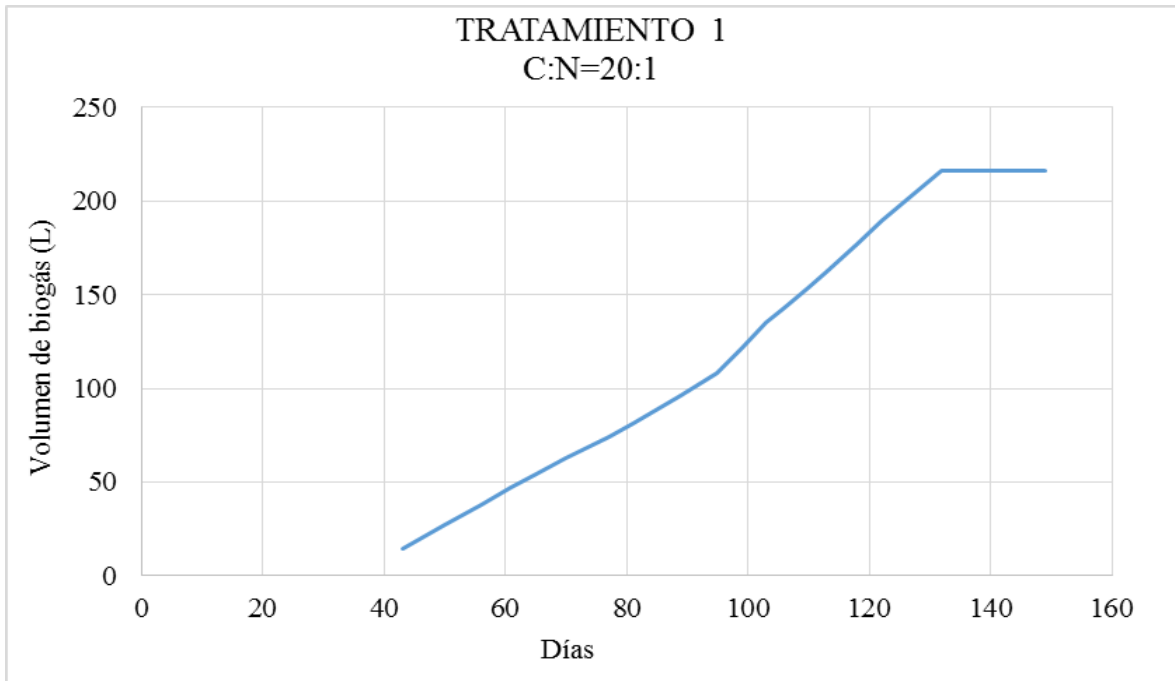


Figura 15. Producción de biogás del Tratamiento 1.

Fuente: Elaboración propia.

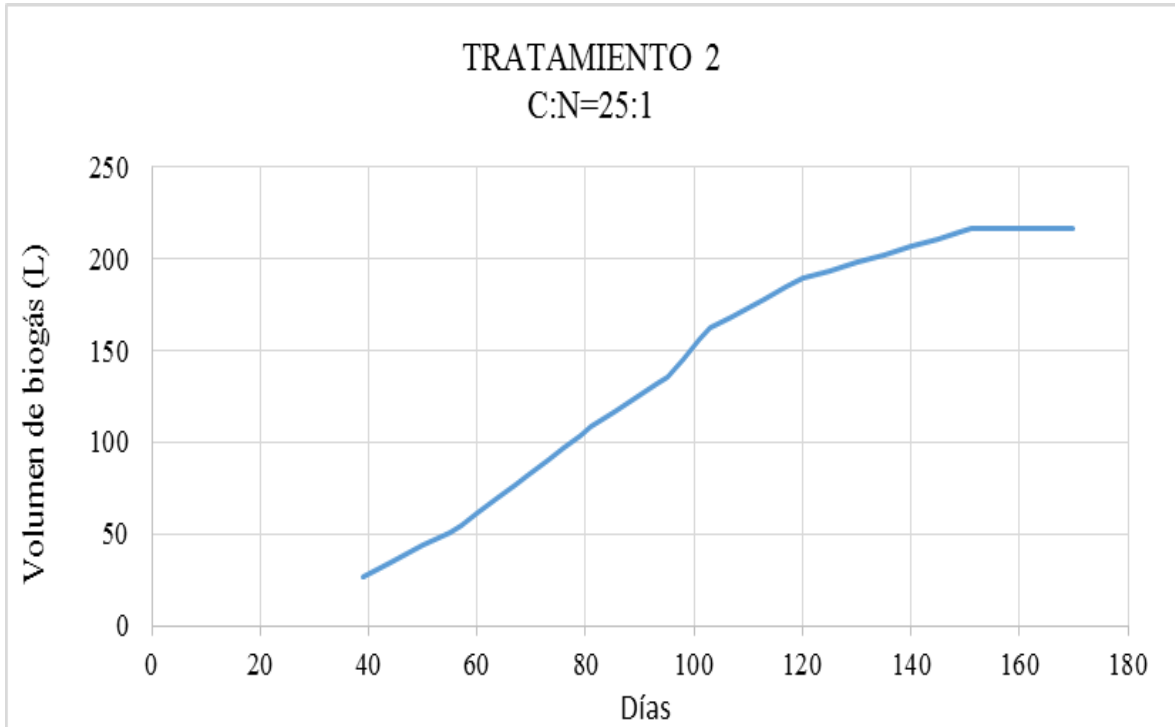


Figura 16. Producción de biogás del Tratamiento 2.

Fuente: Elaboración propia.



Según el anova con una  $\alpha = 0.05$  y un  $p\_valor = 0.0001$  (Apendice 9), evidencia que existe significancia estadística entre los tratamientos evaluados. Por ende, el proceso de digestión anaerobia del banano orgánico mezclado con estiércol de vacuno y cerdo a diferentes concentraciones será eficiente para la producción de biogás.

Sin embargo, al realizar la prueba de Duncan (Tabla 13) se observa que el tratamiento que presentó mayor cantidad de banano orgánico y menor concentración de estiércol de vacuno y cerdo (T3), la producción de biogás se inactivó debido a una mayor concentración de carbono presente en la mezcla de los sustratos; dando como resultado nula la producción de gas. Los tratamientos 1 y 2 lograron producir biogás cuando las concentraciones de estiércol de vaca y cerdo fueron mayores con respecto a la cantidad de banano orgánico suministrado dentro de la mezcla de los sustratos, a diferencia del tratamiento 3 que tienen concentraciones mucho menores de estos sustratos.

Tabla 12

*Test:Duncan Alfa=0.05*

Error: 2701.7720 gl: 90

| Tratam. | Medias | n  | E.E.  |   |
|---------|--------|----|-------|---|
| 2       | 139.66 | 35 | 8.79  | A |
| 1       | 129.08 | 23 | 10.84 | A |
| 3       | 0.00   | 35 | 8.79  | B |

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

*Fuente:* Elaboración Propia.

#### d) Medición de la temperatura ambiente en la producción de biogás

La temperatura ambiente fue medida durante el desarrollo de la investigación. Los resultados mostraron que fue ascendiendo al pasar los meses. Asimismo, la correlación entre la temperatura y la producción de biogás fue de  $R = 0.99839$  para los tratamientos 1 y 2. (figuras 15 y 16). El resultado de correlación fue positivo para ambos tratamientos.

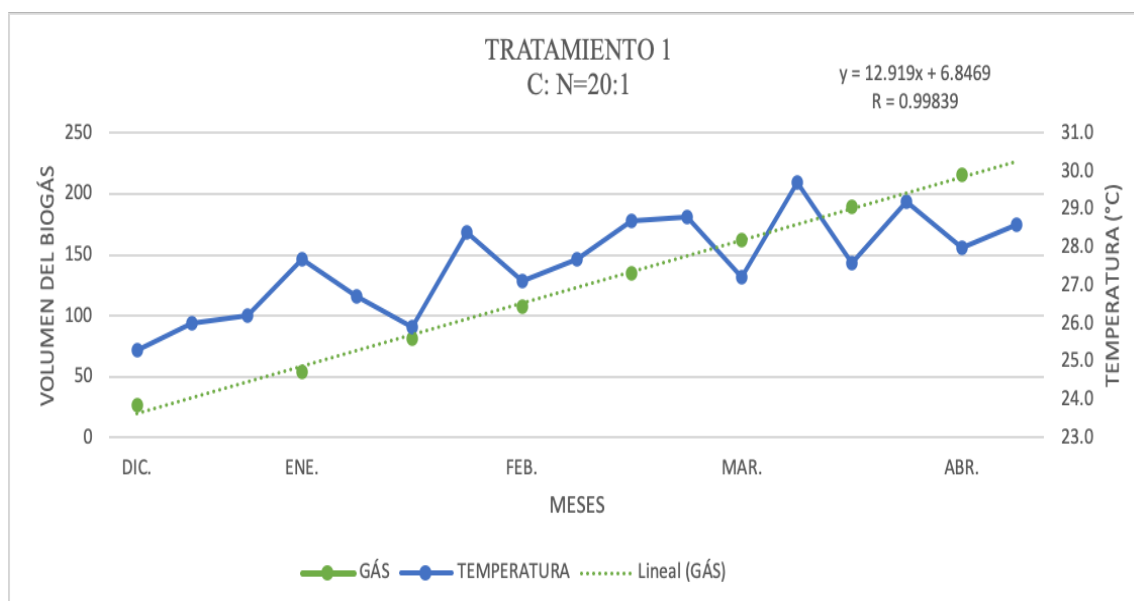


Figura 15. Producción de biogás del tratamiento 1, según la temperatura ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

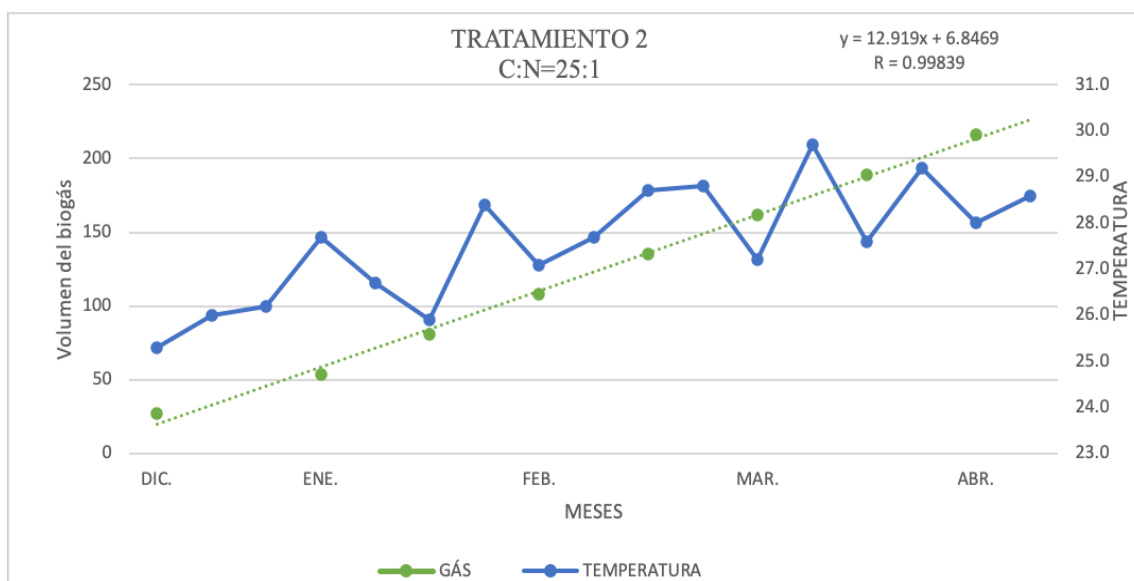


Figura 16. Producción de biogás del tratamiento 2 según la temperatura ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 17 y 18, se puede visualizar el funcionamiento de una cocina a gas de 4 hornillas con el biogás producido a partir de la fermentación de los sustratos orgánicos. El gasómetro, constituido por una pelota de polietileno, fue conectado a una manguera de cocina a gas y se encendió la hornilla la cual se mantuvo encendida mientras se presionaba el gasómetro.



*Figura 17.* Funcionamiento de una cocina a gas con el biogás producido.

*Fuente:* Elaboración propia.



*Figura 18.* Presión del gasómetro con el biogás producido.

*Fuente:* Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

La biomasa de banano orgánico que se ha utilizado ha sido beneficioso en la investigación, puesto que al mezclarlo con los otros sustratos como el estiércol de cerdo y vaca se logró una adecuada producción de biogás. El volumen total en el tratamiento 1 y 2 fue de 216 L respectivamente, coincidiendo con Guevara *et al.* (2015) y (2012) que lograron producir biogás con banano de rechazo a partir del proceso de hidrólisis endógena y exógena del banano usando como subproducto la vinaza con y sin inoculos de sustratos para la obtención de biogás.

El estiércol de vaca y cerdo, así como los residuos de banano orgánico, resultaron adecuados para la producción de biogás, coincidiendo con Rodríguez *et al.* (1997) y Carreño (2012), quienes manifestaron que los sustratos adecuados para la metanogénesis pueden ser residuos orgánicos, excretas de cerdo y compuestos lignocelulósicos como los usados en la presente investigación. Es por ello que, cada uno de los tratamientos contiene diferentes sustratos orgánicos en proporciones de C:N previamente establecidas a fin de que puedan ser utilizados por los microorganismos metanogénicos. Para ello, se tomó como fundamento la aseveración de Riquelme (2009), quien manifestó que el bioproceso se mejora con la mezcla de varios sustratos debido al efecto sinérgico resultante de la composición de cada sustrato. Asimismo, Mejía (1996) señaló que son importantes las características del sustrato que abastece al biodigestor anaerobio, debido a que los requerimientos nutricionales de los microorganismos anaerobios tienen un lento metabolismo además, es lenta la renovación de nuevas células y la fijación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo es escasa, no así el consumo de carbono que se transforma a metano y a dióxido de carbono.

La formulación de los tratamientos fue realizado tratando de alcanzar una relación C: N entre 20 – 30 % y un contenido de 25 - 30 % de sólidos totales; estos parámetros son

fijados al inicio del proceso fermentativo y determinan las condiciones de trabajo. La alimentación principal de las bacterias metanogénicas son el nitrógeno y el carbono. Asimismo, el carbono aparte de ser una sustancia elemental, es la fuente de energía y el nitrógeno se necesita para biogénesis celular. Sosa *et al.* (1998) indicaron un rango de 10:1 a 30:1 en la relación C: N; sin embargo, los mejores rendimientos se alcanzaron en el rango de 20:1 y 25:1. Cuando la relación de C: N es muy baja (10:1), el nitrógeno asimilable tiende a perderse, disminuyendo el material directamente aprovechado, no obstante; si la relación es muy alta (40:1), el crecimiento de las bacterias se ve inhibido, por la escasez nitrógeno. Los altos valores conllevan a un exceso de carbono, el cual origina aumento y acumulación de ácidos volátiles y el pH disminuye gradualmente inhibiendo el proceso. No obstante, valores menores indican un exceso de nitrógeno el cual, se acumula como amoniaco; en ambos casos la metanogénesis se afectará negativamente.

La determinación de los sólidos totales a partir de las mezclas de los sustratos orgánicos de banano de rechazo, estiércol de cerdo y vaca en los tratamientos fueron de 24.60 %, 26.19 % y 21.82 % para los tratamientos 1, 2 y 3 respectivamente. Estos resultados obtenidos guardan relación con lo sostenido por Soria *et al.* (2001), quienes señalan que el porcentaje óptimo de sólidos totales está entre 20 - 30 % y se consigue al diluir el material orgánico en agua. La calidad de la fermentación del estiércol depende de la cantidad de sólidos totales, porque estos sirven de alimento a los microorganismos que realizan la digestión. Así, cuando la concentración de sólidos es mayor así será mayor la cantidad de nutrientes en la muestra. Asimismo, la dilución con agua de cal al 2 % permitió evitar la acumulación de ácidos debido a que la metanogénesis debe oscilar con un pH de 6.5 y 7.5 de lo contrario el proceso se vería afectado (Cendales, 2011).

En la producción de biogás se trabajó con un biorreactor anaerobio tipo tanque batch (discontinuo), coincidiendo con Rojas (1992) y Acuña y León (1998). Con este tipo de biodigestores las materias primas se cargan una sola vez, después de la carga, hay un período de tiempo establecido para que ocurra la digestión. Pasado este período de tiempo, el digestor se vacía y se recarga manualmente para otro bioproceso, estos biorreactores son adecuados para bioprocesos de pequeña escala; sin embargo, también se pueden utilizar otros procesos como los sistemas semicontinuos y continuos. De igual manera, el gasómetro empleado tipo

pelota de polietileno fue adecuado para la acumulación del biogás coincidiendo con lo reportado por (Carreño, 2012).

La cantidad de biogás producido para los tratamientos T1 y T2 correspondientes a una relación de C: N de 20:1 y 25:1 fue de 216 litros en 132 y 151 días, respectivamente, valor superior a lo reportado por López *et al.* (2014), quienes obtuvieron 0.52 L de biogás en 217 días; no obstante, en su investigación utilizaron sólo residuos de frutas y verduras; asimismo, a lo observado por Castillo y Tito (2011), quienes obtuvieron en 7 meses y 6 días apenas 104 L de biogás usando estiércol de cuy, vegetales, rastrojo del alimento y agua. El tratamiento T3 con una relación C: N de 30:1 hasta el término de la investigación no produjo biogás, debido a que la descomposición de materiales con alto contenido de carbono, como en el presente estudio es más lento, la proliferación y crecimiento de bacterias es menor por la ausencia de nitrógeno y el período de producción de biogás es más prolongado (Varnero, 2011).

La temperatura es un factor determinante en la operación del biodigestor, debido a que los microorganismos son especialmente sensibles a este parámetro y debe mantenerse en un rango adecuado para el crecimiento microbiano y aumentar su velocidad en las reacciones bioquímicas a las que son sometidas (Soria *et al.*, 2001). Este factor fue importante en la producción de biogás el cual se mantuvo entre 25.2 y 29.8 °C. Cendales (2011) indica que prevalecen tres niveles de temperatura definidos para el proceso; psicrófilico (<25°C), mesófilico (entre 26 °C y 44 °C) y termófilico (>45°C). Debido al nivel para el desarrollo del proceso, influye directamente en la temperatura sobre el crecimiento de los microorganismos metanogénicos. La actividad microbiana es influenciada por los parámetros físicos, químicos y biológicos de la temperatura, asimismo el pH y la solubilidad de los gases son directamente afectadas por este factor. El presente trabajo se hizo en un rango mesófilico el cual resultó adecuado para una buena producción de biogás, coincidiendo con Salazar *et al.* (2012), Carreño (2012) y Bedolla y Chaparro (2016).

Los resultados estadísticos mostraron que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos 1 y 2 ( $p = 0.561$ ), debido a que obtuvieron la misma producción de

biogás (216 L) pero en diferentes tiempos. Del mismo modo, Sarabia *et al.* (2015) analizaron la composición de biogás mostrando que los valores de metano (CH<sub>4</sub>) y monóxido de carbono (CO) no fueron significativamente diferentes ( $p = 0.5660$  y  $0.2589$ ). Los valores de sulfuro de hidrógeno, mostraron que la concentración fue menor ( $p = 0.0379$ ). Asimismo, en la investigación que desarrollaron los autores, los resultados de producción de biogás fueron casi iguales en 2 tratamientos (42.14 L y 43.83 L). Además, los sustratos que utilizaron para la fermentación anaerobia contenían estiércol entre otros.

Finalmente se verificó el biogás producido a través de su encendido en una cocina convencional, coincidiendo con Isaba (2018), donde probó y adaptó una cocina industrial de Gas Licuado de Petróleo (GLP) para su funcionamiento con el biogás producido a partir de un biodigestor tubular semicontinuo. Asimismo, Barrena *et al.* (2017) evaluaron el rendimiento del biogás producido a partir de un biodigestor tubular en una cocina creada para el uso del biogás. Las características que presentó el biogás producido al encender la hornilla de la cocina son similares a Castillo y Tito (2011) donde la llama es azul clara constante mientras había biogás. Cabe resaltar que estos autores utilizaron un mechero Bunsen, similar al trabajo realizado por Cueva (2012).

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES**

1. El descarte de banano orgánico, estiércol de cerdo y vaca resultaron adecuados para la producción de biogás.
2. La mayor cantidad de biogás que se produjo en el estudio de investigación fue posible con las relaciones de C: N de 20:1 y 25:1 bajo las condiciones estudiadas.
3. El tiempo máximo de producción de biogás fue 151 días.
4. Con el biogás producido de la fermentación anaerobia fue posible el funcionamiento de una cocina convencional.



## **CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES**

1. Realizar más estudios usando otros tipos de residuos orgánicos propios de la región Piura, debido a que la agricultura, ganadería son actividades muy importantes y principales para el sustento de muchas familias andinas y costeñas de este departamento. Así, los residuos orgánicos puedan ser aprovechables y puedan generar ingresos económicos para los productores. Por lo tanto, contribuiremos a las buenas prácticas agrícolas y protección al ambiente.
2. Tener en cuenta las precipitaciones fluviales para evitar inundaciones y daños a los materiales que se utilizan en este tipo de investigaciones. Esta región es vulnerable al fenómeno del niño y niño costero. Por lo tanto, los biodigestores deben ser ubicados en zonas adecuadas para su correcto funcionamiento.
3. Colocar otra válvula de seguridad en la parte de la manguera con el gasometro para controlar el flujo de gas y revisar de forma diaria o interdiaria a los biodigestores a fin de verificar la fuga de gas.
4. La relación C:N es muy importante en el desarrollo de este tipo de investigaciones, se recomienda realizar en un laboratorio la relación C:N del estiércol de cerdo para obtener datos reales y sobre todo incluir cual es el tipo de alimentación que reciben.
5. Capacitar a la población de la importancia sobre el aprovechamiento de los residuos sólidos y los beneficios que ofrece la producción de biogás. También se deben realizar

6. pequeñas pasantías para que proyectos como este se difundan y puedan ejecutarse en bien de la comunidad.
7. Difundir que el biogás es un tipo de energía renovable y que es amigable con el ambiente donde vivimos. Asimismo, se debe practicar su uso en las comunidades campesinas.
8. Se recomienda utilizar el descarte de banano en pequeñas proporciones en las mezclas de sustratos orgánicos para la producción de biogás, debido a que a mayor proporción se inactiva el proceso metanogénico.

## REFERENCIAS

- Acuña, A. y León, P. (1998). *Evaluación de parámetros en la obtención de biogás en una planta piloto*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque, Perú.
- Álvarez, M. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, 359, 63-89. Recuperado de <http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlosalvarez.pdf>
- Altamirano, B. (2017). *Potencial de producción energética de biogás a partir de residuos pecuarios en la región La Libertad*. (Tesis de grado). Recuperado de <http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/10012/Altamirano%20Barrios%20Rigoberto%20Javier.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Aprueban Reglamento de manejo de los residuos sólidos del sector agrario. Decreto Supremo N° 016, 2012. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, miércoles 14 de noviembre de 2012. Pp. 35-44.
- Barrena, M., Julca, J., Hellenthal, M. y Ordinola, C. (2017). Rendimiento del biogás como iluminación y combustible para cocina generado en biorreactor tubular en Luya, Amazonas. INDES, 117-124. Recuperado de: <http://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDES/article/view/139/204>
- Bedoya, E. y Chaparro, E. (2016). Uso del estiércol de animales para la producción de biogás en Moquegua. *Revista Ciencia y Tecnología para el Desarrollo-UJCM*. 2(4), 39-44. Recuperado de <http://revistas.ujcm.edu.pe/index.php/rctd/article/view/52/49>
- Castillo, D. y Tito, C. (2011). Obtención de biogás a partir de excremento de cuy en condiciones ambientales en Tacna Perú. *Ciencia & Desarrollo*, 13, 84-91. Recuperado de <https://docplayer.es/26838058-Obtencion-de-biogas-a-partir-de-excremento-de-cuy-en-condiciones-ambientales-en-tacna-peru.html>
- Carreño, C. (2012). Microbiología en el tratamiento de desechos. Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

- Cendales, E. (2011). *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/4100/1/edwindariocendalesladino.2011.parte1.pdf>
- Corcio, B. R. (2006). *Producción de biogás mediante la digestión anaeróbica de los lodos flotantes de oxidación de aguas residuales de la ciudad de Chepén*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Trujillo. Recuperado de <http://cip-trujillo.org/ovcipcddl/uploads/biblioteca/abstract/T008621.pdf>
- Cueva, B. (2012). *Obtención de biogás de estiércol porcino y restos vegetales, por fermentación semicontinua*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Recuperado de [http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/1885/22\\_2012\\_cueva\\_ancalla\\_bl\\_faci\\_biologia\\_microbiologia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/1885/22_2012_cueva_ancalla_bl_faci_biologia_microbiologia.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Chávez, P. y Rodríguez, G. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. *Academia & Virtualidad*. 9(2), 90-107. <https://doi.org/10.18359/ravi.2004>
- Flores, A. y Lara, S. (2011). Ingeniería de procesos aplicada a la obtención de bioetanol usando el rechazo de banano de la zona de Urabá. *Revista Especializada en Ingeniería de Procesos en Alimentos y Biomateriales*, 6, 85-99. Recuperado de <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/1112/1276>
- Friedman, A. y Penner, R. (2009). Biocombustibles alternativa de negocios verdes. Agencia del Gobierno de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). Recuperado de <https://www.usaid.gov/sites/default/files/documents/1862/biocombustibles.pdf>
- Euformación Consultores S.L. (2015). *Gestión integral de residuos sólidos* 2da ed. Bogotá: Ediciones de la U.
- García, A. M. y Gómez, J. D. (2016). *Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia*. (Tesis de grado). Fundación Universidad de América. Recuperado de <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/667/1/6112733-2016-2-IQ.pdf>

- García, S. N. (2014). *Influencia de la pulpa y agua de despulpado del café (Coffea arabica) sobre la producción de biogás con estiércol de bovino*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Recuperado de [http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1006/FIA\\_150.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1006/FIA_150.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Garavito, R. O. (2018). *Relación entre la producción de biogás y biol a partir de restos de trucha y estiércol vacuno*. (Tesis de grado). Universidad Científica del Sur. Recuperado de [http://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/UCS/538/TL\\_Garavito-Ruas.pdf?sequence=5&isAllowed=y](http://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/UCS/538/TL_Garavito-Ruas.pdf?sequence=5&isAllowed=y)
- Guevara, A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Lima. Recuperado de <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=51547&indexSearch=ID>
- Guevara, C., Arenas, H., Mejía, A. y Peláez, C. (2012). Obtención de etanol y biogás a partir de banano de rechazo. *Scielo*. 23 (2), 19-30. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000200004>.
- Guevara, C., Acevedo, J. y Peláez, C. (2015). Biorrefinería a partir de banano de rechazo: un sistema integrado para la co-producción de etanol, proteína unicelular, biogás y compost. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 14 (1), 78 – 86. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n1/v14n1a10.pdf>
- Ganduglia, León J. Q., Gasparini R., Rodríguez M. E., Huarte G. J., Estrada J. y Filgueiras E. (2009). Manual de biocombustibles. Recuperado de [http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Manual\\_Biocombustibles\\_AR\\_PEL\\_IICA.pdf](http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Manual_Biocombustibles_AR_PEL_IICA.pdf)
- Haro, V., Borja, A. y Triviño, B. (2017). Análisis sobre el aprovechamiento de los residuos del plátano, como materia prima para la producción de materiales plásticos biodegradables. *Dominio de las ciencias*. 3(2), 506-525. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6325873.pdf>
- Hernández, R.; Fernández, C. y Baptista, M. P. (2010). Metodología de la investigación. 5ta ed., México: McGrawHill.
- Hilbert, J. (2011). Manual para la producción de biogás. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Recuperado de <https://inta.gob.ar/documentos/manual-para-la-produccion-de-biogas>

Hurtado, M. A. Z. (2019). *Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la biomasa de residuos orgánicos agropecuarios Chulucanas – Piura*. (Tesis de maestría) Universidad Nacional de Piura. Recuperado de <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/2025>.

Izaba, C. (2018). *Prueba de habilitación y adaptación de una cocina de gas licuado de petróleo (GLP), para su funcionamiento con biogás, producido por el biodigestor de tipo salchicha instalado en el costado sur del comedor de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI-RUPAP)*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua. Recuperado de: <http://ribuni.uni.edu.ni/2592/>

Ley de promoción de la producción orgánica o ecológica N° 29196. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 29 de Enero de 2008.

Ley general de residuos sólidos N° 27314. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 21 de julio de 2000. pp. 39-48.

Ley Orgánica del Ministerio de Agricultura N° 25902. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 29 de noviembre de 1992.

López, R., Quinto, P., Aguilar y Garibay, H. (2014). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos putrescibles en la ciudad de México. Instituto Politécnico Nacional, México

Magaña, J., Torres, E., Martínez, M., Sandoval, C. y Hernández, R. (2006). Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabras. *Acta Universitaria Dirección de investigación y posgrado*.16 (3), 27-37. Recuperado de <http://www.actauniversitaria.ugto.mx/index.php/acta/article/download/185/163>

Mejía M., G. (1996). Digestión anaeróbica. Folleto Técnico 1. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yuc., México.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2012). Guía de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, mediante compostaje y lombricultura, Bolivia.

Municipalidad Provincial de Morropón Chulucanas, (2014). Diagnóstico ambiental de la provincia de Morropón. Comisión Ambiental provincial. Recuperado de:

[https://www.munichulucanas.gob.pe/jdownloads/documentos\\_de\\_gestion/diagnostico\\_ambiental\\_de\\_la\\_provincia\\_de\\_morropon.pdf](https://www.munichulucanas.gob.pe/jdownloads/documentos_de_gestion/diagnostico_ambiental_de_la_provincia_de_morropon.pdf)

Municipalidad Provincial de Morropón Chulucanas, (2020). Ubicación del distrito de Morropón. Chulucanas. Recuperado de: <https://www.munichulucanas.gob.pe/index.php/la-provincia-nuevo/distritos/distrito-morropon.html>

Navarro, S. (2016). *Obtención de biogás a partir de producción de biodiesel y de residuos agrícolas*. (Tesis de grado). Universidad de Laguna. Recuperado de: [https://www.academia.edu/32838672/\\_obtención\\_de\\_biogás\\_a\\_partir\\_de\\_residuos\\_agrícolas\\_y\\_de\\_producción\\_de\\_biodiésel\\_email\\_work\\_card=interaction\\_paper](https://www.academia.edu/32838672/_obtención_de_biogás_a_partir_de_residuos_agrícolas_y_de_producción_de_biodiésel_email_work_card=interaction_paper)

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2011). Manual de Biogás. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

Oyuela, F. (2010). *Evaluación de la producción de biogás y biol a partir de la torta de *Jatropha curcas* L.* (Tesis de grado). Universidad Zamorano, Honduras.

Riquelme, J. (2009). Problemas de estimación y observación en procesos de biodigestión anaerobia. Congreso Ingelectra, Santiago, Chile.

Rodríguez, J., El Atrach, K., Rumbos E. y Delepiani, A. (1997). Resultados experimentales de la producción de biogás a través de la bora y el estiércol de ganado. *Agronomía Tropical*. 47 (4), 441-455.

Rojas, S. (1992). *Diseño y construcción de una planta de biogás para dotar de energía a un laboratorio*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú.

Rojas, Ll. (2013). Guía técnica manejo integrado de banano orgánico. Recuperado de <https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/009-c-banano.pdf>

Salazar, J., Almusquivar, C., Llave, J. y Rivasplata, C. (2012). Producción de biogás y biol a partir de excretas de ganado: experiencias en la ciudad de Tacna. Recuperado de <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/6.pdf>

Salazar, R. y Porras, A. (2013). Diseño de un biorreactor a partir de un autoclave en deshuso. *Tecnología en Marcha, Revista VI Encuentro de Investigación 2014*. 5-11. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835881.pdf>.

- Salinas, E. y Gasca, V., (2009). Los biocombustibles. El Cotidiano. Núm. 157, 75-82. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>
- Sánchez, H. y Reyes, C. (2005). Metodología y diseños en la investigación científica. 5ta ed. Lima – Perú: Business support aneth.
- Sarabia, M., Laines, J., Sosa, J. y Escalante, E. (2015). Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 33 (1), 109-116. Recuperado de <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.2017.33.01.10/46625>
- Sierra, C. y Rojas, C. (2005). La materia orgánica y su efecto como enmienda y mejorador de la productividad de los cultivos. Santiago, Chile.
- Silva, J. (2002). Tecnología del biogas. Repidisca. 1-19. Recuperado de <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=5160&indexSearch=ID>
- Soria, M., Ferrera R., Etchevers J., Alcantar G., Trinidad J., Borges L. y Pereyda G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. Terra, 19 (4), 1 - 35.
- Sosa, R., Chao, R. y Del Rio, J. (1998). Aspectos bioquímicos y tecnológicos del tratamiento de residuos agrícolas con producción de biogás. Habana: Instituto de Investigación Porcina. Recuperado de <http://www.iip.co.cu/RCPP/ant/RCPP6.2.pdf#page=6>
- Steiner, R. (2006). Utilización energética de residuos orgánicos en la industria bananera, cafetalera y azucarera en Costa Rica. *Utilización residuos orgánicos en Costa Rica*. pp.74.
- Tapia, T. (2016). Instalación y uso de biogás ganadería puneña, generando energía limpia "biogás" para calefacción y cocina familiar. Recuperado de <http://www.care.org.pe/wp-content/uploads/2016/11/Manual-de-Biodigestores-Final.pdf>



- Torres, S. (2012). Guía práctica para el manejo de banano orgánico en el valle del Chira. Recuperado de [https://www.swisscontact.org/fileadmin/user\\_upload/COUNTRIES\\_Perú/Documents/Publications/manual\\_banano.pdf](https://www.swisscontact.org/fileadmin/user_upload/COUNTRIES_Perú/Documents/Publications/manual_banano.pdf)
- Union Concerned Scientist, (2017). Benefits of renewable energy use. Recuperado de: <https://www.ucsusa.org/resources/benefits-renewable-energy-use>
- Valencia, E., Valenzuela, E., Gonzales, S. y Vargas, C. (2011). Digestión anaeróbica de rumen bovino en laboratorio y determinación química pre y post tratamiento. *Livestock*, 23 (2), 1 – 12.
- Varnero, M. (2011). Manual de biogás. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile, pp. 34
- Vega, A. (2015). *Diseño construcción y evaluación de un biodigestor semicontinuo para la generación de biogás con la fermentación anaeróbica del estiércol de cuy y de conejo para la Institución Educativa Privada Cristiana Bereshi*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Del Santa. Recuperado de <http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/2000/30744.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vesco, L. (2006). *Residuos sólidos urbanos: su gestión en Argentina*. (Tesis de grado). Universidad Abierta Interamericana. Recuperado de <http://imgbiblio.vaneduc.edu.ar/fulltext/files/TC071962.pdf>
- Weber, B., Rojas, O., Torres, B. y Pampillón, G. (2012). Producción de biogás en México estado actual y perspectivas. Recuperado de <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT5.pdf>
- Zambrano, M. (2016). *Rendimiento de biogás a partir de mezclas entre estiércol de vacuno y suero de quesería mediante digestión anaeróbica*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2711/P06-Z3-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## TERMINOLOGÍA

- **Agrícola.** Pertenciente o relativo a la agricultura (Ley de Promoción de la Producción Orgánica o Ecológica N° 29196, 2008).
- **Agricultura orgánica.** Sistema holístico de gestión de la producción agrícola que fomenta y mejora la salud del agroecosistema y en particular la biodiversidad, los ciclos biológicos y la actividad biológica del suelo (Ley Orgánica del Ministerio de Agricultura N° 25902, 1992).
- **Anaerobio.** Proceso en el cual los microorganismos crecen completamente en ausencia de oxígeno (Ministerio de Medio Ambiente y Agua [MMAyA], 2012).
- **Aprovechamiento de residuos sólidos.** Es el proceso en que a los residuos se le da otra valoración, mediante reutilización, reciclaje, tratamiento biológico o generación de energía (MMAyA, 2012).
- **Biodegradables.** Sustancia artificial o natural, que en condiciones naturales puede descomponerse rápidamente en sustancias más simples, contaminando en menor grado el ambiente (Ley Orgánica del Ministerio de Agricultura N° 25902, 1992).
- **Biogás.** Es una mezcla de gases como el metano y el CO<sub>2</sub> y otros gases en menor proporción, producto de la fermentación o digestión anaerobia de la materia orgánica (MMAyA, 2012).
- **La relación C/N.** El carbono es una fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno es un elemento necesario para la síntesis proteica. Una relación adecuada entre estos dos nutrientes favorecerá un buen crecimiento y reproducción de los microorganismos (MMAyA, 2012).
- **Orgánico.** Cualidad determinada por el cumplimiento de las normas de producción orgánica a lo largo de las fases de producción, transformación, manipulación, transporte

y comercialización; que han sido certificados por un organismo de certificación debidamente autorizado (Ley Orgánica del Ministerio de Agricultura N° 25902, 1992).

- **Producción.** Operaciones que se llevan a cabo para suministrar productos agrícolas en el estado que se dan en la unidad productiva, incluido el envasado inicial y etiquetado del producto (Ley orgánica del ministerio de agricultura N° 25902, 1992).
  
- **Sistema agrario convencional.** Sistema de producción que utiliza técnicas e insumos perjudiciales al medio ambiente, por ejemplo monocultivo y agroquímicos (Ley Orgánica del Ministerio de Agricultura N° 25902, 1992).
  
- **Sostenible.** Que aplica principios de conservación del medio ambiente de respeto cultural, equidad y justicia social, y genera beneficios económicos en forma sostenida (Ley Orgánica del Ministerio de Agricultura N° 25902, 1992).

## APÉNDICES

Apéndice 1. Registro interdiario de la temperatura ambiente del mes de diciembre de 2017

|     |            | DICIEMBRE |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| DÍA | HORA       | 12        | 14   | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   | 28   | 30   |
|     | 08:00 a.m. | 20.7      | 19.7 | 18.5 | 23.3 | 19.9 | 21.0 | 21.8 | 20.8 | 20.7 |
|     | 12:00 p.m. | 25.3      | 26.3 | 25.9 | 27.7 | 26.0 | 26.9 | 27.6 | 27.3 | 26.2 |
|     | 04:00 p.m. | 26.6      | 29.1 | 28.3 | 28.4 | 26.6 | 27.5 | 29.1 | 27.3 | 28.0 |

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 2. Registro interdiario de la temperatura ambiente del mes de enero de 2018

|     |            | ENERO |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| DÍA | HORA       | 1     | 3    | 7    | 9    | 11   | 13   | 15   | 17   | 19   | 21   | 23   | 25   | 27   | 29   | 31   |
|     | 08:00 a.m. | 21.5  | 20.3 | 20.8 | 19.9 | 21.4 | 21.8 | 21.8 | 21.7 | 21.5 | 21.6 | 22.5 | 20.2 | 21.7 | 23.5 | 22.6 |
|     | 12:00 p.m. | 27.7  | 27.7 | 26.0 | 24.4 | 26.7 | 27.6 | 27.7 | 26.1 | 25.9 | 27.1 | 28.7 | 27.9 | 28.4 | 29.6 | 29.7 |
|     | 04:00 p.m. | 29.1  | 28.0 | 26.5 | 29.2 | 27.5 | 28.8 | 29.7 | 25.0 | 27.9 | 28.0 | 28.3 | 29.8 | 29.0 | 28.8 | 29.3 |

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 3. Registro interdiario de la temperatura ambiente del mes de febrero de 2018

|     |            | FEBRERO |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| DÍA | HORA       | 2       | 4    | 6    | 8    | 10   | 12   | 14   | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   | 26   | 28   |
|     | 08:00 a.m. | 21.7    | 23.0 | 21.6 | 22.2 | 21.9 | 23.4 | 21.3 | 21.8 | 23.2 | 23.1 | 23.2 | 21.8 | 22.6 | 22.7 |
|     | 12:00 p.m. | 30.5    | 27.1 | 23.3 | 27.6 | 27.3 | 27.7 | 28.5 | 27.9 | 27.4 | 28.7 | 29.7 | 28.7 | 28.4 | 28.8 |
|     | 04:00 p.m. | 27.9    | 25.5 | 25.4 | 27.1 | 27.5 | 29.0 | 28.5 | 26.8 | 26.2 | 28.5 | 31.4 | 30.0 | 27.9 | 28.2 |

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 4. Registro interdiario de la temperatura ambiente del mes de marzo de 2018

| MARZO      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| DÍA        | 2    | 4    | 6    | 8    | 12   | 14   | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   | 26   | 28   | 30   |
| HORA       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 08:00 a.m. | 21.0 | 22.2 | 23.0 | 22.9 | 20.6 | 22.0 | 23.9 | 22.4 | 22.3 | 21.4 | 23.7 | 20.4 | 21.9 | 22.1 |
| 12:00 p.m. | 28.0 | 28.2 | 27.5 | 27.2 | 27.3 | 30.5 | 28.5 | 29.7 | 29.7 | 28.2 | 27.6 | 28.8 | 27.4 | 29.2 |
| 04:00 p.m. | 28.6 | 27.8 | 27.4 | 28.5 | 30.1 | 29.6 | 28.5 | 29.2 | 28.8 | 27.5 | 27.0 | 27.7 | 27.4 | 28.8 |

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 5. Registro interdiario de la temperatura ambiente del mes de abril de 2018

| ABRIL      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| DÍA        | 1    | 3    | 5    | 9    | 11   | 13   |
| HORA       |      |      |      |      |      |      |
| 08:00 a.m. | 22.9 | 22.7 | 20.9 | 21.6 | 21.2 | 20.2 |
| 12:00 p.m. | 28.4 | 28.0 | 24.8 | 26.4 | 28.6 | 28.6 |
| 04:00 p.m. | 29.2 | 27.2 | 22.5 | 25.8 | 29.1 | 28.9 |

Fuente: Elaboración propia

Apéndice 6. Temperatura ambiente en meses en la producción de biogás

| MESES             | DIC.  |       |       |       | ENE.  |       |       |       | FEB.  |       |       |       | MAR.  |       |       |       | ABR.  |  |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| <b>12:00 P.M.</b> | 25.30 | 26.00 | 26.20 | 27.70 | 26.70 | 25.90 | 28.40 | 27.10 | 27.70 | 28.70 | 28.80 | 27.20 | 29.70 | 27.60 | 29.20 | 28.00 | 28.60 |  |

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 7. Producción de biogás de acuerdo a la temperatura ambiente en meses del tratamiento 1

| <b>TRATAMIENTO 1 (C:N = 20:1)</b> |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MESES                             | DIC. |      |      | ENE. |      |      |      | FEB. |      |      |      | MAR. |      |      |      | ABR. |      |
| TEMPERATURA                       | 25.3 | 26.0 | 26.2 | 27.7 | 26.7 | 25.9 | 28.4 | 27.1 | 27.7 | 28.7 | 28.8 | 27.2 | 29.7 | 27.6 | 29.2 | 28.0 | 28.6 |
| GÁS                               | 27   |      |      | 54   |      | 81   |      | 108  |      | 135  |      | 162  |      | 189  |      | 216  |      |

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 8. Producción de biogás de acuerdo a la temperatura ambiente en meses del tratamiento 2

| <b>TRATAMIENTO 2 (C:N = 25.1)</b> |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| MESES                             | DIC. |      |      |      | ENE. |      |      |      | FEB. |      |      |      | MAR. |      |      |      | ABR. |  |
| TEMPERATURA                       | 25.3 | 26.0 | 26.2 | 27.7 | 26.7 | 25.9 | 28.4 | 27.1 | 27.7 | 28.7 | 28.8 | 27.2 | 29.7 | 27.6 | 29.2 | 28.0 | 28.6 |  |
| GAS                               | 27   |      |      |      | 54   |      | 81   |      | 108  |      | 135  |      | 162  |      | 189  |      | 216  |  |

Fuente: Elaboración propia.

### Apéndice 9. Análisis de Varianza (Tipo III)

| <u>F.V.</u> | <u>SC</u> | <u>gl</u> | <u>CM</u> | <u>F</u> | <u>p-valor</u> |
|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo      | 402117.74 | 2         | 201058.87 | 74.42    | <0.0001        |
| Tratam.     | 402117.74 | 2         | 201058.87 | 74.42    | <0.0001        |
| Error       | 243159.48 | 90        | 2701.77   |          |                |
| Total       | 645277.23 | 92        |           |          |                |

*Fuente:* Elaboración Propia.