



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ  
MANUEL FÉLIX LÓPEZ**

**DIRECCIÓN DE CARRERA: MEDIO AMBIENTE**

**INFORME DE TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIA LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MEDIO  
AMBIENTE**

**MODALIDAD:  
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**TÉMA:  
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE BIODIGESTOR A  
ESCALA PILOTO CON RESIDUOS SEMI-SÓLIDOS (EXCRETAS  
Y RUMEN) DEL CAMAL DE CALCETA, BOLIVAR**

**AUTORES:  
MEJÍA ROSADO GEMA CAROLINA  
PERALTA ZAMBRANO JOSÉ RAFAEL**

**TUTOR:  
ING. SERGIO SANTIAGO ALCÍVAR PINARGOTE, M.Sc.**

**CALCETA, ABRIL 2019**

## DERECHOS DE AUTORÍA

MEJÍA ROSADO GEMA CAROLINA y PERALTA ZAMBRANO JOSÉ RAFAEL, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento

-----

MEJÍA ROSADO GEMA CAROLINA

-----

PERALTA ZAMBRANO JOSÉ RAFAEL

## CERTIFICACIÓN DE TUTOR

**ING. SERGIO SANTIAGO ALCÍVAR PINARGOTE, M.Sc.**, certifica haber tutelado el proyecto de **Producción de biogás mediante biodigestor a escala piloto con residuos semi-sólidos (excretas y rumen) del camal de Calceta, Bolívar**, que ha sido desarrollada por MEJÍA ROSADO GEMA CAROLINA y PERALTA ZAMBRANO JOSÉ RAFAEL, previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN DE LA UNIDAD DE TITULACIÓN ESPECIAL** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

-----  
**ING. SERGIO SANTIAGO ALCÍVAR PINARGOTE, M.Sc.**

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL**

Los suscritos integrantes del tribunal correspondiente, declaramos que hemos **APROBADO** el trabajo de titulación de **Producción de biogás mediante biodigestor a escala piloto con residuos semi-sólidos (excretas y rumen) del camal de Calceta, Bolívar**, que ha sido propuesto, desarrollado por MEJÍA ROSADO GEMA CAROLINA y PERALTA ZAMBRANO JOSÉ RAFAEL, previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

Ing. Hugo Cobeña Navarrete, M.Sc.

**MIEMBRO**

Ing. Fabricio Alcívar Intriago, Mgs

**MIEMBRO**

Ing. Silvia Montero Cedeño, M.Sc.

**PRESIDENTE**

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López que me dio la oportunidad de crecer como ser humano a través de una educación superior de calidad y en la cual he forjado mis conocimientos profesionales día a día.

También mis más bonito y sincero agradecimiento a Leonardo Betancourt por ser la persona que a pesar de los malos y buenos momentos siempre estuvo pendiente y apoyándome en toda la etapa de mis estudios. A mis padres, mi hermano que siempre han estado cuando los he necesitado. Él logro también es de ellos.

Por último, gracias a todas las personas que han apoyado en este largo camino soportando y comprendiendo con mucha paciencia la dedicación que requiere la realización de mi tesis.

**GEMA C. MEJÍA ROSADO**

## **AGRADECIMIENTO**

Como Católico expreso gratitud hacia el Dios supremo, con el todo es posible, todo sucede en su determinado tiempo.

Eternas gracias a mis Padres Rafael Peralta y Mónica Zambrano por su completo apoyo en todas las instancias de mi vida, por el tiempo, dedicación y paciencia a este objetivo que estamos por cumplir.

Mis agradecimientos a mi querida familia, mis hermanos Javier y Sol por su compañía en todo momento, a mi abuelita por sus oraciones y apoyo hacia mí, a los mejores tíos del mundo Tevin y Loly por tenerme como un hijo más.

No puedo dejar sin mencionar a la persona más linda que me ha acompañado en estos últimos años de estudio y que sin duda forma parte de mi crecimiento como persona mi querida Belén Álava, como no agradecer a mi amigo Paul por todo el apoyo sincero en cada actividad desarrollada.

Y agradecer a la Universidad por el aporte que nos da a cada uno de los que decidimos formarnos en esta prestigiosa institución, a sus grandes autoridades, docentes y amigos que no dejan, a mi compañera de Tesis Carolina muchas gracias por el apoyo y la paciencia.

**JOSÉ R. PERALTA ZAMBRANO**

## **DEDICATORIA**

En primer lugar a Dios por haberme dado la vida y darme las fuerzas necesarias y haberme permitido llegar a este momento tan importante en mi formación profesional. Mi tesis se la dedico a mis padres, por ser el pilar fundamental más importante en mi vida a Leonardo Betancourt por demostrarme siempre ese apoyo incondicional y ser la persona que me ha acompañado durante este duro camino para convertirme en una gran profesional.

A mi familia en general porque me han brindado su apoyo y compartir conmigo buenos y malos momentos en mi vida.

A mis profesores gracias por su tiempo, su apoyo así como por la sabiduría que me brindaron y transmitieron en el desarrollo de mi vida profesional.

**GEMA C. MEJÍA ROSADO**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación va dedicado con todo mi sincero amor y respeto hacia mi Madre y Padre que siempre esperaron por la llegada de este logro y esto también es de ustedes Mónica, Rafael y familia completa, lo mejor para mí y para todos está por venir.

**JOSÉ R. PERALTA ZAMBRANO**



## CONTENIDO GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA.....	ii
CERTIFICACIÓN DE TUTOR.....	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
DEDICATORIA .....	vii
DEDICATORIA .....	viii
CONTENIDO GENERAL.....	ix
RESUMEN.....	xv
PALABRAS CLAVE .....	xv
ABSTRACT.....	xvi
KEYWORDS.....	xvi
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES .....	1
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.4. HIPÓTESIS.....	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. RESIDUOS .....	5
2.2. RESIDUOS SEMI-SÓLIDOS.....	5
2.3. RESIDUOS SÓLIDOS DE FAENAMIENTO .....	5
2.4. COMPOSICIÓN DE RESIDUOS SEMI-SÓLIDOS .....	6
2.5. APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SEMI-SÓLIDOS .....	7
2.6. UTILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS.....	7
2.7. EXCREMENTO.....	8
2.8. UTILIZACIÓN DEL EXCREMENTO .....	8
2.9. CONTENIDO RUMINAL.....	8

2.10. UTILIZACIÓN DEL CONTENIDO RUMINAL.....	9
2.11. BIODIGESTOR .....	10
2.12. BIODIGESTOR TIPO TUBULAR .....	11
2.12.1. VENTAJAS DEL BIODIGESTOR TUBULAR .....	12
2.13. DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	12
2.14. ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	13
2.14.1. HIDRÓLISIS .....	14
2.14.2. ACIDOGÉNESIS .....	15
2.14.3. ACETOGÉNESIS .....	15
2.14.4. METANOGÉNESIS .....	16
2.15. PARAMETROS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE BIOGÁS.....	17
2.15.1. TEMPERATURA .....	17
2.15.2. DQO .....	18
2.15.3. PRODUCCIÓN DE METANO.....	18
2.15.4. SÓLIDOS VOLÁTILES .....	18
2.15.5. pH.....	19
2.16. RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO DE LAS MATERIAS PRIMAS .	20
2.17. IMPORTANCIA DE LA RELACIÓN CARBONO- NITRÓGENO.....	23
2.18. RELACIÓN DEL PORCENTAJE SOLIDO- AGUA .....	24
2.19. TIEMPO DE RETENCIÓN .....	26
2.20. ASERRÍN .....	27
2.21. BIOGÁS .....	27
2.21.1. CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS.....	28
2.21.2. COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS .....	29
2.21.3. USO DEL BIOGÁS .....	29
2.22. EFICIENCIA ECONÓMICA DE BIODIGESTORES .....	30
CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO .....	31
3.1. UBICACIÓN.....	31
3.2. DURACIÓN DEL TRABAJO.....	31
3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	31
3.3.1. MÉTODOS .....	31
3.3.2. TÉCNICAS .....	32
3.4. FACTOR DE ESTUDIO.....	32

3.5. TRATAMIENTOS.....	33
3.6. UNIDAD EXPERIMENTAL.....	33
3.7. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	34
3.8. VARIABLES DE ESTUDIO .....	34
3.8.1. VARIABLES INDEPENDIENTE .....	34
3.8.2. VARIABLES DEPENDIENTE .....	34
3.9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	35
3.10. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.....	35
3.11. PROCEDIMIENTOS .....	35
3.11.1. FASE I. DIAGNÓSTICO DE LA CANTIDAD DE RESIDUOS SEMI-SÓLIDOS PROVENIENTES DEL PROCESO DE FAENAMIENTO EN EL CAMAL DE CALCETA, BOLÍVAR .....	35
3.11.2. FASE II. EFICIENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE BIODIGESTOR CON LOS RESIDUOS SEMISÓLIDOS DEL CAMAL DE CALCETA, BOLÍVAR .....	36
3.11.3. FASE III. ESTABLECIMIENTO DEL COSTO DE LA ALTERNATIVA A UTILIZARSE EN EL APROVECHAMIENTO DE ESTOS RESIDUOS EN EL PROCESO FAENAMIENTO .....	38
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
4.1. FASE I. DIAGNÓSTICO DE LA CANTIDAD DE RESIDUOS SEMI-SÓLIDOS PROVENIENTES DEL PROCESO DE FAENAMIENTO EN EL CAMAL MUNICIPAL DE CALCETA, BOLÍVAR.....	39
4.1.1. Actividad 1. Cuantificación de rumen y excretas bovinas y porcinas generadas .....	39
4.2. FASE II. EFICIENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE BIODIGESTOR CON LOS RESIDUOS SEMISÓLIDOS DEL CAMAL DE CALCETA, BOLÍVAR.....	41
4.2.1. Actividad 3. Preparación de las variables y parámetros de respuesta.....	41
4.2.2. Actividad 4. Monitoreo de variables y parámetros de respuesta ...	45
4.2.3. Actividad 5. Determinar la diferencia entre tratamientos para la producción de biogás.....	51
4.3. FASE III. ESTABLECIMIENTO DEL COSTO DE LA ALTERNATIVA A UTILIZARSE EN EL APROVECHAMIENTO DE ESTOS RESIDUOS EN EL PROCESO FAENAMIENTO .....	52
4.3.1. Actividad 6. Determinación del costo de la alternativa a escala real	

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
5.1. CONCLUSIONES .....	54
5.2. RECOMENDACIONES.....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXOS.....	62

## CONTENIDO DE CUADROS, GRÁFICOS, IMÁGENES Y FIGURAS

### CUADROS

<b>Cuadro 2.1.</b> Utilización del contenido ruminal.....	10
<b>Cuadro 2.2.</b> Componentes del biodigestor. ....	11
<b>Cuadro 2.3.</b> Rango de la relación carbono nitrógeno.....	22
<b>Cuadro 2.4.</b> Proporción Carbono/Nitrógeno .....	23
<b>Cuadro 2.5.</b> Relación de porcentaje sólido-agua .....	24
<b>Cuadro 2.6.</b> Porcentaje solido-agua .....	25
<b>Cuadro 2.7.</b> Tiempo de retención de los sustratos. ....	27
<b>Cuadro 2.8.</b> Composición química del biogás.....	29
<b>Cuadro 3.1.</b> Dosis del mezclado.....	33
<b>Cuadro 3.2.</b> Descripción de los tratamientos .....	33
<b>Cuadro 3.3</b> Número de tratamiento con sus porcentajes de mezclado .....	33
<b>Cuadro 3.4.</b> Esquema del análisis de varianza.....	34
<b>Cuadro 4.1.</b> Relación Carbono: Nitrógeno de las diferentes materias prima de los biodigestores. ....	43
<b>Cuadro 4.2.</b> ANOVA de los tratamientos. ....	52
<b>Cuadro 4.3.</b> Resumen de la estimación de costos para un biodigestor. ....	53
<b>Cuadro 4.4.</b> Costo de inversión de un biodigestor para la producción de 0,2 m <sup>3</sup> de biogás acumulado. ....	53

### GRÁFICOS

<b>Gráfico 4.1.</b> Animales sacrificados en el camal municipal de Calceta, según los días de la semana.....	40
<b>Gráfico 4.2.</b> Cantidad de residuos semisólidos generados en el Camal municipal, semanalmente.....	40
<b>Gráfico 4.3.</b> pH inicial en función de las unidades experimentales del estudio. ....	42
<b>Gráfico 4.4.</b> Niveles de DQO inicial de las unidades experimentales. ....	44
<b>Gráfico 4.5.</b> Nivel de SV inicial de las unidades experimentales. ....	45

<b>Gráfico 4.6.</b> Relación entre la producción de biogás acumulada y el tiempo de experimentación.....	46
<b>Gráfico 4.7.</b> Concentración de metano y tiempo.....	47
<b>Gráfico 4.8.</b> pH a los 30 días de experimentación .....	48
<b>Gráfico 4.9.</b> Nivel de SV inicial (día 1) y final (día 30).....	50
<b>Gráfico 4.10.</b> Nivel de la DQO inicial (día 1) y final (día 30).....	51

## **IMAGEN**

<b>Imagen 2.1.</b> Digestión anaerobia- descomposición de sus componentes.....	14
<b>Imagen 2.2.</b> Rango de temperatura para diferentes tipos de microorganismos .....	17
<b>Imagen 3.1.</b> Ubicación satelital del sitio de estudio.....	31

## **FIGURA**

**No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.**

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo aprovechar los residuos semi-sólidos (excretas y rumen) mediante biodigestor a escala piloto para la producción de biogás en el camal municipal de Calceta. Se realizó tres tratamientos con tres repeticiones dando como resultado un total equivalente a 9 unidades experimentales. La primera fase del estudio comprendió un diagnóstico de la cantidad de residuos semi-sólidos provenientes del camal municipal de Calceta; que comprendió visitas técnicas, cuantificación de residuos semisólidos. En la fase dos, se determinó la eficiencia de la producción de biogás; para esto, se realizó la mezcla de los residuos semisólidos en diferentes proporciones (20, 30 y 40% de rumen y estiércol bovino y porcino). Finalmente, se estimó el costo de la alternativa a través del mejor tratamiento. Se obtuvo como resultado una producción de estiércol bovino de 540 kg/sem y estiércol porcino de 206 kg/sem. La cantidad de rumen generada en una semana es de 720 kg/sem. El pH inicial presentó una tendencia ácida (5,36-6,68) y a los 30 días alcanzó rangos óptimos (6,6-7,9). Los SV alcanzaron una eficiencia de remoción de 39,95% (20% rumen), 67,57% (30% rumen) y 77,80% (40% rumen). Las concentraciones al 30 y 40% experimentaron una remoción de 29,66% y 25,91%, respectivamente para la DQO. Se encontró diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) entre los niveles de producción de biogás, concentración de metano, DQO, y SV para los tres tratamientos (20, 30 y 40% de rumen). El biodigestor al 40% de rumen presenta una mayor eficiencia; lo que permite comprobar la hipótesis planteada.

## PALABRAS CLAVE

Rumen, estiércol bovino, estiércol porcino, biogás.

## **ABSTRACT**

The objective of the present investigation was to take advantage of semi-solid residues (excreta and rumen) by biodigester at a pilot scale for the production of biogas in the municipal outlet of Calceta. Three treatments were performed with three repetitions resulting in a total equivalent to nine experimental units. The first phase of the study included a diagnosis of the amount of semi-solid waste from the Calceta municipal camal; which included technical visits, quantification of semi-solid waste. In phase two, the efficiency of biogas production was determined; for this, the mixture of semisolid wastes in different proportions was made (20, 30 and 40% of rumen and bovine and porcine manure). Finally, the cost of the alternative was estimated through the best treatment. The result was a production of bovine manure of 540 kg / wk and swine manure of 206 kg / wk. The amount of rumen generated in a week is 720 kg / week. The initial pH showed an acidic tendency (5.36-6.68) and at 30 days it reached optimal ranges (6.6-7.9). The SVs achieved a removal efficiency of 39.95% (20% rumen), 67.57% (30% rumen) and 77.80% (40% rumen). Concentrations at 30 and 40% experienced a removal of 29.66% and 25.91%, respectively, for COD. A significant difference ( $p < 0.05$ ) was found between the levels of biogas production, methane concentration, COD, and SV for the three treatments (20, 30 and 40% rumen). The biodigester at 40% of rumen presents a higher efficiency; that allows to verify the hypothesis raised.

## **KEYWORDS**

Rumen, bovine manure, pig manure, biogas.



# **CAPÍTULO I. ANTECEDENTES**

## **1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

La generación residuos orgánicos, como las excretas bovinas y porcinas, es uno de los principales causantes de contaminación ambiental en muchos países de la región, ya que se producen en grandes volúmenes y se acumulan en espacios inadecuados (Brito y Sandoval, 2003). Estos residuos se constituyen en un grave problema para la población mundial, que está sometida a factores de presión como es la sobrepoblación, sumado a eso, el aumento de las actividades antrópicas en la actualidad y el consumismo han contribuido en acumular dicha cantidad de residuos, obligando a que su disposición en tiraderos o vertederos acarree problemas sanitarios como enfermedades y daños al ambiente (Levayen, 2017).

En el Ecuador los residuos y desechos provenientes de los camales no son aprovechados eficientemente a través de tecnología limpias , por lo que varios de estos residuos se convierten en una fuente de contaminación para el medio ambiente, siendo éstas clasificadas dentro de las empresas que presentan altos índices de contaminación, derivado especialmente, por la mala utilización de residuos sólidos y líquidos que en estos lugares se generan, los cuales con un manejo adecuado podrían ser aprovechados a través de biodigestores (Ocaña, 2013).

Por su parte Niño (2015) manifiesta una situación similar, al expresar que en los camales del Ecuador, no se implementa ningún sistema de gestión ambiental, debido a esto, es que la diligencia ambiental está interviniendo, intentando solucionar y evitando problemas ambientales y de salud pública a futuro, para lograr un desarrollo sostenible en su entorno biofísico. Ejemplo de esto, es la provincia de Manabí, que tiene un deficiente presupuesto para los camales, la mayoría de propiedad y administración municipal, y que no logran acceder con facilidad a sistemas de manejo adecuados para tratar los residuos

generados en los procesos de producción por falta de planificación (Cum, 2016).

En el camal municipal de la ciudad de Calceta se observa en el faenamiento del ganado bovino y porcino, una realidad semejante a la descrita por autores anteriores, en donde los residuos semi-sólidos como las excretas y el residuo formado por el componente ruminal del ganado no es aprovechado, ni tiene una disposición final adecuada; ya que terminan en una fosa séptica común, provocando impactos negativos como la propagación de los malos olores, proliferación de enfermedades, así lo afirma Molina (2015). Lo cual se genera limitaciones en el desarrollo de los entornos que se encuentra en las áreas cercanas, que en la actualidad no se realiza ninguna gestión de los residuos semi-sólidos.

Por lo expuesto anteriormente se procede a formular la siguiente interrogante.

¿Los residuos semi-sólidos (excretas y rumen) del camal municipal de Calceta, Bolívar podrán ser aprovechados eficientemente en la producción de biogás como una alternativa de uso dentro de los procesos de faenamiento?

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Kaiser *et al.* (2002) citado por Laínez y Sosa (2013) sostienen que, desde el surgimiento del primer biodigestor, se han inventado y probado modelos de plantas de biogás con el objetivo de aumentar la eficiencia y reducir los costos de implementación. El tipo de material de construcción de los biodigestores es un factor importante para establecer un modelo adecuado según el sustrato a emplear.

Una de las tecnologías más estudiadas y por lo tanto la más empleada en el manejo de los residuos ha sido el empleo de biodigestores, que son estructuras de diverso material cuyo propósito consiste aprovechar residuos, hasta un grado en el que se obtienen subproductos que pueden ser aprovechados en diferentes procesos como generación del biogás (Mejía-Sánchez, 1995; Fernández *et al.*, 1998) citados por Brito y Sandoval (2003).

Según el Plan Nacional del Desarrollo 2017-2021- TODA UNA VIDA dentro del eje 1: en su objetivo 3 menciona: “**Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones**”, y relacionado con su política 3.4 expresa el promover nuevas prácticas que aporten a la reducción de la contaminación, la conservación, la mitigación y la adaptación a los efectos del cambio climático, expulsar las misma en el ámbito global.

Estudios de Laínez y Sosa (2013) reportan que se han utilizado diversos tipos de sustratos en la digestión anaerobia en los biodigestores, ya sea residuos y subproductos de actividades agropecuarias como el estiércol bovino, caballos, aves de corral, procesadora de carne e inclusive el jacinto de agua, entre otros. El contenido ruminal es una fuente valiosa de nutrimentos cuando se incorpora a las dietas de animales, ya que representa el alimento no digerido e ingerido por los poligástricos, además el contenido excretal posee una gran cantidad de carga orgánica que puede ser transformada en biogás a través de reacciones anaerobias (Domínguez y Barajas 1993; Ayala y Perea 2000) citado por Brito y Sandoval (2003).

La implementación de un biodigestor a escala piloto consiste en la fermentación anaeróbica en el cual la materia orgánica como es la biomasa, se descompone sin oxígeno atmosférico; dando como resultado una transformación de la misma en biogás Hiler *et al.* (1985) citado por Magaña *et al.* (2006). Ante lo mencionado esta alternativa se puede aprovechar para el beneficio del área de pelaje del animal en el camal municipal, la cual se emplea una cocina a gas industrial. Por esta razón la importancia ambiental de la investigación para utilizar los residuos semi-sólidos generados en el camal municipal de Calceta, mitigando los impactos ambientales y reducir los costos asociados a tratamientos de remediación.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Producir biogás mediante biodigestor a escala piloto con residuos semi-sólidos (excretas y rumen) del camal de Calceta, Bolívar.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diagnosticar la cantidad de residuos semi-sólidos provenientes del proceso de faenamiento del camal de Calceta, Bolívar.
- Determinar la eficiencia de la producción de biogás mediante biodigestores con los residuos semi-sólidos provenientes del proceso de faenamiento del camal de Calceta, Bolívar.
- Establecer el costo de la alternativa a utilizarse en el aprovechamiento de estos residuos semi-sólidos provenientes del proceso de faenamiento del camal de Calceta, Bolívar.

### **1.4. HIPÓTESIS**

La producción de biogás obtenido de los residuos semi-sólidos (excretas y rumen) del camal municipal de Calceta, Bolívar proporcionará una alternativa de uso dentro del proceso de faenamiento.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. RESIDUOS**

De acuerdo con la OCDE (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico) se define residuo aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo que no han alcanzado un valor económico en el contexto en que fueron producidas, debido tanto a la inexistencia de mercado para los productos recurados Campero (2012) citado por Arellano (2014).

La OPS (Organización Panamericana de la Salud) señala que, aquellos residuos sólidos o semi-sólidos, con las características específicas plantean un riesgo sustancial real o potencial a la salud humana y al medio ambiente, cuando su manejo indebido dentro del área urbana se hace, autorizada o ilícitamente, en forma conjunta con los residuos sólidos municipales (Martínez, 2012).

### **2.2. RESIDUOS SEMI-SÓLIDOS**

La generación de residuos sólidos y semi-sólidos es innata a la naturaleza humana ya que cualquier actividad genera una cantidad de desechos (Castillo y Luzardo, 2013). La indebida eliminación de estas disposiciones sólidas y semi-sólidas representa una dificultad debido a muchos factores, como la deficiencia de información básica, falta de recursos económicos para explorar sistemas y tecnologías adecuadas de tratamiento de éstos. Los residuos semi-sólidos de origen animal generados por ciertos establecimientos como los camales se descomponen en un lapso de tiempo muy corto provocando malos olores y fauna nociva y propagación de enfermedades (Comisión Mexicana de Infraestructura Ambiental 2003) citado por Fierro *et al.* (2010).

### **2.3. RESIDUOS SÓLIDOS DE FAENAMIENTO**

La problemática de los residuos sobre la sociedad ha adquirido una mayor importancia sobre la contaminación a medio ambiente y como consecuencia de ello, ha acarreado la oportunidad de establecer y utilizar nuevas técnicas y

métodos para el tratamiento de los desechos que este provoca, que salvaguarden los recursos naturales. Los camales, tienen un impacto sanitario y ambiental considerable ya que los residuos orgánicos que producen (vísceras, sangre, cachos, pezuñas y otros) causan olores fétidos, afectaciones a la salud y al medio ambiente por su rápido proceso degradativo; sin embargo, debido a las bajas condiciones económicas de los municipios la mayor parte de camales, no permite implementar métodos y/o técnicas para el tratamiento de los residuos que el faenamiento genera. Pero, la integración de soluciones ambientales que son de bajo costo, podría mejorar los niveles de gestión ambiental, se ajusten a condiciones de salubridad adecuadas (Guerrero y Ramírez, 2004).

Debido a los grandes volúmenes generados y a los cambios en los patrones de consumo, que revelan la necesidad de emprender proyectos enfocados a su reducción, reciclaje, reutilización y valorización energética como la implementación de biodigestores u otros tipos de aprovechamiento de estos desechos (Castañeda y Pérez, 2015).

Existen diversos métodos para el cálculo de excretas bovinas y porcinas. Generalmente son cuantificadas a través de peso del animal adulto (Vera *et al.*, 2014); donde se conoce que por cada animal adulto se genera un total de 15kg/día (para vacas) [2.1] y 2kg/día (para cerdos) [2.2]. La producción de rumen se cuantifica a través de un cálculo similar al de excretas; estimando con un factor de generación de 20kg/día por cada vaca.

$$\text{Cant ex. porc} = \# \text{cerdos} * 2 \text{ kg/día} \quad [2.1]$$

$$\text{Cant ex. bov} = \# \text{vacas} * 15 \text{ kg} \quad [2.2]$$

$$\text{Cant rumen} = \# \text{vacas} * 20 \text{ kg} \quad [2.3]$$

#### **2.4. COMPOSICIÓN DE RESIDUOS SEMI-SÓLIDOS**

Los residuos semi-sólidos están compuestos generalmente en su mayor parte, por restos alimenticios de origen vegetal y animal que tienen una consistencia de menor dureza, y en general por productos o materias orgánicas que entran

en procesos de descomposición en un lapso de tiempo corto provocando olores fétidos, propagación de enfermedades, fauna nociva, entre otros por lo que requieren de una rápida recolección o tratamiento INAP (1986) citado por Fierro *et al.* (2010).

## **2.5. APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SEMI-SÓLIDOS**

Los desechos semi-sólidos una vez recolectados, deben ser procesados y tratados para finalmente ser ubicados en los lugares destinados para su disposición final. Este proceso se realiza con la finalidad de aprovechar en cierto modo, separando objetos voluminosos y los componentes de los residuos, disminuyendo su tamaño mediante un proceso de trituración o compactación para su posterior utilización. Mientras que los procesos de tratamiento buscan reducir el volumen y peso de los residuos y la recuperación de subproductos Jaramillo (2002) citado por Sáez y Urdaneta (2014).

Una práctica común que es muy utilizada es la alternativa de convertir los residuos orgánicos en compost o abono orgánico es a través de un proceso biológico denominado compostaje (Jaramillo, 1999; Roben, 2002) citados por Sáez y Urdaneta (2014) así como la utilización de estos desechos para generar biogás.

## **2.6. UTILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS**

La recuperación, reutilización y/o transformación de los residuos en insumos útiles es una opción que surge con el diagnóstico de la problemática ambiental de cada sector, por lo que las alternativas seleccionadas, deben ser adecuadas técnicamente a las características locales, viables económicamente y sustentables ecológicamente. Sobre estas bases es posible validar, adecuar y promover tecnologías de alternativa que representen una solución efectiva y ajustada a cada realidad, puntos que puede cumplir el proceso de biodigestor o composteo (Domínguez y Barajas, 1993; Domínguez-Cota *et al.*, 1994; Flores-

Aguirre *et al.*, 1994; Taigénides, 1995; Falla-Cabrera, 1995; Sztern y Pravia, 2001) citados por Brito y Sandoval (2003).

## **2.7. EXCREMENTO**

El excremento es el producto que se obtiene de la fermentación anaeróbica sucedida en el intestino de los residuos alimentarios no utilizados por el rumiante. La cantidad producida de estiércol diario es de 2 kg/día por animal vivo, ésta al igual que su composición química está influenciada por varios factores como el tipo de ración, su digestibilidad, la edad y el estado general del ganado Pérez y Viniegra (2006) citado por Ocaña (2013).

## **2.8. UTILIZACIÓN DEL EXCREMENTO**

Para aprovechar el potencial que los desechos orgánicos tienen como abonos, deben pasar por un proceso previo antes de su integración al suelo, de forma tal que, el material que se aporte, haya transcurrido por los procesos más enérgicos de mineralización, con lo cual debe de presentar la forma más estable posible desde el punto de vista de la biodegradación, y de esta manera presentar a los macro y micronutrientes en las formas más asimilables posibles para los productores primarios Madrid (1999) citado por Ocaña (2013). Unas de las técnicas que permite la biodegradación controlada de la materia orgánica previa a su integración al suelo es el compostaje y el producto final es conocido como composta.

## **2.9. CONTENIDO RUMINAL**

El contenido ruminal también conocido como ruminaza es un subproducto originado del sacrificio de animales, se encuentra en el primer estómago del bovino en el cual al momento del sacrificio contiene todo el material que no alcanzó a ser digerido, generalmente tiene la consistencia de una papilla, con un color amarillo verdoso y un olor característico muy intenso cuando está fresco, de acuerdo a lo anterior se puede afirmar que el contenido ruminal



obtenido en los camales una alternativa para la alimentación de rumiantes (Ocaña, 2013).

Según Acevedo (2008) el rumen es un ecosistema anaeróbico con características propias de pH, temperatura y un gran número de microorganismos como los protozoos, hongos y bacterias que están en simbiosis con el animal hospedero. Dentro de este ecosistema llamado rumen los microorganismos endosimbioses proceden con la transformación de los diferentes alimentos ingeridos por los rumiantes. El contenido ruminal es necesario para mantener los alimentos en tiempos suficientes para su digestión, es decir el estómago de los rumiantes se encuentra dividido por cuatro compartimientos entre ellos el rumen, retículo, omasum y abomasum (Omar y Vergara 2007).

## **2.10. UTILIZACIÓN DEL CONTENIDO RUMINAL**

Actualmente, en Ecuador el contenido ruminal no es reusado por el desconocimiento de los múltiples usos que se puede dar a este subproducto ya sea en la agricultura o ganadería. Así también un problema es la idiosincrasia de las personas que no permiten que sus animales sean alimentados con los desechos de otros y más aún cuando provienen del estómago; sin embargo, existen varios tipos de usos del contenido ruminal (cuadro 2.1) en sectores como la agricultura pero que no son aptas para el consumo humano directo por sus características organolépticas y sanitarias (Ocaña 2013).

**Cuadro 2.1.** Utilización del contenido ruminal.

<b>Presentación</b>	<b>Proceso</b>	<b>Producto Final</b>
Húmedo	Secado	Contenido ruminal semi seco
Seco	Secado completo al ambiente – molido	Contenido ruminal seco
	Secado completo en digestores – tamizado	Harina forrajera
Solo o con otros desechos comestibles	Secado al ambiente	Contenido ruminal seco mezclado
	Secado al ambiente o por aire forzado con aglutinantes	Bloques nutricionales

**Fuente:** Ocaña (2013)

Este subproducto originado del sacrificio de animales, el cual al momento de su muerte contiene todo el material que no alcanzó a ser digerido. Posee una gran cantidad de flora y fauna microbiana y productos de la fermentación ruminal, por esto se puede decir que es una alternativa para la alimentación de rumiantes, pollos y cerdos de engorde, por sus características químicas, biológicas, bromatológicas y su amplia disponibilidad (Ríos y Ramírez 2012). Incluso por su gran cantidad de nutrientes, carbono es posible dicha utilización para la producción de biogás por medio de biodigestores.

## **2.11. BIODIGESTOR**

De acuerdo a lo expuesto por Corona (2013), el biodigestor es un tanque cerrado de cualquier tamaño, material y forma, especificando que pueden ser tanques cilíndricos, rectangulares, esféricos o semiesféricos, dependiendo de las preferencias del usuario; y dentro del cual se deposita materia orgánica mezclada con agua, con el fin de descomponerla en ausencia de oxígeno para que se genere biogás como producto final; por lo queda definido por el diseño de la planta y la función de las variables a emplear en el proceso sean estas ambientales y económicas.

El uso de biodigestores también trae beneficios económicos y ambientales, pues reduce los costos de gas, electricidad, combustibles fósiles y reducen la dependencia de fertilizantes inorgánicos. Además, los beneficios económicos generados por este método crecen año a año después de su instalación, siendo que, en los primeros meses, el productor ya recupera la inversión inicial usada para la instalación de por ejemplo un biodigestor tubular (Da Silva, 2011).

## 2.12. BIODIGESTOR TIPO TUBULAR

Este modelo de salchicha o tubular se lo realiza de material de plástico (polietileno, OVC, y una combinación de estos), debe estar totalmente sellada en la entrada y salida que están ubicadas a cada extremo de las paredes, en la parte inferior del biodigestor tipo salchicha se encuentra un 75% del volumen que constituye la masa de fermentación, y en la parte superior con el 25% que esta el almacenamiento de gas. Estos tipos de biodigestores se recomiendan para aquellos lugares en donde las condiciones climáticas sean favorables para su respectivo proceso de operación Chavarría (2014) citado por Rivera (2015).

**Cuadro 2.2.** Componentes del biodigestor.

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	OBLIGATORIO
<b>REACTOR</b>	No es más que una “bolsa” de plástico que contendrá toda la materia orgánica que atravesará el proceso de digestión. Suele estar fabricado de polietileno (PE) o geomenbrana de policloruro de vinilo (PVC), que es más sólida y por ende, más cara.	<b>SI</b>
<b>TUBERÍAS</b>	Son de PVC. Conduce el gas desde el reactor hasta la cocina o algún otro equipo que sirva para comprobar la obtención del biogás	<b>SI</b>
<b>INVERNADERO</b>	También se le conoce como carpa solar y protege al reactor de los daños que suelen ocasionar los rayos UV. Su uso es imprescindible en las regiones frías de las sierra o altiplano para poder elevar la temperatura del reactor y evitar el helamiento de la materia orgánica	<b>NO</b>
<b>VÁLVULAS</b>	Se colocan en varios sitios de las tuberías, siendo la válvula de seguridad la de mayor importancia, ya que garantiza que la presión en el reactor sea más o menos constante. De esta manera, la válvula de seguridad impide que el reactor se dañe cuando el biogás producido no es utilizado durante un cierto tiempo y también, que el aire entre el biodigestor.	<b>SI</b>
<b>MANÓMETRO</b>	Nos da la posibilidad de poder controlar la producción de biogás	<b>NO</b>
<b>RESERVORIO</b>	Sirve para almacenar el biogás producido. Debe estar colocado de tal manera que sea fácil darle presión y no tan alejado de la instalación hará uso del biogás	<b>SI</b>

Fuente: García (2017).

### **2.12.1. VENTAJAS DEL BIODIGESTOR TUBULAR**

Sus ventajas están en que sus materiales de construcción son fáciles de transportar, la instalación es sencilla, debe instalarse con nivel freático alto de construcción horizontal, y la comparación de los otros digestores es el costo de construcción y operación que relativamente es menor y entre sus desventajas la presión de biogás es baja, la vida útil es corta y oscila de 3 a 8 años. Se alimenta diariamente (flujo semi-continuo) con la mezcla adecuada de agua y material orgánico, de cual consiste en un fermentador y cámara de almacenamiento de biogás en forma tubular hecha de polietileno en capa doble o de geo membrana de PVC, es instalado en forma horizontal en una zanja en el suelo que funciona como aislante térmico, con un tubo de admisión del afluente y un tubo de salida del efluente, y un tubo en la parte superior central para la salida del biogás (García, 2017).

### **2.13. DIGESTIÓN ANAEROBIA**

La producción anaerobia es una tecnología que permite una gestión sostenible de los residuos orgánicos agropecuarios mediante la conversión de una parte de la materia orgánica en biogás en un efluente con características apropiadas para su uso como fertilizantes y enmiendas orgánicas. Las bacterias consumen carbono y nitrógeno y como resultado se produce biogás Poggio (2009) citado por Montoya (2016).

La digestión anaerobia es un proceso biológico o natural en ausencia de oxígeno donde una comunidad de bacterias descompone la materia orgánica y produce biogás que contienen principalmente metano y dióxido de carbono. El proceso no solo reduce la contaminación orgánica, sino que también proporciona una nueva fuente de energía Zeng *et al.* (2010) citado por Quintero y Rendón (2012).

Los residuos sólidos orgánicos tales como los residuos biológicos, lodos, estiércol de ganado bovino y porcino son ampliamente utilizados como inóculos

en el proceso de digestión anaerobia para la producción de energía (Weiland (2010) y Qasaimeh *et al.* (2016), teniendo en cuenta una concentración correcta para evitar una limitación de la biomasa y una sobrecarga de materia orgánica en el biodigestor (Angelidaki *et al.*, 2009) citado por Quintero y Rendón (2012).

El biogás producido durante este proceso de digestión, tiene un alto contenido en metano, con un elevado poder calorífico del orden de 5250 kcal/m<sup>3</sup>. Así, la energía que contiene 1m<sup>3</sup> de metano equivale a la energía de 0,6m<sup>3</sup> de gas natural IDAE (Instituto para el Desarrollo y Ahorra de Energía), de ahí el interés de la digestión anaerobia frente a otro tipo de tratamiento de residuos (Lara Rey Devesa, 2014).

## **2.14. ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

La digestión anaerobia es un proceso en cadena, donde suceden diferentes etapas en las que se van generando productos hasta llegar al biogás y el biol, que son productos de interés. Inicialmente se produce una hidrólisis que da paso a la acidogénesis, acetogénesis y finalmente a la metalogénesis. En cada una de estas etapas participan diferentes poblaciones de bacterias, las cuales se encuentran en el estiércol fresco. En la imagen 2.1 se muestra el proceso de la digestión anaerobia dividido por etapas y productos que se generan. El proceso inicia cuando el estiércol es dirigido por sus propias bacterias y se produce la hidrólisis, generando así ácidos orgánicos que son a su vez compuestos por bacterias a través de des hidrogenación y acetogénesis. Los productos, el ácido acético e hidrogeno, son dirigidos por bacterias metanogénicas que generan metano, el gas más importante del biogás, puesto que permite la combustión (Herrero *et al.*, 2008).

	<b>HIDRÓLISIS</b> (Microorganismos acidogénicos)	<b>ACIDOGÉNESIS</b> (Bacterias acidogénicas)	<b>ACETOGÉNESIS</b> (Microorganismos acetogénicos)	<b>METANOGÉNESIS</b> (Microorganismos metanogénicos)
PROTEÍNAS	Aminoácidos	Ácido Acético	Ácido Acético	Metano CH <sub>4</sub>
CARBOHIDRATOS	Azúcares	Ácido Propiónico	Hidrógeno H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
LÍPIDOS	Ácidos Grasos Cadena Larga	Ácido Butírico	CO <sub>2</sub>	
<b>DIGESTIÓN ANAEROBIA - DESCOMPOSICIÓN DE COMPONENTES</b>				

Imagen 2.1. Digestión anaerobia- descomposición de sus componentes.

Fuente: Herrero *et al.*, 2008.

### 2.14.1. HIDRÓLISIS

Esta etapa consiste en la transformación enzimática de macromoléculas complejas y de mayor peso molecular como polisacáridos, lípidos, proteínas y grasas en compuestos simples y solubles, tales como aminoácidos, azúcares, ácidos grasos de cadena larga y glicerina, por la acción de las enzimas extracelulares como *bacteroides*, *clostridium* y bacterias facultativas como *estreptococos* Yadvika *et al.* (2004) citado por Quintero y Rendón (2012).

La hidrólisis es la descomposición biológica de polímeros orgánicos en moléculas más pequeñas (monómeros y dímeros) que son capaces de atravesar la membrana celular, este proceso se lleva a cabo por medio de enzimas denominadas hidrolasas, que son capaces de solubilizar la materia orgánica y romper enlaces específicos con ayuda de agua para poder ser utilizadas (Constanza, 2015).

La hidrolisis es donde las proteínas, carbohidratos y grasas son transformados en compuestos solubles por acción de bacterias proteolíticas, celulíticas y lipolíticas, respectivamente. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaeróbica en forma

que pueden ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes (Tóala, E 2013).

### **2.14.2. ACIDOGÉNESIS**

En esta etapa la acidogénesis la materia orgánica disuelta durante la hidrólisis es biodegradable a ácidos grasos volátiles (ácidos acéticos, propionico, butírico), hidrogeno, dióxido de carbono, y alcoholes por bacterias acidogénicas Pandey *et al.* (2011) citado por Quintero y Rendón (2012).

Los monómeros producidos en la fase hidrolítica son absorbidos por diferentes bacterias facultativas y obligatorias, se degradan en ácidos orgánicos de cadena corta como ácido butírico, propiónico, acético, hidrógeno y dióxido de carbono. La concentración de hidrógeno formado como producto intermedio en esta etapa influye en el tipo de producto final formado durante el proceso de fermentación. Por ejemplo, si la presión parcial de hidrógeno fuera demasiada alta, esta podría disminuir la cantidad de componentes reducidos. En general, durante esta fase, azúcares simples, ácidos grasos y aminoácidos son convertidos en ácidos orgánicos y alcoholes Arango y Sánchez (2009) citado por Ricardo (2015).

### **2.14.3. ACETOGÉNESIS**

Durante el proceso de acetogénesis, los ácidos grasos volátiles (AGV) junto con el etanol se convierten en acetato, hidrogeno y dióxido de carbono por acción de un grupo denominado organismos acetogénicos productores de hidrogeno Poh y Chong (2009) citado por Quintero y Rendón (2012).

Los compuestos intermedios se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono gracias a la actividad de las bacterias acetogénicas, la descomposición anaerobia de los ácidos propiónico y butírico no es termodinámicamente posible (Zupancic y Grilc, 2007) para presiones parciales del hidrógeno relativamente elevadas Elías *et al.* (2012) citado por Burgos (2013) por lo tanto es necesaria la presencia de poblaciones bacterianas

capaces de eliminar el hidrógeno generado en esta etapa. El hidrógeno puede ser consumido por bacterias metanogénicas hidrogenofilas y también por bacterias homoacetogénicas, capaces de producir ácido acético a partir de hidrógeno y dióxido de carbono Berna (2002) citado por Burgos (2013).

#### **2.14.4. METANOGÉISIS**

Las bacterias metanogénicas son las responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono: acetato  $H_2$   $CO_2$  formato y algunas metilimas (Karla y Laínez, 2011).

Existen dos tipos de bacterias metanogénicas, las que utilizan ácido acético (acetoclásticas) y las que utilizan hidrogeno (hidrogenefílicas). Las bacterias acetoclásticas convierten el ácido acético en dióxido de carbono y metano, se desarrollan muy lentamente e influyen apreciablemente en el pH del sistema por la eliminación de ácido acético y la formación de dióxido de carbono: además son las responsables de la mayoría de metano producido. Las bacterias hidrogenofilicas convierten el hidrogeno y dióxido de carbón a metano y controlan el potencial redox del proceso Castillo *et al.* (2007) citado por Quintero y Rendón (2012).

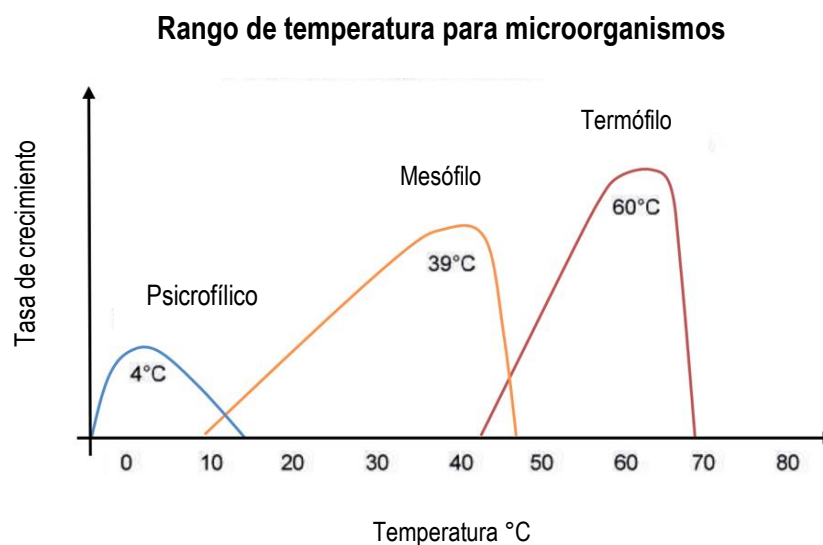
Finalmente, mediante la acción de las bacterias metanogénicas, el hidrogeno y parte de los acetatos, son transformados en metano y bióxido de carbono. El amoniaco se estabiliza en forma de sales de amonio, permaneciendo en esta forma todo el contenido original de nitrógeno de la materia orgánica, que está sometido al proceso de biodegradación anaeróbica. El metabolismo de estas bacterias es más lento, y son más sensibles a distintas condiciones ambientales (Tóala, E 2013).



## 2.15. PARAMETROS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE BIOGÁS

### 2.15.1. TEMPERATURA

Diferentes de microorganismos que producen biogás. Estos microorganismos son operativos y prosperan mejor en diferentes rangos de temperatura. Los microorganismos se dividen en diferentes grupos, dependiendo de en qué rango de temperatura operan; psicofílico, mesófilo, termófilo e hipertermófilo (imagen 2.2). Las temperaturas en las que operan los microorganismos están fuertemente conectadas al entorno del que se originan los organismos. Los microorganismos mesófilos, por ejemplo, las bacterias intestinales humanas, prosperan mejor a aproximadamente 37 °C; sin embargo, el crecimiento de microorganismos mesófilos puede comenzar a temperaturas tan bajas como 10 °C, pero cuanto mayor es la temperatura, mejor prosperan los microorganismos. Aunque, los microorganismos mueren un par de grados por encima de la temperatura óptima (Jarvis y Schnürer 2009).



**Imagen 2.2.** Rango de temperatura para diferentes tipos de microorganismos.

**Fuente:** Jarvis y Schnürer (2009).

### **2.15.2. DQO**

La DQO es un parámetro importante en la tasa de producción de biogás porque se puede utilizar como una indicación del rendimiento del proceso (Thorin *et al.*, 2012). En trabajos anteriores de McCabe *et al.* (2014) realizó una simulación de la eliminación de la DQO y la tasa de generación de biogás de residuos semi-sólidos de dos camales, donde la acumulación de materiales (alto contenido de grasa, aceite y grasa fue un problema. En esos trabajos se demostró un gran porcentaje eficiencia en la remoción de la DQO; estos niveles oscilan entre el 75%-95% no participa en el proceso de digestión anaerobia (Liu *et al.*, 2013; Eslami *et al.*, 2018). La DQO de estiércol bovino y porcino generalmente es muy elevada debido a la elevada carga orgánica (Martínez, 2019).

### **2.15.3. PRODUCCIÓN DE METANO**

Según Sponza y Ağdağ (2004), la cantidad de metano producido por masa de material orgánico biodigestado puede utilizarse como un indicador del grado de estabilización de los residuos evaluados. La DQO se usa para cuantificar la cantidad de materia orgánica en las corrientes de desechos y predecir el potencial de producción de biogás. El equivalente de oxígeno de la materia orgánica que se puede oxidar, se mide utilizando un agente oxidante químico fuerte en un medio ácido. Durante la digestión anaeróbica, la DQO biodegradable presente en el material orgánico se conserva en los productos finales, a saber, el metano y la masa bacteriana recién formada. El tiempo ideal para medir la producción de metano es a los 14, 20, 25 y 30 días (Pertiwiningrum *et al.*, 2017).

### **2.15.4. SÓLIDOS VOLÁTILES**

Las concentraciones de y sólidos volátiles (SV) de los sustratos requeridos proporcionan información útil sobre el rendimiento de producción de biogás que y también de la eficiencia del proceso (Prabhu *et al.*, 2015). La concentración

de sólidos volátiles se define como la fracción orgánica de sólidos totales y comúnmente se mide como un porcentaje de éstos en gramos por kilogramo. Para aislar lo inorgánico de la fracción orgánica del TS, el sustrato ya seco se quema en un horno de mufla a 600 ° C. El residuo después de la incineración es la fracción inorgánica. El peso del sustrato seco menos el peso de la fracción inorgánica se divide luego por el peso del sustrato seco para obtener la concentración de VS (Ray *et al.*, 2013). No solo se puede estimar el potencial de biogás de un sustrato en función de su contenido de SV, sino que también se puede lograr el grado de degradación (Yavini *et al.*, 2014; Haq y Soedjono, 2010). La disminución de sólidos totales y sólidos volátiles es un aspecto vital en la evaluación del rendimiento de la digestión anaeróbica (Abubakar e Ismail, 2012).

#### **2.15.5. pH**

En general, el proceso de biogás óptimo se ejecuta en un nivel de pH neutro entre 7,0 y 7,5 (Jarvis y Schnürer 2009). Para alcanzar este nivel durante la operación, el nivel de pH del material de alimentación debe ser algo mayor porque se puede esperar una disminución en el nivel de pH durante el proceso operativo. La disminución en el nivel de pH al comienzo del proceso puede explicarse por la formación de ácidos orgánicos en las etapas de acidogénesis y acetogénesis de la digestión anaeróbica (Abbasi *et al.*, 2011). Cuando el proceso ha estado funcionando durante algún tiempo, la concentración de amoníaco aumenta y con ella también el nivel de pH que a su vez se estabiliza. Existen bacterias productoras de metano que pueden ser productivas tanto a niveles más bajos como más altos.

Por otra parte, Vinasco (2002) establece que, para un funcionamiento óptimo de un biodigestor, el valor del pH de la mezcla debe mantenerse dentro del rango de 6,8 a 7,5, esto es, neutral a ligeramente alcalino.

Al igual que con la temperatura, el nivel de pH que produce la mayor tasa de producción suele ser uno cercano al nivel de pH que causa la muerte de las

bacterias productoras de metano (Jarvis y Schnürer 2009). Por lo tanto, cuando se trata de ejecutar un proceso de biogás de alto rendimiento y económicamente dependiente, las medidas para llevar el proceso a su límite de pH pueden ser motivadas.

El pH es una variable muy importante en el proceso de codigestión anaeróbica. Éste puede determinar el cumplimiento de las fases de acidogénesis y metanogénesis. En caso de que el pH se presente muy ácido, se regula a través de la aplicación de NaOH hasta que los niveles sean más óptimos, los cuales deben fluctuar entre 6,6 y 7,9 como lo establecen Afifah y Rianti (2017).

De acuerdo a Zhang et al. (2017) el pH de 6,5 presenta mejores condiciones para la degradación de la celulosa (81,3%) con una capacidad de producción de hidrógeno de 178 mL L<sup>-1</sup>. Sin embargo, cuando el pH está por debajo de 5,5 se presenta un mayor tiempo de retraso e ineficiencia.

## **2.16. RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO DE LAS MATERIAS PRIMAS**

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 (FAO, 2011)

En términos generales según la (FAO, 2011), se considera que una relación C/N óptima que debe tener el material “fresco o crudo” que se utilice para iniciar la digestión anaeróbica, es de 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno, es decir, C/N = 30/1. Por lo tanto, cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptimas (Nuhu et al., 2013). Sobre la base del contenido de carbono y de nitrógeno de

cada una de las materias primas puede calcularse la relación C/N de la mezcla aplicando la siguiente ecuación:

$$K = \frac{C_1 * Q_1 + C_2 * Q_2 + \dots + C_n * Q_n}{N_1 * Q_1 + N_2 * Q_2 + \dots + N_n * Q_n} \quad [2.4]$$

Donde:

K = C/N de la mezcla de materias primas.

C = % de carbono orgánico contenido en cada materia primas

N = % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

Q = Peso fresco de cada materia, expresado en kilos o toneladas.

**Cuadro 2.3.** Rango de la relación carbono nitrógeno.

Materia Prima	C (%)	N(%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	CaO(%)	MgO (%)
<b>Excretas:</b>						
Bovino	17,4 – 40,6	0,3 – 2,0	0,1 – 1,5	0,10	0,35	0,13
Porcino	17,4 - 46,0	1,1 – 2,5	0,4 – 4,6	0,30	0,09	0,10
Caprino	35,0 – 50,0	1,0 – 2,0	0,2 – 1,5	2,30		
Equino	35,0 – 52,0	0,3 – 0,8	0,4 – 1,6	0,35	0,15	0,12
Ovino	35,0 – 46,0	0,3 – 0,6	0,3 – 1,0	0,15	0,33	
Conejos	23,0 – 35,0	1,0 – 1,9	0,9 – 1,8	2,10	0,45	0,15
Aves	28,0 – 35,0	1,4 – 2,0	2,0 – 2,8	1,40	0,80	0,48
Patos	29,0 – 41,0	0,6 – 0,8	1,0 – 1,5	0,40	0,80	
Pavos	17,4 – 41,0	0,6 – 0,8	0,5 - 0,8	1,10	0,80	
Humanas	2,5	0,8 – 1,0	0,5	0,30		
<b>Mezclas:</b>						
Porcino+paja	20,0 – 22,0	0,3 – 0,5	0,24	0,63	0,20	
Bovino+paja	44,0 – 46,0	0,3 – 0,5	0,79	1,55	0,30	
<b>Rastrojo:</b>						
Caña maíz	30,0 – 40,0	0,8 – 1,8	0,4 – 0,6	2,40	0,50	0,49
Paja de trigo	16,0 – 46,0	0,53	0,70	0,40	0,26	0,16
Paja de avena	22,0 – 29,0	0,53	0,40	0,30	0,40	
Paja cebada	58,0	0,64	0,19	1,07	0,33	0,33
Paja arroz	40,0 – 42,0	0,64	0,60	0,40	0,60	
Paja haba	28,0 – 33,0	1,5 – 1,9	0,40	2,30	1,35	
Tomate	27,0 – 30,0	2,60				
Papas	30,0	0,34	0,16	0,58	0,64	
Betarraga	30,0	2,00	0,70	5,30	1,95	0,83
Rabanitos	30,0	2,50				
Hojas secas	35,0 – 40,0	1,00	0,30	0,20	2,00	
Aserrín	44,0	0,06	0,01	0,01		

Fuente: FAO (2011).

Según Pazmiño (2010) la cantidad y la calidad del biogás producido por la materia orgánica al ser sometida a un proceso anaerobio depende de la composición del desecho utilizado, el carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de nutrientes para las bacterias formadoras de metano, el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células en el proceso. La relación ideal es 30:1, si el nitrógeno presente es menor al necesario, se ve limitada la velocidad de producción de biogás; por otra parte, si en exceso, se produce amoníaco del requerido, el cual es tóxico del proceso. Los desechos animales presentan una relación C/N menor a la óptima, debido a su alto contenido de nitrógeno; los residuos agrícolas, en cambio, contienen poco nitrógeno por lo que suele mezclarse con excretas para obtener de este modo una óptima relación.

Estudios previos han demostrado que el estiércol bovino es el mejor sustrato para la producción de biogás (Garba *et al.*, 1998). La mayor parte de su

nitrógeno se encuentra en forma de ácido úrico que se convierte en almacenamiento, primero en urea y luego en carbonato de amonio. En condiciones de almacenamiento desfavorables, este último se descompone rápidamente en amoníaco, óxido de carbono y agua, lo que puede ocasionar pérdidas de nitrógeno. El rendimiento del biogás depende de la relación C/N de las diversas materias primas. Según Dioha *et al.* (2013) el rendimiento óptimo de biogás está en el rango de relación C/N de 20-30:1. La variación de los valores de C/N puede afectar el pH de una suspensión. El aumento en el contenido de carbono dará lugar a una mayor formación de dióxido de carbono y un menor valor de pH, mientras que un alto valor de nitrógeno mejorará la producción de gas de amoníaco que podría aumentar el pH en detrimento de los microorganismos. En el cuadro 2.4 se muestra la proporción de C/N de las excretas bovinas y porcinas.

**Cuadro 2.4.** Proporción Carbono/Nitrógeno

Materia prima	Contenido de carbono de la materia prima en peso%	Rendimiento de biogás m <sup>3</sup> / kg en sólidos volátiles	Contenido de nitrógeno de la materia prima en peso%	Proporción de C/N
Excreta bovina	15,8	0,50	1,20	13:1
Excreta porcina	60,0	0,028	6,0	10:1

Fuente: Dioha *et al.* (2013).

## 2.17. IMPORTANCIA DE LA RELACIÓN CARBONO-NITRÓGENO

Esta relación es importante si el Carbono-Nitrógeno es mayor que 40, la actividad biológica disminuye y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono con la consiguiente ralentización del proceso, debido a la deficiente disponibilidad de nitrógeno para la síntesis proteica de los microorganismos, para eliminar el exceso de carbono (en forma de anhídrido carbónico) es necesaria la aparición sucesiva de diversas especies microbianas. Al morir estos microorganismos el nitrógeno contenido en su biomasa se recicla y la

relación C/N tiende a disminuir. Si el residuo tiene una alta relación C/N, pero la materia orgánica es poco biodegradable, la relación C/N disponible realmente para los microorganismos es menor y el proceso evolucionará rápidamente, pero afectará sólo a una proporción de la masa total (Chiluisa *et al.*, 2017).

## 2.18. RELACIÓN DEL PORCENTAJE SÓLIDO- AGUA

Para Suquilanda (2006) también es importante considerar la relación de materia seca y agua, que implica el grado partículas en la solución, la cantidad de agua debe normalmente situarse alrededor de 90% en peso del contenido total. Tanto el exceso como la falta de agua son perjudiciales del cual la cantidad de agua varía de acuerdo con la materia prima destinada a la fermentación.

Según Cajamarca (2012) considera que para conseguir un buen funcionamiento del biodigestor debe cuidarse la calidad de la materia prima o biomasa, la temperatura de la digestión (25° a 35°), la acidez (pH) alrededor de 7.0 y las condiciones anaeróbicas del que se da cuando esta herméticamente cerrado. Se considera la relación de en la siguiente tabla.

**Cuadro 2.5.** Relación de porcentaje sólido-agua

Fuente de estiércol	Cantidad utilizada			
	Estiércol	%	Agua	%
Bovino	1 Parte	50	1 Parte	50
Porcino	1 Parte	25	1 Parte	75

**Fuente:** Cajamarca (2012)

Según Ayamacaña *et al.* (2009) se debe considerar la cantidad de agua para preparar la mezcla de digestión, para lo se describe en la siguiente tabla:



**Cuadro 2.6.** Porcentaje solido-agua

Bovino	Cantidad de agua	
	Fresco seco	1:1
Seco	1:2	
Porcino	1:2	

**Fuente:** Ayamacaña *et al.* (2009)

Entonces para el estiércol se tiene una relación 1:2 es decir, (1kg de estiércol por 2 litros de agua). Si la mezcla es demasiado diluida, se puede digerir relativamente poca materia orgánica y la producción de biogás es limitada, Si se usa primordialmente excreta humana y orines, estiércol y desechos de agricultura como alimento para el digestor, entonces la razón de biomasa a agua debe estar entre 1:1 y 1:2. Por consiguiente por cada 100 Kg. de heces y orina se requieren entre 100 y 200 litros de agua. Si el material de alimento consta principalmente de residuos vegetales, se requiere de más agua, en una razón de 1:3 o 1:4. Es esencial proporcionar una buena mezcla en el digestor para promover una biodegradación efectiva, especialmente si se utiliza biomasa cruda con alto contenido leñoso (Vinasco, 2002).

De acuerdo a Castano *et al.* (2014) la cantidad de agua añadida varía con el contenido sólido de estiércol fresco; por lo tanto, la proporción de estiércol: agua varía de 2:1 para estiércol seco a 10:1 para estiércol húmedo. Es importante, también conocer la relación de sólidos volátiles (SV)/sólidos totales (TS) promedio. Para la tasa de carga orgánica, se utilizó la siguiente ecuación para calcular el volumen de estiércol diluido que se va a alimentar:

De acuerdo a Pertiwiningrum *et al.* (2017) para la producción de biogás a partir del estiércol bovino con la adición de fluido del rumen, éste último debe variar sus proporciones en cuatro tratamientos, que son 0, 20, 30 y 40% del volumen total del estiércol. La relación entre el estiércol del ganado y el agua debe ser de 1:2. El biodigestor se opera en el sistema por lotes en condiciones anaeróbicas. La observación se realiza durante 30 días y analiza el volumen de

gas formado registrando día a día la alteración de la superficie del agua en el tubo de la báscula al mismo tiempo. Si el gas en ese tubo se encuentra cerca de 50 en el tiempo de preparación, ese gas se libera a través de una jeringa. El objetivo es normalizar la superficie del agua.

## **2.19. TIEMPO DE RETENCIÓN**

En biodigestores tubulares, el tiempo de retención hidráulica (HRT) es la cantidad de tiempo que el material orgánico pasa en el biodigestor desde la inserción hasta la salida (Abbasi *et al.*, 2011). Para un proceso de biogás normal, la HRT dura entre 10 y 25 días, pero también puede ser más larga dependiendo del material de alimentación y la temperatura (Jarvis y Schnürer, 2009). Un material que sea fácil para los microorganismos degradarse y / o un proceso de biogás que funcione a alta temperatura permitiría una TRH más baja. Se puede requerir un TRH prolongado para los procesos de biogás que funcionan a temperaturas inferiores a 30 °C, especialmente para un material más complejo como el estiércol animal. Probablemente se requiera un TRH de al menos 50 días.

En los biodigestores continuos y semi-continuos el tiempo de retención se define como el valor en días del consiente entre el volumen del biodigestor y el volumen de carga diaria, con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistente como la celulosa demandará mayor tiempo de retención para ser totalmente digeridos (Alzate *et al.*, 2007).

El límite mínimo del tiempo de retención está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que continua salida de efluente del biodigestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido, esta extracción debe ser compensada por la multiplicación de las bacterias que pertenecen dentro del reactor (Alzate *et al.*, 2007).

**Cuadro 2.7.** Tiempo de retención de los sustratos.

<b>Materia Prima</b>	<b>Tiempo de Retención</b>
Estiércol de vacuno líquido	20-30 días
Estiércol de porcino líquido	15-25 días

Fuente: Alzate *et al.*, 2007

Los períodos de retención de 10 a 25 días para la mezcla del digestor son usuales para la mayoría de países tropicales. Si las temperaturas ambientales son altas, por ejemplo, en promedio entre 30 y 35° C, puede ser suficiente un período de retención más corto, de 15 días. En climas más fríos, son comunes periodos de retención más largos, de 80 a 90 días. En el caso de desechos de ganado porcino que son ricos en ácidos volátiles se necesitan de 10 a 15 días; los excrementos de bovinos que contienen compuestos de difícil descomposición requieren mínimo de 20 días de digestión (Vinasco, 2002).

## **2.20. ASERRÍN**

Hilbert (2007) citado por Reyes (2017) expresa que como consecuencia de la manufactura e industrialización quedan en los aserraderos, carpinterías y obrajes montañas de virutas y aserrines cuya acumulación entraña peligros e inconvenientes, como ser riesgo de incendio, contaminación del aire y proliferación de alimañas, actualmente estos desechos se queman o entierran o se dejan de lado. Todos estos residuos se podrán colocar en un biodigestor y generar una cantidad de biogás que se puede usar para calefacción, cocción o fuerza motriz, y todo con una materia prima que de otra manera se tiraría. El rendimiento de la producción de biogás es muy bajo ya que, de toda la materia orgánica, la madera es la que menos produce biogás pero se compensa debido a que la existencia de los desechos es altísima y gratuita.

## **2.21. BIOGÁS**

El biogás es un gas combustible un poco más liviano que el aire su densidad de 0,94 Kg/m<sup>3</sup> a condiciones atmosféricas, posee una temperatura de

inflamación de alrededor de 700°C y la temperatura de la llama alcanza 870°C. Su pureza y calidad dependen de la cantidad de metano que contengan; cuanto mayor es el porcentaje de este gas, posee mayor poder calorífico (Martínez, 2011). La producción de biogás va a depender, principalmente, de los materiales utilizados, de la temperatura y tiempo de descomposición (Abdeshahian et al., 2016). La producción de biogás se calcula con la ecuación 2.5.

$$V = \frac{4}{3} * \pi * r^3 \quad [2.5]$$

Donde:

V = Volumen

$\pi = 3,1416$

r = Diámetro

Existe una estrecha relación entre la temperatura y tiempo de descomposición del material en el biodigestor. A mayor temperatura, más rápido es el proceso de descomposición, esto significa que el material requiere menos tiempo dentro del fermentador. Así pues, el biogás obtenido a partir de residuos ricos en materia orgánica, como son los residuos ganaderos, agrícolas o derivados, es una fuente de energía renovable que utiliza la energía contenida en la biomasa, proveniente de la fotosíntesis y por tanto del sol (Fernández, 2017).

### **2.21.1. CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS**

El principal componente para obtener biogás es el rumen, estiércol y materias vegetales, que pueden ser transportada por medio de tuberías, para obtener gas se necesita de tiempo y trabajo para esto surgen algunas consideraciones Hilbert (2009) citado por Ramírez, (2016).

- La unidad debe ser ubicada lo más cerca posible al lugar donde se encuentra la materia orgánica.

- Las temperaturas ideales para obtención de biogás están comprendidas entre 32 a 37°C y si se obtiene temperaturas inferiores de 10°C totalmente se obtiene gas.
- La materia prima como el rumen el estiércol se debe tener en abundancia.

### 2.21.2. COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

El biogás es un gas combustible formado en su mayoría por metano (CH<sub>4</sub>) y por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), aparte de contener pequeñas cantidades de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono y trazas de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), el cual le proporciona un olor característico a azufre (cuadro 2.8). Esta puede variar de acuerdo con el tipo de material orgánico utilizado en la carga del biodigestor y con el tiempo que se utilice en el proceso de biodigestión Hilbert (2009) citado por Ramírez (2016).

**Cuadro 2.8.** Composición química del biogás

Componentes	Formula Química	Porcentaje
Metano	CH <sub>4</sub>	60-70
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	30-40
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	Hasta 1,0
Sulfuro de hidrogeno	H <sub>2</sub> S	Hasta 1,0
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,5-3
Monóxido de carbono	CO	0,1
Oxigeno	O <sub>2</sub>	0,1

Fuente: Ramírez (2016)

### 2.21.3. USO DEL BIOGÁS

El biogás es un tipo de energía de biomasa, que se obtiene producto de la digestión anaeróbica o fermentación de la materia orgánica (residuos animales y vegetales) y que puede presentar diferentes usos como es el poder calorífico y energéticos, como calefacción, alumbrado o electricidad y poder calorífico Varnero *et al.* (2012) citado por Basurto y Huiza (2017).

## 2.22. EFICIENCIA ECONÓMICA DE BIODIGESTORES

La eficiencia económica de un biodigestor para producción de gas se puede calcular a través de una ecuación utilizada por Nandy *et al.* (2002) quienes realizaron la sumatoria de todos los costos implicados en la construcción, mano de obra, operación y materiales necesarios utilizados en el proceso de fabricación de un biodigestor (ecuación 2.6). Así mismo Sánchez y Franco (2018), coinciden con un procedimiento para calcular costos en la construcción de biodigestores tipo tubular para aprovechar el estiércol de animales en el sector agropecuario.

$$C_E = CC + MO + OyM + M \quad [2.6]$$

- ✓ **Donde:**
- ✓  $C_E$  = Costo económico del biodigestor
- ✓  $CC$  = Costo de construcción (USD)
- ✓  $MO$  = Mano de obra (USD)
- ✓  $OyM$  = Operación y mantenimiento (USD)
- ✓  $M$  = Materiales (USD)

## **CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO**

### **3.1. UBICACIÓN**

La investigación se realizó en el Camal Municipal de Calceta, cantón Bolívar, ubicado en la ciudadela Francisco González, vía a El Morro. Situado geográficamente con sus respectivas coordenadas 0°, 50 minutos 28 segundos al Sur y 80°, 10 minutos 26 segundos al Oeste, limitando al Norte con el cantón Chone, al Sur con los cantones Portoviejo y Junín, al Este con el cantón Pichincha y al Oeste con el cantón Tosagua.



**Imagen 3.1.** Ubicación satelital del sitio de estudio.

### **3.2. DURACIÓN DEL TRABAJO**

La investigación tuvo una duración de nueve meses, a partir de la aprobación del proyecto de titulación.

### **3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS**

#### **3.3.1. MÉTODOS**

La investigación empleó el método experimental, el cual tuvo como finalidad establecer un diseño que permitió manipular las variables y controlar el nivel de

producción de biogás en función del volumen de excretas bovinas–porcinas y rumen generadas en el camal municipal de Calceta. La investigación utilizó un enfoque cuantitativo en una prueba a escala de laboratorio para el análisis de varios parámetros y variables a medir (pH, producción de biogás, concentración de metano, relación carbono/nitrógeno, sólidos volátiles y DQO).

### 3.3.2. TÉCNICAS

Las técnicas empleadas fueron: la revisión bibliográfica y la entrevista (anexo 3). La primera se usó durante toda la fase de preparación de la investigación, la otra se aplicó en la fase de campo, previo a la implementación de biodigestor, las cuales contribuyeron a la obtención de información sobre la disposición de los residuos semi-sólidos, el número de animales faenados, entre otros.

### 3.4. FACTOR DE ESTUDIO

**FACTOR A:** Dosis de mezclado, que fue el sustrato de excretas bovinas y porcinas, aserrín y rumen del camal municipal.

#### Niveles:

**Proporción 1:** (30% estiércol de volumen – 20% rumen).

**Proporción 2:** (30% estiércol de volumen – 30% rumen).

**Proporción 3:** (30% estiércol de volumen – 40% rumen).

Siguiendo la metodología de Pertiwinigrum *et al.* (2017), la cuantificación del volumen de los materiales mezclados, se realizó a través de cálculos en función del volumen total de los biodigestores a llenar (75%-15L) y el % de los diferentes materiales: rumen (según cada tratamiento), estiércol bovino y porcino, aserrín (anexo 23). Finalmente, el volumen de agua se calculó con la ecuación 3.1.

$$\text{Vol H}_2\text{O} = \text{VTB} - \text{VTMS} \quad [3.1]$$

Donde:

**VTB:** Volumen total del biodigestor.



**VTMS:** Volumen total de mezcla sólida

**Cuadro 3.1.** Dosis del mezclado.

Tratamientos	Dosis de mezclado (L)	Agua (L)	Aserrín (g)	Volumen del material mezclado (L)
T1	2,25 L estiércol bovino – 2,25 L estiércol porcino – 3 L rumen	7,0	67,7	15
T2	2,25 L estiércol bovino – 2,25 L estiércol porcino – 4,5 L rumen	5,5	67,7	15
T3	2,25 L estiércol bovino – 2,25 L estiércol porcino – 6 L rumen	4,0	67,7	15

### 3.5. TRATAMIENTOS

Se aplicó tres tratamientos (20, 30 y 40% de rumen) y tres repeticiones; con un total de nueve unidades experimentales donde se realizó una mezcla de residuos semisólidos (excretas porcinas, bovinas, rumen) que constó de diferentes dosis, según el tratamiento.

**Cuadro 3.2.** Descripción de los tratamientos.

Tratamientos	Índice de la variable	Descripción	Tiempo de retención
T1	20%	Proporción 1	30 días
T2	30%	Proporción 2	30 días
T3	40%	Proporción 3	30 días

### 3.6. UNIDAD EXPERIMENTAL

**Cuadro 3.3.** Números de tratamientos con su porcentaje de mezclado.

Tratamiento	Nomenclatura	Cantidad de material a tratar (L)	Dosis de mezclado
T1	A1R1	15	30% estiércol (2,25L bovino-2,25L porcino) – 20% rumen (3L)
T1	A1R2	15	30% estiércol (2,25L bovino-2,25L porcino) –

			20% rumen (3L)
T1	A1R3	15	30% estiércol (2,25L bovino-2,25L porcino) – 20% rumen (3L)
T2	A2R1	15	30% estiércol (2,25L bovino-2,25L porcino) – 30% rumen (4,5L)
T2	A2R2	15	30% estiércol (2,25L bovino-2,25L porcino) – 30% rumen (4,5L)
T2	A2R3	15	30% estiércol (2,25L bovino-2,25L porcino) – 30% rumen (4,5L)
T3	A3R1	15	30% estiércol (2,25L bovino-2,25L porcino) – 40% rumen (6L)
T3	A3R2	15	30% estiércol (2,25L bovino-2,25L porcino) – 40% rumen (6L)
T3	A3R1	15	30% estiércol (2,25L bovino-2,25L porcino) – 40% rumen (6L)

### 3.7. DISEÑO EXPERIMENTAL

Por las condiciones del problema, en este proceso de investigación, y debido a las características del experimento se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con tres tratamientos y tres repeticiones.

**Cuadro 3.4.** Esquema del análisis de varianza.

Fuente de variación	Grados de libertad
Total	8
Tratamientos	2
Error experimental	6

### 3.8. VARIABLES DE ESTUDIO

#### 3.8.1. VARIABLES INDEPENDIENTE

- Cantidad de inóculo (rumen al 20, 30 y 40%).
- Relación Carbono/Nitrógeno.

#### 3.8.2. VARIABLES DEPENDIENTE

- Producción de biogás.
- Concentración de metano en el biogás.

### **3.9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Para las variables en estudio se realizó las siguientes pruebas:

- Análisis de varianza (ANOVA): permitió obtener las diferencias significativas estadísticas en cada uno de los tratamientos.
- Prueba de medias.

### **3.10. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS**

Para el tratamiento de los datos se utilizó el programa estadístico InfoStat.

### **3.11. PROCEDIMIENTOS**

EL sujeto en este estudio fue el sustrato de excretas bovino y porcino del camal municipal de Calceta. El co-sustrato fue el aserrín y el inóculo fue el rumen bovino que se obtuvo también del camal municipal.

El procedimiento de la presente investigación se desarrolló con base a los objetivos específicos:

#### **3.11.1. FASE I. DIAGNÓSTICO DE LA CANTIDAD DE RESIDUOS SEMI-SÓLIDOS PROVENIENTES DEL PROCESO DE FAENAMIENTO EN EL CAMAL DE CALCETA, BOLÍVAR**

##### **Actividad 1. Cuantificación de rumen, excretas bovinas y porcinas generadas**

Se realizaron varias visitas al área de estudio para identificar diariamente las actividades asociadas al proceso de faenamiento en el camal municipal de Calceta del cantón Bolívar (ver anexo 1 y 4). A través de observaciones y entrevistas (ver anexo 3) se corroboró datos preliminares sobre las actividades que generan residuos semisólidos dentro del camal (ver anexo 2), así también se determinó el destino final de los mismos.

Posteriormente, se realizó un cálculo sobre el volumen de rumen, las de excretas bovinas y porcinas generadas en el camal haciendo uso de las

ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3, respectivamente, como lo proponen Vera *et al.* (2014).

### **3.11.2. FASE II. EFICIENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE BIODIGESTOR CON LOS RESIDUOS SEMISÓLIDOS DEL CAMAL DE CALCETA, BOLÍVAR**

#### **Actividad 2. Preparación e implementación del biodigestor a escala piloto**

Para esta investigación se eligió el proceso de digestión anaeróbica a través de biodigestor. Para esto, se emplearon nueve botellones de agua de 20 litros (tamaño del biodigestor) para el desarrollo de las unidades experimentales. Estos botellones se modificaron estéticamente para simular las características del biodigestor tipo tubular, es decir se cubrió su exterior con pintura negra (ver anexo 10) y se le incorporó una válvula de seguridad para la obtención del biogás (ver anexos 5, 6 y 9), del cual cada uno de los prototipos tuvo el 75% de la mezcla de reacción (excreta bovina y porcina, rumen, agua y aserrín) dejando el 25% para la producción del mismo.

#### **Actividad 3. Preparación de las variables y parámetros de respuesta**

En esta actividad se desarrolló la preparación del inóculo (rumen bovino) que pasó por el proceso de desgasificación, purga y aclimatación que fue utilizado y almacenado en los biodigestores anaeróbicos. En el proceso también se añadió el sustrato (estiércol bovino y porcino) y el co-sustrato (aserrín) en diferentes proporciones, según cada tratamiento.

La mezcla entre el inóculo, el sustrato y el co-sustrato estuvieron listos para el proceso anaeróbico una vez analizados inicialmente (día uno a partir de la mezcla) las características de las variables a medir, tales como: pH (Dioha *et al.*, 2013), DQO y SV (Castano *et al.*, 2014), C/N (FAO, 2011) se midió a través de la ecuación (2.4). Los pesos de las de las diferentes materias utilizadas en la mezcla fueron registrados en una balanza en función del volumen a utilizar en cada biodigestor, según el tratamiento (ver anexo 22). La medición inicial se

realizó para realizar una comparación al finalizar el tratamiento, como lo recomiendan Afifah y Rianti (2017).

#### **Actividad 4. Monitoreo de variables y parámetros de respuesta**

Para este estudio, se siguió el mismo procedimiento utilizado por Al-Rousan y Zyadin (2014) quienes analizaron por cada tratamiento las siguientes variables y parámetros de respuestas:

La **producción diaria de biogás** se basó en cálculos a través de la ecuación 2.5. Para esto, al canal de salida del gas se le ubicó un globo sellado completamente para evitar fugas del mismo y diariamente se midió su diámetro (anexo 19). El volumen de biogás producido en cada biodigestor se registró por separado. Este proceso se repitió, diariamente, durante el tiempo de experimentación (30 días para este caso) en horarios de 8H00 am. Cuando los globos se llenaron con el gas, la llave de paso del biodigestor se cerró y se reemplazó el globo por uno nuevo.

El **pH** se determinó usando el equipo potenciómetro (ver anexo 17) en el día final de la experimentación (día 30) y se verificó si los niveles alcanzados se ajustan a los niveles óptimos (6,6-7,9) recomendados por Afifah y Rianti (2017).

Los **sólidos volátiles** se calcularon a través de pruebas gravimétricas en laboratorio en el día final de la experimentación; siguiendo los procedimientos de Ray *et al.* (2013). (ver anexos 13, 14, 15 y 16).

La **DQO** se midió a través de los procedimientos del método de dilución sólida (SD) (anexo 18, 11 y 12).

La **concentración de metano** en el biogás se midió en los días 14, 20, 25 y 30, como lo recomiendan Pertiwinigrum *et al.* (2017). La composición del biogás se determinó a través del equipo medidor de gases (Anexo 21).

### **Actividad 5. Determinar la diferencia entre tratamiento mediante análisis de varianza**

En esta actividad, se analizó los resultados obtenidos en cada uno de los tratamientos y sus repeticiones que se compararon para determinar cuál es el más eficiente en la producción de biogás empleando residuos semi-sólidos (excretas bovinas y porcinas; rumen) y aserrín. Para calcular la eficiencia de los biodigestores se aplicó una prueba estadística (ANOVA) para las variables: producción de biogás, DQO, concentración de metano en el biogás y sólidos volátiles, resultado de cada una de las nueve unidades experimentales y que servirá como una alternativa de utilidad en el área de la cocina en el proceso del pelaje de los animales.

### **3.11.3. FASE III. ESTABLECIMIENTO DEL COSTO DE LA ALTERNATIVA A UTILIZARSE EN EL APROVECHAMIENTO DE ESTOS RESIDUOS EN EL PROCESO FAENAMIENTO**

#### **Actividad 6. Determinación del costo de la alternativa**

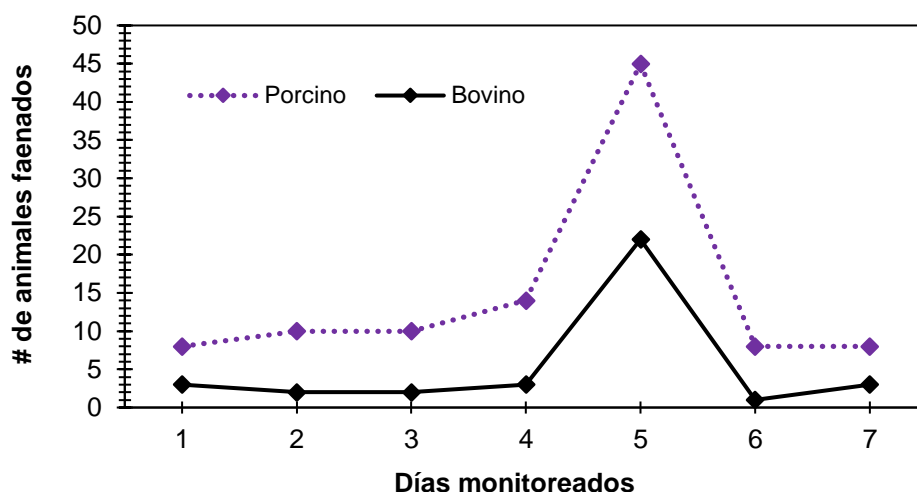
Para la determinación del costo de la alternativa y establecer cuan rentable económicamente resulta esta tecnología, se estimó costos asociados al tratamiento más eficiente para la obtención de biogás empleando a partir de excretas bovinas, porcinas y rumen. Se utilizó la ecuación 2.6 para obtener el costo de la tecnología, que sirvió como herramienta para poder proyectar la alternativa del biodigestor tubular a mayor escala en el Camal Municipal de Calceta del cual puede ser de gran utilidad en el área de la cocina en el proceso del pelaje de los animales.

## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. FASE I. DIAGNÓSTICO DE LA CANTIDAD DE RESIDUOS SEMI-SÓLIDOS PROVENIENTES DEL PROCESO DE FAENAMIENTO EN EL CAMAL MUNICIPAL DE CALCETA, BOLÍVAR**

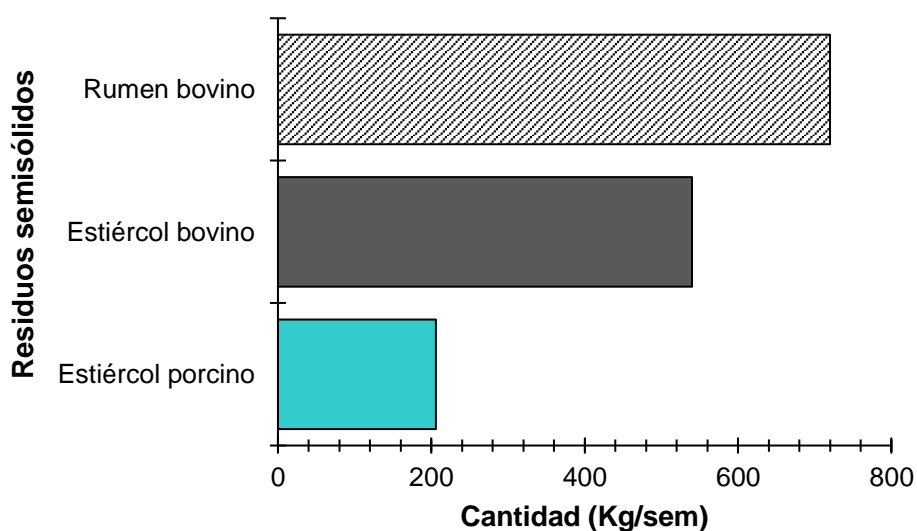
#### **4.1.1. Actividad 1. Cuantificación de rumen y excretas bovinas y porcinas generadas**

De acuerdo a las visitas técnicas en el camal municipal de Calceta, se identificó que diariamente se procesa un número mayor de ganado porcino en comparación con el ganado bovino (gráfico 4.1). El número de ejemplares porcino faenados diariamente oscila entre 8 y 45, mientras que en bovinos se encuentra entre 1 y 22. Semanalmente se faena un total de 36 animales bovino y 103 porcino. En ambos casos el día viernes es el más representativo para el procesamiento de faenamiento (45 para el ganado porcino y 22 para el ganado bovino). El día sábado es el menos representativo, uno para el ganado bovino y ocho para el ganado porcino; este mismo número de porcino también se repite los días domingo y lunes para esta misma categoría. Por otra parte, en estos mismos días se faenan un número de tres animales bovino. Los días martes y miércoles coinciden con el número de animales faenados (2 bovinos y 10 porcinos) y el día jueves se faenan tres ejemplares bovinos y 14 animales porcinos.



**Gráfico 4.1.** Animales sacrificados en el camal municipal de Calceta, según los días de la semana.

El cálculo de la producción presentó que se genera 540 kg/sem de estiércol bovino y 206 kg/sem de estiércol porcino en función de los animales sacrificados durante una semana. La cantidad de rumen generada en una semana fue de 720 kg/sem (gráfico 4.2).



**Gráfico 4.2.** Cantidad de residuos semisólidos generados en el Camal municipal, semanalmente.

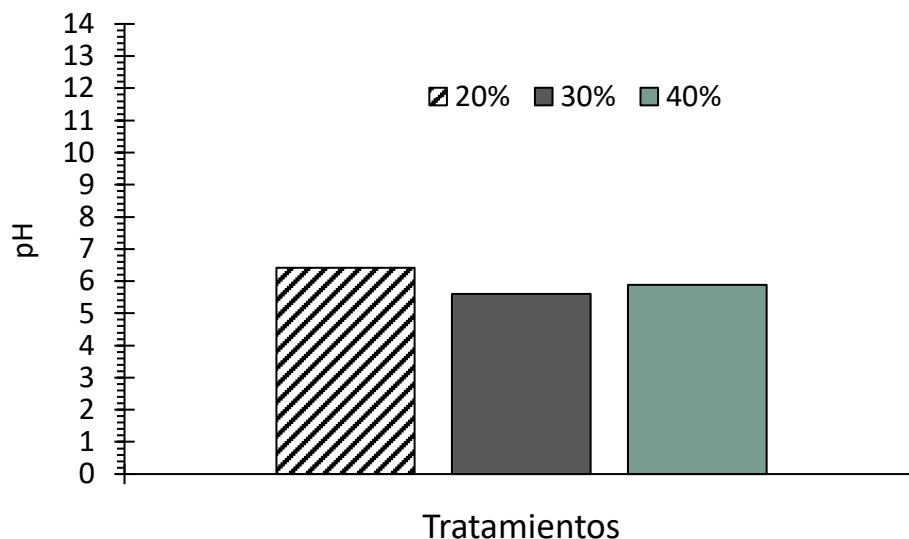


## **4.2. FASE II. EFICIENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE BIODIGESTOR CON LOS RESIDUOS SEMISÓLIDOS DEL CAMAL DE CALCETA, BOLÍVAR**

### **4.2.1. Actividad 3. Preparación de las variables y parámetros de respuesta**

#### **pH**

El parámetro de pH analizado demostró que las excretas del ganado porcino y bovino tienen una leve tendencia hacia la acidez, con promedios de 6,42 al 20%; 5,60 al 30% y 5,89 al 40% (gráfico 4.3); encontrando relación con los niveles de pH encontrados por Martínez (2015) en una mezcla del 15% de estiércol bovino y 15% de estiércol porcino en un biodigestor. En condiciones normales de fermentación, el ambiente del rumen es débilmente ácido y está poblado por microorganismos que se adaptan a valores de pH entre 5,5 y 6,5 (Zhang *et al.*, 2017). Las bacterias ruminales fibrolíticas son generalmente sensibles al pH bajo y los niveles de crecimiento de las bacterias celulolíticas principales, como *Ruminococcus* y *Fibrobacter*, se suprimen considerablemente por debajo de pH 6,1. Además, muchos de los microorganismos ruminales no celulolíticos son menos sensibles al pH bajo que las bacterias celulolíticas. Esto indica que estas condiciones de pH iniciales fueron óptimas para una mayor eficiencia de los tratamientos con respecto a la degradación de la celulosa y la producción de biogás.



**Gráfico 4.3.** pH inicial en función de las unidades experimentales del estudio.

### Relación C/N

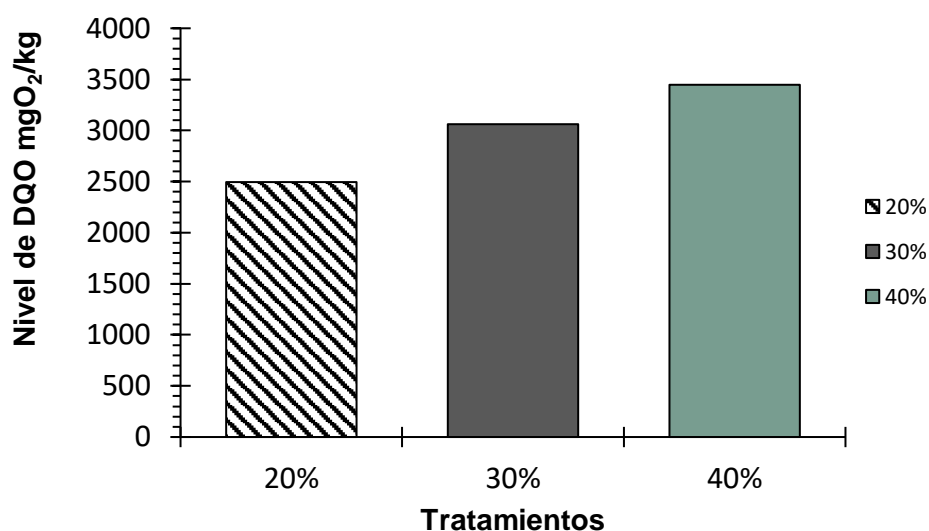
El cuadro 4.1 muestra que la relación C/N varía desde 20,74 para el tratamiento uno (20%) hasta 21,24 para el tratamiento dos (30%). Esto coincide con los datos de Dioha *et al.* (2013) quienes mencionan que el rendimiento óptimo de biogás está en el rango de relación C/N de 20-30:1; lo que indica que los tratamientos 1, 2 y 3 sí se ajusta a este rango de relación. En consecuencia, estos hallazgos presentan que la mezcla en los tres tratamientos (20%, 30% y 40% de rumen bovino) presenta indicadores óptimos para una digestión exitosa. El proceso de digestión anaerobia de desechos orgánicos que se mezclan espesante como fuente de bacterias genera una armonía entre la proporción de carbono y nitrógeno (C/N) (Nuhu *et al.*, 2013).

**Cuadro 4.1.** Relación Carbono: Nitrógeno de las diferentes materias prima de los biodigestores.

Tratamientos	Estiércol bovino			Estiércol porcino			Rumen			Aserrín			Sum	C/N
<b>20%</b>	C <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> *Q <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> *Q <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> *Q <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	Q <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> *Q <sub>4</sub>	C	<b>20,74</b>
	40%	2,86kg	1,14	45%	2,89kg	1,30	40%	3,67kg	1,47	44%	0,067kg	0,02948	3,94	
	N <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	N <sub>1</sub> *Q <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> *Q <sub>2</sub>	N <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	N <sub>3</sub> *Q <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	Q <sub>4</sub>	N <sub>4</sub> *Q <sub>4</sub>	N	
	2%	2,86kg	0,06	2%	2,89kg	0,06	2%	3,67kg	0,07	0,06%	0,067kg	0,0000402	0,22	
<b>30%</b>	C <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> *Q <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> *Q <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> *Q <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	Q <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> *Q <sub>4</sub>	C	<b>21,24</b>
	40%	2,78kg	1,11	45%	2,86kg	1,29	40%	5,07kg	2,03	44%	0,067kg	0,02948	4,46	
	N <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	N <sub>1</sub> *Q <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> *Q <sub>2</sub>	N <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	N <sub>3</sub> *Q <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	Q <sub>4</sub>	N <sub>4</sub> *Q <sub>4</sub>	N	
	2%	2,78kg	0,06	2%	2,86kg	0,06	2%	5,07kg	0,10	0,06%	0,067kg	0,0000402	0,21	
<b>40%</b>	C <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> *Q <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> *Q <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> *Q <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	Q <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> *Q <sub>4</sub>	C	<b>20,77</b>
	40%	2,81kg	1,12	45%	2,91kg	1,31	40%	7,34kg	2,94	44%	0,067kg	0,029788	5,4	
	N <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	N <sub>1</sub> *Q <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> *Q <sub>2</sub>	N <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	N <sub>3</sub> *Q <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	Q <sub>4</sub>	N <sub>4</sub> *Q <sub>4</sub>	N	
	2%	2,81kg	0,06	2%	2,91kg	0,06	2%	7,34kg	0,15	0,06%	0,067kg	0,0000402	0,26	

## DQO

En el gráfico 4.4 se puede ver como la mezcla del biodigestor tubular alcanzan niveles de 2495 mgO<sub>2</sub>/kg (20% de rumen) hasta 3447,33 mgO<sub>2</sub>/kg (40% de rumen). Esto es característico en este tipo de residuales, incluso autores como Martínez (2019) han encontrado que la de DQO puede presentarse en cantidades de hasta 46294,0 mgO<sub>2</sub>/kg (es decir, aproximadamente 13,5 veces más en comparación con este hallazgo). Se infiere que los biodigestores pueden realizar una remoción de DQO levemente significativa. Se realizó comparaciones con otro estudio, donde inicialmente se presenta una DQO superior en comparación con este estudio (58400 mgO<sub>2</sub>/kg) y se alcanzó una eficiencia de remoción desde 81,7% a 92,8%. Sin embargo, la eficiencia de eliminación se redujo a 67,9% al reducir la tasa de carga orgánica hasta 22000 mgO<sub>2</sub>/kg (Liu et al., 2013).



**Gráfico 4.4.** Niveles de DQO inicial de las unidades experimentales.

## Sólidos volátiles

El mayor nivel de sólidos volátiles (SV) en el día uno se registró para el tratamiento dos (30%) de rumen (93,71g). El tratamiento uno (20%) y tres (40%) registraron niveles similares de SV; 82,47g y 81,66g, respectivamente (gráfico 4.5). Por su parte, Abubakar & Ismail (2012) encontraron que el

rendimiento más efectivo en términos de degradación de SV ocurre durante la digestión por lotes, a través de una hidrólisis eficiente en la fase ácida. De acuerdo a los mismos autores, hay una tendencia a una mayor reducción de ST y SV con una producción baja o no de biogás, presumiblemente debido a los componentes inherentes apenas biodegradables, en consecuencia, una mayor concentración de amoníaco contribuye a la inhibición del proceso.

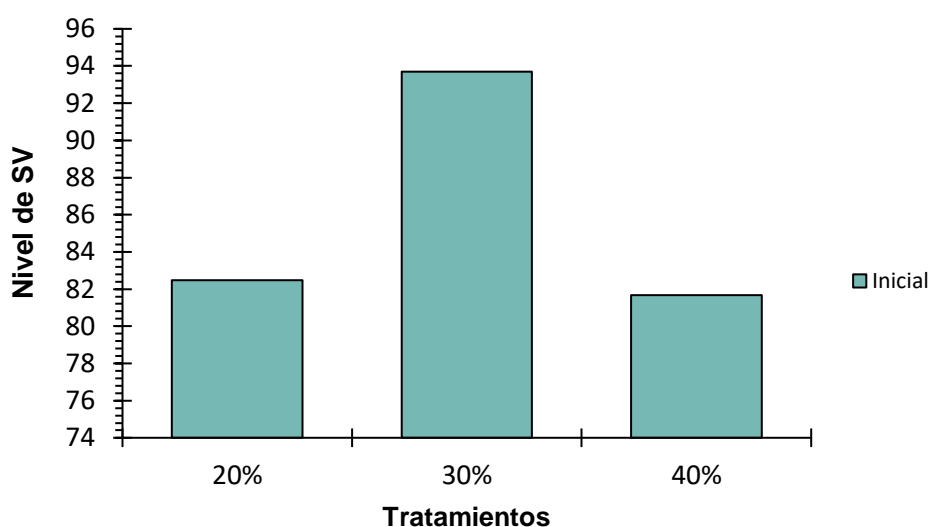


Gráfico 4.5. Nivel de SV inicial de las unidades experimentales.

#### 4.2.2. Actividad 4. Monitoreo de variables y parámetros de respuesta

##### Producción de biogás

El gráfico 4.6 muestra que la producción de biogás, en los tres tratamientos, tiene una tendencia similar; es decir: muy baja producción los 10 primeros días, del día 11 al 21 una producción de rápida intensidad; aumentando hasta 7 veces más la producción en comparación a los primeros 10 días, aproximadamente y finalmente desde el día 21 al 30 la producción de biogás se mantiene casi constante. Para el biodigestor con el 40% de contenido de rumen, la cantidad de gas generado resulta ser la más alta del experimento. Los hallazgos de este estudio indicaron que el potencial de biogás a partir de desechos animales como una alternativa para la generación de gas a pequeña escala (Abdeshahian et al., 2016).

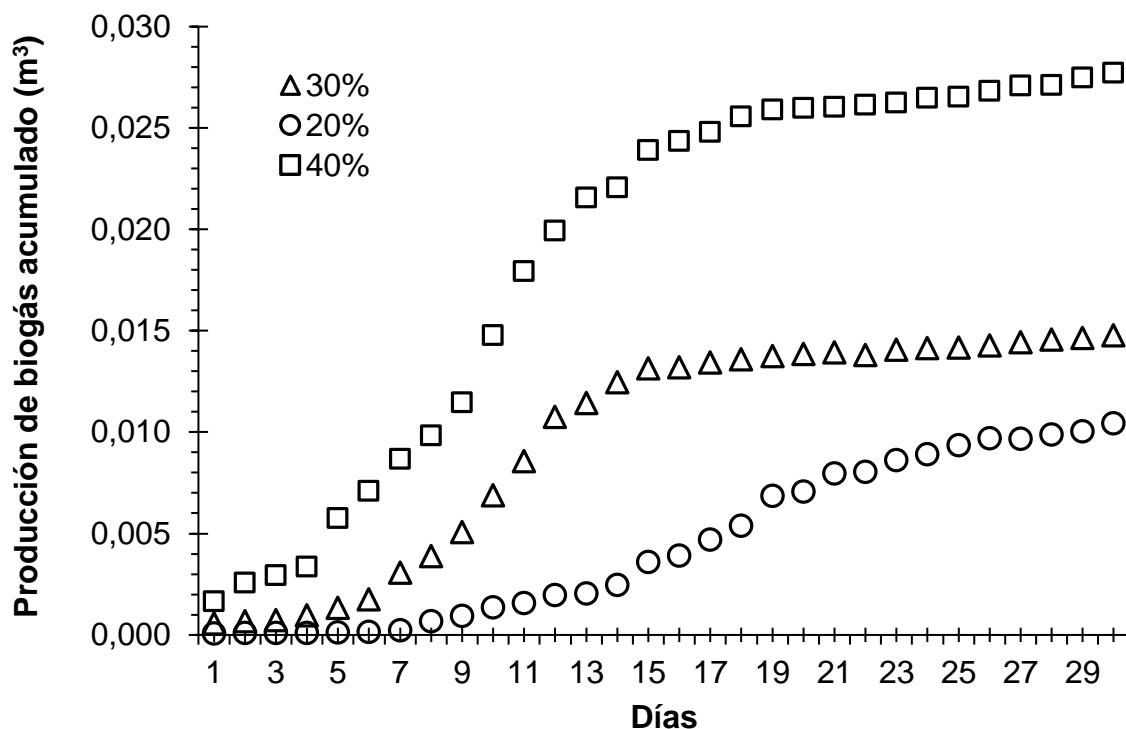


Gráfico 4.6. Relación entre la producción de biogás acumulada y el tiempo de experimentación.

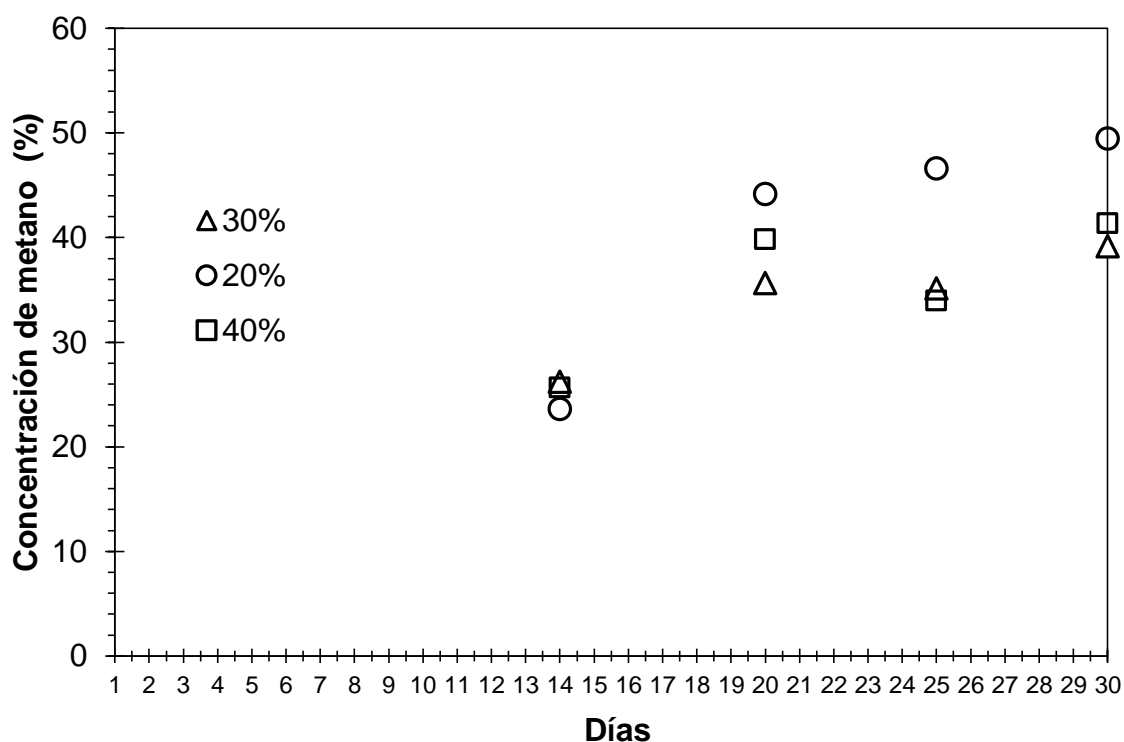
### Concentración de metano

El gráfico 4.7 muestra que, en 20 días, la concentración de metano para los tratamientos con una variación del líquido del rumen bovino (20, 30 y 40%) es mayor en comparación con la concentración de metano del día 14. Esto demuestra que el proceso de formación de metano puede acelerarse mediante la adición de 20% de rumen bovino en 20 días con una concentración de 44,16% (ver anexo 24), con un volumen de biogás de 0,007m<sup>3</sup> (gráfico 4.5). Según Weiland (2010) y Qasaimeh *et al.* (2016), un iniciador (inóculo) es un grupo de microorganismos en un cierto número y ciertas condiciones fisiológicas que están listas para ser inoculadas en los medios de fermentación.

Los microorganismos son uno de los factores clave que determinan el éxito del proceso biológico de los residuos de fluidos orgánicos. Su existencia es importante para varias etapas de la transformación del material orgánico como

la acidogénesis (Herrero *et al.*, 2008) y metanogénesis. Uno de los iniciadores que se puede usar es el líquido del rumen bovino que contiene diversos microorganismos, incluidas bacterias de hidrólisis, protozoos y hongos.

Diferentes sistemas microbianos participan en la transformación de residuos orgánicos en una serie de reacciones en biogás en condiciones anaeróbicas. En este estudio se muestra que el proceso de metanogénesis ocurre entre 10 (gráfico 4.6) y 20 días con la adición del rumen. En los días 25 y 30, la concentración de metano es relativamente constante. En los tratamiento 30 y 40% hay una baja concentración de metano, esto puede deberse a la disminución del sustrato en el tratamiento al con la adición de líquido del rumen bovino y la disminución de la actividad de los microorganismos formadores de metano.



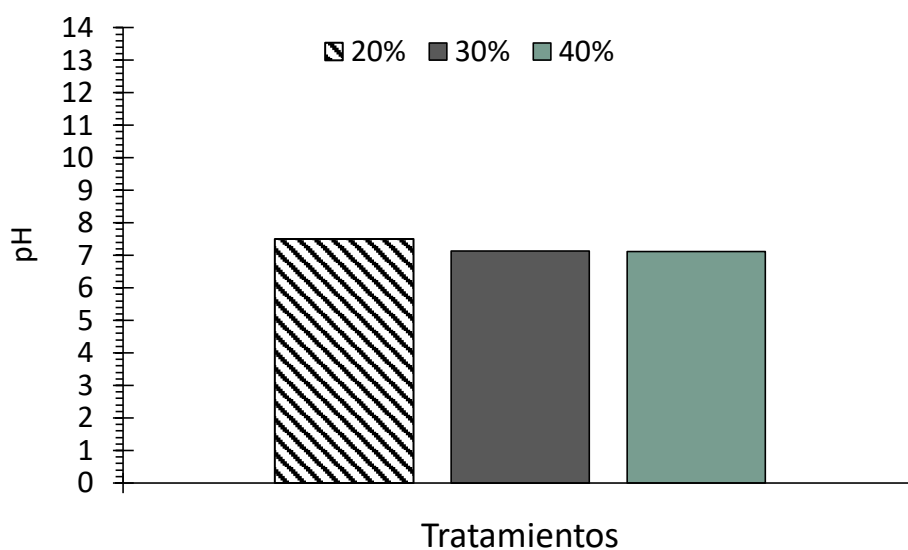
**Gráfico 4.7.** Concentración de metano y tiempo.

## pH

En esta investigación, inicialmente el pH promedio se encontró con una tendencia ácida 6,42 al 20%; 5,60 al 30% y 5,89 al 40% (gráfico 4.3); sin

embargo, al finalizar los 30 días de experimentación este parámetro fue ajustado en la co-digestión anaeróbica mediante el proceso de aclimatación natural. En el gráfico 4.8 se representan los niveles de pH para el día 30 y en todos los tratamientos alcanza un nivel de pH que se encuentran dentro de los rangos óptimos (6,6-7,9) como lo afirman Afifah y Rianti (2017).

Durante la experimentación, el pH en todos los tratamientos fluctuó con una ligera diferencia, especialmente en la concentración del 20% (T1) el nivel fue superior en comparación con T2 (30%) y T3 (40%) alcanzando un valor promedio de 7,50 diferenciado por 7,14 y 7,12, respectivamente. Se comprueba que el experimento, en todos los tratamientos, alcanzó la fase de metanogénesis debido a que los datos obtenidos se encuentran en el rango óptimo, es decir, de 6,6 a 7,9; lo que indica que el proceso de co-digestión anaeróbica puede alcanzar una mayor optimización (Haq y Soedjono, 2010). Otro indicador fue que no hubo una disminución del pH que generalmente es causada por la acidogénesis y la actividad bacteriana de la acetogénesis que se regenera cada 36 horas y entre 80 y 90 horas trabajando a un pH de 5,2 a 6,3 (Zupancic y Grilc, 2007).



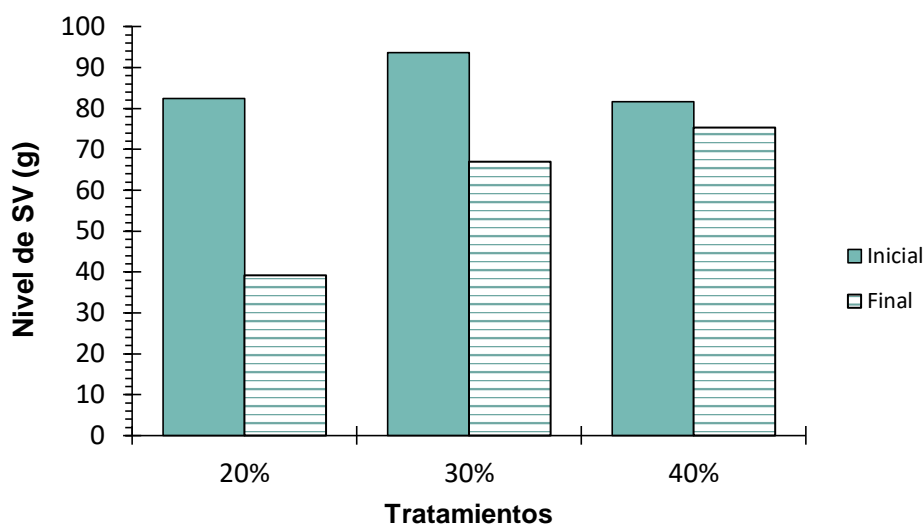
**Gráfico 4.8.** pH a los 30 días de experimentación



### **Sólidos volátiles**

El valor de sólidos volátiles (SV) mostró una tendencia descendente que muestra la degradación de los sólidos de los materiales orgánicos (Haq y Soedjono, 2010). Los SV representan una gran reducción en la eficiencia del proceso de digestión que ocurre en la co-digestión anaeróbica que se realiza (Yavini *et al.*, 2014). De acuerdo al gráfico 4.9 en los tres tratamientos (20, 30 y 40%) existió reducción del nivel de SV.

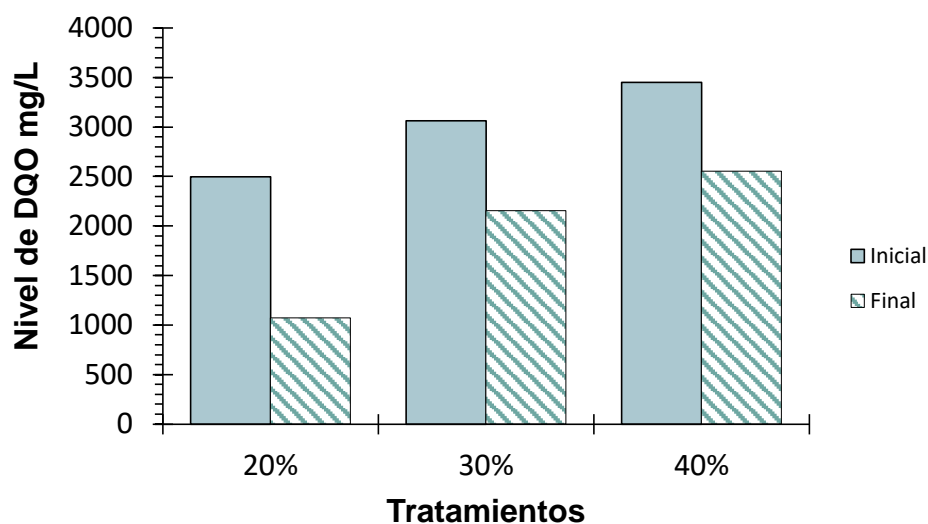
El tratamiento uno (20% de rumen bovino) alcanzó la mayor eficiencia (47,53%), removiendo un total de 43,27g de SV en comparación con el valor inicial (82,47g); lo que indica que la cantidad final de SV en este tratamiento se redujo hasta 39,20g. Para el tratamiento dos (30% de rumen bovino) la cantidad de SV se redujo de 93,71g (SV inicial) hasta 67,02 (SV final) con una diferencia de 26,69g, obteniendo una eficiencia del 28,48%. No obstante, para la concentración de rumen al 40% (Tratamiento tres) la remoción de SV fue mucho menor (6,37g) que representa una eficiencia del 7,80%. Se infiere que este último, al tener una mayor masa, la digestión anaerobia resulta más tardía en comparación con los otros dos tratamientos. La eficiencia a una concentración de rumen del 20%, a pesar de ser la menos representativa en este estudio, resultó ser mejor para remover SV, aproximándose a los resultados de Prabhu *et al.* (2015) quienes en un estudio similar alcanzaron una eficiencia de 66% hasta el 78% para una misma concentración de rumen.



**Gráfico 4.9.** Nivel de SV inicial (día 1) y final (día 30).

## DQO

Hay diferencia entre la DQO inicial y final de los tres tratamientos (concentraciones de rumen al 20, 30 y 40%). En el biodigestor con una concentración de 20%, en comparación con los otros dos tratamientos, la DQO al día 30 alcanzó la reducción más significativa, con un nivel de hasta 1069,67mgO<sub>2</sub>/kg (ver gráfico 4.10); equivalente al 57,13%. Mientras tanto, las concentraciones al 30 y 40% experimentaron también reducciones en la DQO, pero en un nivel menor (2153,33 mgO<sub>2</sub>/kg=29,66% y 2554 mgO<sub>2</sub>/kg=25,91%, respectivamente); sin embargo, los tres tratamientos tienden a disminuir la DQO. La reducción de DQO se correlaciona con el tiempo de funcionamiento del biodigestor; lo que indica que mientras mayor sea el tiempo de reacción, mayor será la eficiencia de remoción para la DQO. Estos hallazgos contrastan con Eslami et al. (2018) quienes durante el período de operación de un biodigestor anaerobio alcanzaron una eficiencia del 82,49% en la eliminación de DQO.



**Gráfico 4.10.** Nivel de la DQO inicial (día 1) y final (día 30).

#### **4.2.3. Actividad 5. Determinar la diferencia entre tratamientos para la producción de biogás**

El cuadro 4.2 presenta el análisis de varianza, en donde se pueden observar los resultados reportados entre las variables analizadas, con un nivel de confianza del 95%. Para los tres tratamientos (20, 30 y 40% de rumen), el ANOVA muestra que la diferencia de cada variable respuesta estadísticamente es altamente significativa ( $p < 0,05$ ). Particularmente, el tratamiento tres (40% de rumen bovino) fue el más eficiente, luego el tratamiento dos (30% de rumen bovino) y finalmente el tratamiento uno (20% de rumen bovino), esto se cumplió para la producción de biogás, concentración de metano, DQO y SV.

**Cuadro 4.2.** ANOVA de los tratamientos.

Variables respuesta		Suma de cuadrados	gl	Promedio de cuadrados	F	Sig.
Producción de Biogás	Between Groups	485,885	2	242,943	919,039	0,000
	Within Groups	1,586	6	0,264		
	Total	487,472	8			
Concentración de metano	Between Groups	176,733	2	88,367	96,268	0,000
	Within Groups	5,508	6	0,918		
	Total	182,241	8			
DQO	Between Groups	625176,000	2	312588,000	566,625	0,000
	Within Groups	3310,000	6	551,667		
	Total	628486,000	8			
SV	Between Groups	1111,215	2	555,608	3,326	0,000
	Within Groups	1002,358	6	167,060		
	Total	2113,573	8			

### **4.3. FASE III. ESTABLECIMIENTO DEL COSTO DE LA ALTERNATIVA A UTILIZARSE EN EL APROVECHAMIENTO DE ESTOS RESIDUOS EN EL PROCESO FAENAMIENTO**

#### **4.3.1. Actividad 6. Determinación del costo de la alternativa a escala real**

En el cuadro 4.3. Se presenta la estimación económica para producir 0,2m<sup>3</sup> de biogás aprovechando las excretas bovinas, porcinas y el rumen del camal municipal del Calceta. Para esta estimación se consideró el mejor tratamiento (40% de rumen bovino). Se estimó una inversión de \$75 para la adquisición de materiales; éstos incluyen tuberías, contenedor de digestión, sellantes, transporte de materia prima para la digestión anaeróbica, entre otros. Para la mano de obra y construcción es necesario un monto de \$150 que incluye la contratación de personal que se encargue de construir, montar e instalar el

sistema de tratamiento. Finalmente se estimó un total de \$50 para gastos de operación y mantenimiento que incluye la contratación de un obrero que controle el proceso de digestión como lo recomiendan Sánchez y Franco (2018).

**Cuadro 4.3.** Resumen de la estimación de costos para un biodigestor.

Biodigestor	Producción de biogás (m <sup>3</sup> )	Costo de construcción (USD)	Mano de obra (USD)	Operación y mantenimiento (USD)	Materiales (USD)
T1	0.2	100	50	50	75

A través de la ecuación utilizada por Nandy *et al.* (2002) se encontró que el monto necesario para la implementación de un biodigestor que produzca 0.2m<sup>3</sup> de biogás para actividades del camal de la ciudad de Calceta se requiere una inversión total de \$275 (cuadro 4.4).

**Cuadro 4.4.** Costo de inversión de un biodigestor para la producción de 0,2 m<sup>3</sup> de biogás acumulado.

Costo de biodigestor
$C_E = CC + MO + OyM + M$
$C_E = 100 + 50 + 50 + 75$
$C_E = 275$

Este monto permitiría que los problemas asociados a los recursos naturales del camal municipal de Calceta puedan ser mitigados, controlados y/o evitados; logrando que las instalaciones del camal y sus alrededores se ajusten a criterios de una mejor producción. Por lo tanto, este costo es muy bajo si se considera el ahorro de gastos asociados al manejo de residuos sólidos orgánicos.

# **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **5.1. CONCLUSIONES**

- Se faenan 36 vacas y 103 cerdos semanalmente con una producción de estiércol bovino de 540kg, estiércol porcino de 206 kg y de una cantidad de rumen de 720kg cada semana.
- Se encontró diferencia significativa entre los niveles de producción de biogás de los tres tratamientos (20, 30 y 40%) de rumen. Esto también se cumplió para la producción de biogás, concentración de metano, DQO, y SV; lo que indica que se cumple la hipótesis planteada en el estudio.
- El prototipo del tratamiento de mayor eficiencia (40%), tanto para la construcción del biodigestor, mano de obra, materiales, operación y mantenimiento, tuvo un costo de \$275; lo que resultó en una factibilidad económica viable si se lo asocia a todos los beneficios ambientales y sociales que éste permitirá en el lugar de funcionamiento.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- Desarrollar una cuantificación de los materiales orgánicos producidos en el camal municipal de Calceta en un mayor período para que los datos sean más exactos.
- Realizar otras pruebas de experimentación variando los porcentajes de rumen (50%, 75, y 100%) y aumentar el número de tratamiento para comprobar si la eficiencia es superior.
- Promover el uso del biodigestor de mayor eficiencia de (40%) a una escala operativa en el camal municipal de Calceta para desarrollar actividades complementarias en el área de cocina para reemplazar el GLP por biogás.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi, T., Tauseef, S. M., y Abbasi, S. A. (2011). Biogas energy (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- Abdeshahian, P., Lim, J. S., Ho, W. S., Hashim, H., & Lee, C. T. (2016). Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 714-723.
- Abubakar, B., & Ismail, N. (2012). Anaerobic digestion of cow dung for biogas production. *ARPN journal of engineering and applied sciences*, 7(2), 169-172.
- Acevedo, D (2008). Evaluación del contenido ruminal como suplemento alimenticio para el consumo de ganado bovino ensilándolo con lactobacillus casei. Obtenido de <https://repository.eafit.edu.co>.
- Afifah, U., & Rianti, C. (2017). Biogas potential from anaerobic co-digestion of faecal sludge with food waste and garden waste. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1826, No. 1, p. 020032). AIP Publishing.
- Al-Rousan, A., y Zyadin, A. (2014). A technical experiment on biogas production from small-scale dairy farm. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 4(1), 10.
- Álzate, R., Di Bernardo, M., Montanaro, U., & Santini, S. (2007). Experimental and numerical verification of bifurcations and chaos in cam-follower impacting systems. *Nonlinear Dynamics*, 50(3), 409.
- Arellano, D (2014). Caracterización de los desechos orgánicos del camal de Guayaquil. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec>.
- Ayamacaña, C., Eduardo, A., & Ramos Ortíz, R. V. (2009). Diseño y construcción de un biodigestor de campana flotante a partir de desechos orgánicos de ganado porcino con capacidad de 12m<sup>3</sup> para la obtención de biogás el cual va a ser utilizado en la cocción de alimentos y climatización de la granja el Descanso. (En línea). Consultado 12 de nov de 2018. Formato PDF. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec>.
- Basurto, M., y Huiza, F. (2017). Implementación de un biodigestor a partir de residuos ganaderos, para uso doméstico en la hacienda la esperanza, calceta, bolívar, Manabí. Obtenido de <http://repositorio.espam.edu.ec>.
- Brito, L; y Sandoval, C. (2003). Uso del contenido ruminal y algunos residuos de la industria cárnica en la elaboración de composta. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 45-63.

- Burgos, A. (2013). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia). Obtenido de <https://upcommons.upc.edu>.
- Cajamarca, D (2012). Procedimientos para la elaboración de abonos orgánicos. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec>.
- Castano, J. M., Martin, J. F., & Ciotola, R. (2014). Performance of a small-scale, variable temperature fixed dome digester in a temperate climate. *Energies*, 7(9), 5701-5716.
- Castañeda, G., y Pérez, A. (2015). La problemática del manejo de los residuos sólidos en seis municipios del sur de Zacatecas. *Región y Sociedad*, 97-115.
- Castillo, L., y Luzardo, M. (2013). Evaluación del manejo de residuos sólidos en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. Obtenido de Universidad Pontificia Bolivariana: [www.scielo.org](http://www.scielo.org)
- Constanza, L (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. Obtenido de <http://www.scielo.org.co>.
- Corona, I. (2013). Biodigestores. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 45.
- Cum, M. (2016). Impactos ambientales que generan los Camales Municipales de Arenillas y Huaquillas 2012. Obtenido de Repositorio de la Universidad de Guayaquil
- Chiluisa, B., & Iván, E. (2017). Efecto de la relación carbono/nitrógeno en el tiempo de descomposición del abono de cuy (*Cavia porcellus*), enriquecido (Bachelor's thesis).
- Da Silva, D. (2011). Determinación de dimensiones de un biodigestor en función de la proporción de gas sobre la fase líquida. *Revista Holos*, 49-56. De esta biotecnología. Consultado el 05 de Noviembre del 2018. Obtenido de <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx>.
- Dioha, I. J., Ikeme, C. H., Nafi'u, T., Soba, N. I., y Yusuf, M. B. S. (2013). Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production. *International Research Journal of Natural Sciences*, 1(3), 1-10.
- Eslami, H., Hashemi, H., Fallahzadeh, R. A., Khosravi, R., Fard, R. F., & Ebrahimi, A. A. (2018). Effect of organic loading rates on biogas production and anaerobic biodegradation of composting leachate in the anaerobic series bioreactors. *Ecological engineering*, 110, 165-171.



- FAO. (2011). Manual de Biogás. MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 27-53.
- Fernández, J. (2017). Producción de biogás. Obtenido de <https://www.unas.edu>.
- Fierro, A., Armijo, C., Buenrostro, O., y Vadez, B. (2010). Análisis de la generación de residuos sólidos en supermercados de la ciudad de Mexicali, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 291-297.
- Garba B., Atiku A.T. and Aliyu M. (1998). Proceedings of the World Renewable Energy Congress V. 20-25 September 1998, Florence, Italy, Part III, (Edited by A.A.M. Sayigh).
- García, R. (2017). Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región piura. Obtenido de <http://www.perusolar.org>.
- Guerrero, J., y Ramírez, I. (2004). Manejo Ambiental de residuos en mataderos de pequeños municipios. *Scientia Et Technica*, 199-204.
- Haq, P; and Soedjono, E. 2010 Potensi Lumpur Tinja sebagai Penghasil Biogas Institut Teknologi Sepuluh November 1–13
- Herrero, M *et al.*, (2008). Introducción de biodigestores en sistemas agropecuarios en el Ecuador. Obtenido de <http://beegroup-cimne.com>
- Jarvis, Å., y Schnürer, A. (2009). *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar*. Swed Gas Technol Cent, Rapp SGC, 207, 1102-7371.
- Karla y Laínez (2011). La digestión anaerobia y bioquímica. *Revista de Divulgación, División Académica de Ciencias Biológicas*. Obtenido de <http://revistas.ujat.mx>.
- Laínez, J., y Sosa, J. (2013). Degradación anaerobia del contenido gástrico ruminal bovino para la obtención de biogás, en un biodigestor tipo cúpula. *Ingeniería*, 57-65.
- Lara Rey Devesa (2014). Obtención de biogás a partir de codigestión anaerobia de micro algas y fangos de EDAR. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu>.
- Levayen, C. y. (2017). Contaminación de desechos sólidos y su afectación al ambiente. Obtenido de <http://repositorio.upse.edu.ec>
- Liu, C., Luo, S., Yang, Q., Xiao, B., & Hu, Z. (2013). Effect of low-intensity sonicated inoculum on the anaerobic digestion of disintegrated sludge

- with low organic content. *Fresenius Environmental Bulletin*, 22(1a), 261-266.
- Magaña, J., Torres, E., Martínez, M., Sandolval, C., & Hernández, R. (2006). Producción de biogás a nivel de laboratorio utilizando estiércol de cabras. *Acta Universitaria*, 27-37.
- Martínez. (2011). Valoración de la producción de biogás durante un proceso de digestión anaerobia con contenido ruminal de origen bovino bajo condiciones de tiempo, carga y temperatura diferenciales. Obtenido de <http://ridum.umanizales.edu>.
- Martínez, A (2012). Análisis de la estructura jurídica de la Gestión Integral de Residuos Sólidos y sus implicaciones sociales. Universidad de Costa Rica, 45-55
- Martínez Lozano, M. (2015). Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato. *Nova scientia*, 7(15), 96-115.
- Martínez-Ruano, J. A., Restrepo-Serna, D. L., Carmona-García, E., Giraldo, J. A. P., Aroca, G., & Cardona, C. A. (2019). Effect of co-digestion of milk-whey and potato stem on heat and power generation using biogas as an energy vector: Techno-economic assessment. *Applied Energy*, 241, 504-518.
- McCabe, B. K., Hamawand, I., Harris, P., Baillie, C., & Yusaf, T. (2014). A case study for biogas generation from covered anaerobic ponds treating abattoir wastewater: Investigation of pond performance and potential biogas production. *Applied Energy*, 114, 798-808.
- Molina, S (2015). Matadero de Calceta. Obtenido de <http://repositorio.espam.edu.ec>
- Montoya, E (2016). Uso del estiércol de animales para la producción de biogás en Moquegua. Obtenido de <https://revistas.ujcm.edu.pe>.
- Nandy, T., Shastry, S., Kaul, S.N., 2002. Wastewater management in cane molasses distillery involving bioresource recovery. *Journal of Environmental Management* 65 (1), 25–38.
- Niño, C. (2015). Propuesta de un sistema de gestión ambiental basado en la NORMA iso 14001:2004 para el matadero municipal de la ciudad de Lambayaque. Obtenido de Repositorio de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogorvejo.
- Nuhu, M., Mujahid, M. M., Hamisu, A. A., Babangida, D., Tsunatu, D., Mustapha, Y., & Ahmed, I. (2013). Optimum design parameter

determination of biogas digester using human faeces feedstock. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*, 4(4), 46-49.

Ocaña, M. (2013). Propuesta de reuso de desechos orgánicos obtenidos del proceso de eviscerado del Centro de Faenamiento Ocaña Cía. Ltda. De la ciudad de Quero para disminuir la contaminación del suelo. *Universidad Técnica de Ambato*, 24-33.

Omar, A y Vergara, L (2007). Propiedades físicas y químicas del rumen. Obtenido de <http://www.methanetomarkkests.org>

Pazmiño, A (2010). Diseño y construcción de un biodigestor plástico de flujo continuo, a partir de desechos orgánicos para la Hacienda San Antonio. Obtenido de <https://repositorio.espam.edu.ec>

Pertiwiningrum, A., Susilowati, E., Rochijan, N. A. F., Soeherman, Y., & Habibi, M. F. (2017). Potential Test on Utilization of Cow's Rumen Fluid to Increase Biogas Production Rate and Methane Concentration in Biogas. *Asian Journal of Animal Sciences*, 11, 82-87.

Plan Nacional de Desarrollo TODA UNA VIDA 2017-2021. Obtenido de [www.planificación.gob.ec](http://www.planificación.gob.ec)

Prabhu M, Waigaonkar S, Dube R., Walther D and Mutnuri S 2015 Carbon – Science and Technology *Carbon-Science Technology* 2 87–98

Qasaimeh, A., M.R. Abdallah/Qasaimeh and F.B. Hani, 2016. A review on biogas interception processes in municipal landfill. *J. Environ. Sci. Technol.*, 9: 1-25.

Quintero, M., y Rendón, Y. (2012). Producción de Biogás. Obtenido de <http://tangara.uis.edu.com>

Ramírez, G. (2016). Valoración de la producción de biogás durante un proceso de digestión anaerobia. Obtenido de <http://ridum.umanizales.edu.co>.

Ray, N. H. S., Mohanty, M. K., & Mohanty, R. C. (2013). Anaerobic digestion of kitchen waste: Biogas production and pretreatment waste, a review. *International Journal of Scientific and Research Publication*, 3(11).

Reyes, E (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. Obtenido de <https://www.lamjol.info/index.php>.

Ricardo, P (2015). Digestión anaeróbica: Mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria

alimentaria. Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-DigestionAnaerobica-5746937.pdf

- Ríos, M y Ramírez, L (2012). Aprovechamiento del contenido ruminal bovino para cebsa cunicola, como estrategia para diezmar la contaminación generada por el matadero en San Alberto. Obtenido de prospectiva,10(2),56.doi:10.15665/rp.v10i2.234
- Rivera, M. (2015). Implementación de una Biodigestor para producir biogás a partir de residuos orgánicos generados en el centro de faenamiento municipal de Napo. Obtenido de <http://dspace.espoch.edu.ec>.
- Sáez, Á., y Urdaneta, J. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y El Caribe. Revista Omnia, 121-135.
- Sánchez, I., & Franco, A. (2018). Procedimiento de cálculo para el dimensionamiento y análisis térmico de biodigestores del tipo bolsa tubular y domo fijo.
- Sponza, D. T., & Ağdağ, O. N. (2004). Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors. Process Biochemistry, 39(12), 2157-2165
- Suquilanda, M (2006). Agricultura orgánica, Alternativa Tecnológica del futuro, Tercera edición. Abya - Yala. Quito pp. 654
- Thorin, E., Lindmark, J., Nordlander, E., Odlare, M., Dahlquist, E., Kastensson, J. ... & Pettersson, C. M. (2012). Performance optimization of the Växtkraft biogas production plant. Applied energy, 97, 503-508.
- Tóala, E. (2013). Diseño de un biodigestor de polietileno para la obtención de biogás a partir del estiércol de ganado en el rancho Verónica. Obtenido de <http://dspace.espoch.edu.ec>
- Vera, I. R., José, M. R., Melitón, E. J., & Agustina, O. S. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. Ingeniería, investigación y tecnología, 15(3), 429-436.
- Vinasco, J (2002). Tecnología de biogás. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org>.
- Weiland, P., 2010. Biogas production: Current state and perspectives. Applied Microbiol. Biotechnol. 85: 849-860.
- Yavini, T. D., Chia, A. I., & John, A. (2014). Evaluation of the effect of total solids concentration on biogas yields of agricultural wastes. Int Res J Environ Sci, 3(2), 70-75.

- Zhang, L., Chung, J., Jiang, Q., Sun, R., Zhang, J., Zhong, Y., & Ren, N. (2017). Characteristics of rumen microorganisms involved in anaerobic degradation of cellulose at various pH values. *RSC Advances*, 7(64), 40303-40310.
- Zupancic, G D and Grilc, V. 2007 *Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste 2 Slovenia: InTech.*

# **ANEXOS**

**Anexo 1. Visitas al lugar de estudio****Anexo 2. Rumen bovino.****Anexo 3. Conversatorios con trabajadores responsables del Camal municipal.****Anexo 4. Área de faenamiento del Camal municipal.**

**Anexo 5.** Corte de tuberías para salida de gas.



**Anexo 6.** Instalación de tapas selladas herméticamente.



**Anexo 7.** Preparación de los biodigestores



**Anexo 8.** Adecuación del área para los biodigestores





**Anexo. 9.** Biodigestores para el experimento



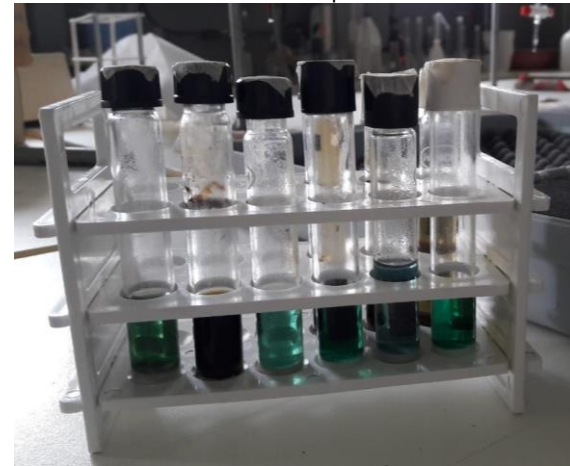
**Anexo. 10.** Biodigestores pintados para el experimento



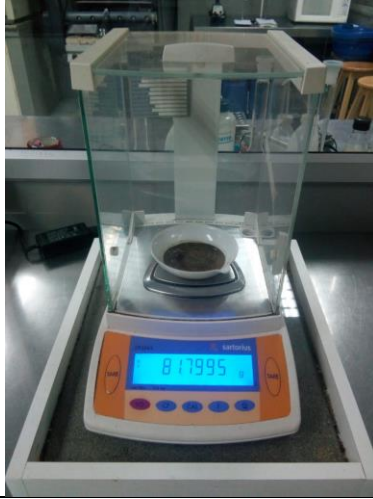
**Anexo 11.** Análisis de la DQO



**Anexo. 12.** Análisis para la DQO



**Anexo. 13.** Peso de cápsula para SV



**Anexo. 14.** Peso de muestra para SV



**Anexo. 15.** Peso de muestra después de estufa para SV



**Anexo. 16.** Muestra después de mufla para SV



**Anexo. 17.** Registro de pH**Anexo. 18.** Análisis de DQO en el día 30**Anexo. 19.** Producción de biogás en biodigestores**Anexo. 20.** Área de cocina del camal

**Anexo. 21.** Medición de la concentración de metano



**Anexo. 22.** Peso del volumen de los residuos semisólidos de la mezcla.



**Anexo 23.** Cálculo de los volúmenes de los diferentes materiales de la mezcla en los biodigestores (rumen, estiércol bovino y porcino, y aserrín)

75% del volumen de botellón (20L)	Tratamiento (%rumen)	Vol de rumen (15L*% de tratamiento)	Vol estiércol porcino (15L*0,15)	Vol estiércol bovino (15L*0,15)	Vol de Aserrín	Total sólido	Total Agua	Total de mezcla (Total sólido + Total agua)
15	20	3,0	2,25	2,25	0,5	8,0	7,0	15
15	30	4,5	2,25	2,25	0,5	9,5	5,5	15
15	40	6,0	2,25	2,25	0,5	11,0	4,0	15

**Anexo 24.** Concentración de metano en los diferentes tratamientos durante los días 14, 20, 25 y 30

Día de control	T1				Prom	T2				Prom	T3				Prom
	R1	R2	R3	Prom		R1	R2	R3	Prom		R1	R2	R3	Prom	
14	22,46	23,67	24,76	23,63	26,34	25,78	27	26,25	23	28	27	25,69			
20	43,89	44,53	44,07	44,16	36,67	35,87	34	35,67	39	40	40	39,85			
25	45,67	47,32	46,89	46,62	34,65	36,89	34	35,16	34	35	33	33,95			
30	49,78	48,63	50,05	49,48	39,76	38,58	39	39,19	43	41	40	41,36			