



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS
POR EL ESTIÉRCOL DE GANADO EN UNA FINCA UBICADA EN EL MUNICIPIO DE IPALA,
DEPARTAMENTO DE CHIQUIMULA**

Inga. Karen Michelle Martínez Figueroa

Asesorado por el M.A. Ing. José Antonio Rosal Chicas

Guatemala, noviembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS
POR EL ESTIÉRCOL DE GANADO EN UNA FINCA UBICADA EN EL MUNICIPIO DE IPALA,
DEPARTAMENTO DE CHIQUIMULA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

INGA. KAREN MICHELLE MARTÍNEZ FIGUEROA
ASESORADO POR EL M.A. ING. JOSÉ ANTONIO ROSAL CHICAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRA EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

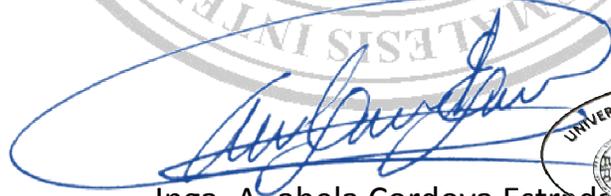
TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

DTG. 448.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS POR EL ESTIÉRCOL DE GANADO EN UNA FINCA UBICADA EN EL MUNICIPIO DE IPALA, DEPARTAMENTO DE CHIQUIMULA,** presentado por la Ingeniera **Karen Michelle Martínez Figueroa,** estudiante de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, noviembre de 2020.

AACE/asga



Guatemala, Noviembre de 2020

EEPM-1551-2020

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS POR EL ESTIÉRCOL DE GANADO EN UNA FINCA UBICADA EN EL MUNICIPIO DE IPALA, DEPARTAMENTO DE CHIQUIMULA”** presentado por el Ingeniero **Karen Michelle Martínez Figueroa** identifica con Carné **200840136** correspondiente al programa de **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala





Guatemala, Noviembre de 2020

EPPFI-1550-2020

Como Coordinador de la **Maestría en Artes Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS POR EL ESTIÉRCOL DE GANADO EN UNA FINCA UBICADA EN EL MUNICIPIO DE IPALA, DEPARTAMENTO DE CHIQUIMULA”** presentado por la Ingeniera **Karen Michelle Martínez Figueroa** quien se identifica con Carné **200840136**.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, Noviembre de 2020

EEPI-1552-2020

En mi calidad como Asesor de la Ingeniera Karen Michelle Martínez Figueroa quien se identifica con Carné **200840136** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS POR EL ESTIÉRCOL DE GANADO EN UNA FINCA UBICADA EN EL MUNICIPIO DE IPALA, DEPARTAMENTO DE CHIQUIMULA”** quien se encuentra en el programa de **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


M.A. José Antonio Rosal Chicas
Asesor

JOSÉ ANTONIO ROSAL
INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL
MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE
COLEGIADO No. 1837

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS
POR EL ESTIÉRCOL DE GANADO EN UNA FINCA UBICADA EN EL MUNICIPIO DE IPALA,
DEPARTAMENTO DE CHIQUIMULA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería, con fecha 18 de julio de 2019.


Inga. Karen Michelle Martínez Figueroa

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la única fuente de sabiduría infinita, gracia, amor y fortaleza, lo cual me permitió culminar esta meta.
- Mis padres** Marvin Danilo Martínez Aguirre (q. e. p. d.), Flor de María Figueroa García y Mynor Abel Flores Folgar. Por su amor y confianza para alcanzar esta meta.
- Mis hermanos** Marvin Estuardo y Scarlet Desireé Flores Figueroa. Por su compañía y apoyo en todo momento.
- Mi cuñada y sobrinos** Katy Hernández, por ser como una hermana para mí y darme la dicha de tener el amor de Diego Martínez y Diana Hernández, a quienes amo con todo mi corazón.
- Mi familia** Tíos y tías, especialmente a Jorge Figueroa y Virginia Figueroa, así como a mis primos por su cariño, apoyo y por haberme brindado un hogar en estos dos últimos años.

Mi amor

Edson Hernández Mazariegos, a quien amo inmensamente y me ha regalado los mejores momentos a su lado, quien ha sido mi mejor amigo y me ha inspirado a ser mejor cada día, por su amor, confianza y el regalo de su compañía.

Familia Hernández Mazariegos

Angélica Mazariegos, don Vicente, Wendy, Nataly, Beatriz y José Raúl Hernández y Emma Catalán. Por el cariño sincero y transparente que me han dado y por ser mi segunda familia.

Mis amigos

A mis amigos y amigas que están lejos, pero la amistad ha perdurado, en especial a Julissa Garza, Rodolfo Sandoval, Evonnie Monroy, Osman Flores, Andrea Casasola, Evelin Sumale, Faviola Recinos, Silvana Nufio, Azucena Rizo, Deysi Mendez y Maris España, quienes han estado en los buenos y malos momentos.

Mis compañeros

A todos mis compañeros que fueron parte de este proceso de formación académica, en especial a mi grupo de trabajo Oliverio Paau, Luis Álvarez, Pablo Arreaga, Geraldo Pineda y Claudia Ramírez.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios que me ha permitido formarme con ética y alto compromiso social.
Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos y apoyo necesario para culminar con la carrera.
Asesor	M. A. Ing. José Antonio Rosal Chicas, por su orientación académica, su paciencia y confianza para culminar con mi proyecto de tesis.
Lic. Abner Mardoqueo	Por su apoyo al compartir sus conocimientos para apoyo en mi carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XV
OBJETIVOS	XVII
HIPÓTESIS	XIX
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN	XXV
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Influencia de las actividades productivas en el cambio climático	1
1.1.1 Digestión anaerobia	3
1.1.1.1 ¿Qué es la digestión anaerobia?	3
1.2 Etapas del proceso de digestión anaerobia	4
1.2.1 Hidrólisis	4
1.2.2 Acidogénesis y acetogénesis	6
1.2.3 Metanogénesis	6
1.3 Parámetros clave del proceso de digestión anaerobia	7
1.3.1 Tipo de materia orgánica	7
1.3.2 Tiempo de retención hidráulico	7
1.3.3 Temperatura	8
1.3.4 Acidez o PH	9
1.3.5 Relación DBO y DQO	9
1.4 Biogás	10

1.4.1	Composición del biogás.....	10
1.4.2	Estimación de biogás	11
1.4.3	Ventajas de su utilización	12
1.4.4	Aprovechamiento energético	14
1.5	Biodigestor	14
1.5.1	¿Qué es un biodigestor?	15
1.5.2	Tipos de biodigestores	15
1.5.3	De cúpula fija.....	15
1.5.4	Biodigestor de cúpula fija o tipo chino.....	16
1.5.5	De cúpula móvil.....	17
1.5.6	Biodigestor tipo Taiwán, tubular o salchicha	18
1.5.7	Sistemas <i>batch</i> o discontinuo	19
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	21
2.1	Implementación de biodigestor para la producción de biogás	21
2.1.1	Selección de material orgánico a utilizar.....	21
2.1.2	Selección de sitio para la implementación del biodigestor.....	23
2.1.3	Implementación del biodigestor	24
2.2	Estimación de biogás producido.....	28
2.3	Uso del biogás como fuente energética.....	35
2.4	Estimación de beneficio ambiental	36
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	39
3.1	Implementación de biodigestor.....	39
3.2	Estimación del volumen de biogás	40
3.3	Uso de biogás como fuente energética	43
3.4	Estimación del beneficio ambiental	46

3.5	Estimación de costos y ahorro por consumo energético a partir de la producción de biogás	48
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	53
	CONCLUSIONES	55
	RECOMENDACIONES	57
	REFERENCIAS	59
	APÉNDICES	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de reacciones en el proceso de la digestión anaerobia	5
2.	Diagrama sobre el uso de biogás	14
3.	Cámara de digestión con cúpula fija.....	16
4.	Diagrama de biodigestor de cúpula móvil.....	17
5.	Diagrama de biodigestor tipo Taiwan, tubular o salchicha	19
6.	Diagrama de biodigestor discontinuo o tipo <i>batch</i>	20
7.	Esquema de implementación de biodigestor	25
8.	Representación esquemática del biodigestor implementado	28
9.	Mapa de temperatura del municipio de Ipala, Chiquimula	31
10.	Mapa de precipitación del municipio de Ipala, Chiquimula.....	32
11.	Estimación del volumen de biogás en función de la temperatura	41
12.	Producción de biogás en función de la cantidad de estiércol diluido	43
13.	Kilogramos de leña sustituidos por producción de biogás	46
14.	Estimación de metros cúbicos de CO ₂ equivalente evitados a la atmósfera	48

TABLAS

I.	Gases presentes en el biogás	11
II.	Clasificación de sustratos para la clasificación anaerobia.	23

III.	Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica	29
IV.	Temperaturas promedio en el municipio de Ipala, Chiquimula	30
V.	Tiempo de retención hidráulico de estiércol de ganado en distintas regiones.....	33
VI.	Datos de DQO y DBO ₅	34
VII.	Emisiones de CO ₂ equivalente evitadas a la atmósfera	37
VIII.	Medidas utilizadas para la implementación del biodigestor	39
IX.	Aspectos técnicos para alimentación del biodigestor	39
X.	Estimación del volumen de biogás en función de la temperatura.....	40
XI.	Estimación de la eficiencia del biogás en función del peso diluido de estiércol	42
XII.	Estimación del uso del biogás como fuente alterna de energía	44
XIII.	Estimación de kilogramos sustituidos por la producción de biogás	45
XIV.	Estimación de toneladas de CO ₂ equivalentes evitadas	47
XV.	Costos de insumos utilizados	49
XVI.	Costos de mano de obra, mantenimiento y transporte	50
XVII.	Estimación de costo/beneficio de la implementación de un biodigestor para la producción de biogás.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
DBO₅	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
CO₂	Dióxido de carbono
GLP	Gas licuado de petróleo
g	Gramo
g/l	Gramo por litro
kg	Kilogramo
kg/l	Kilogramo por litro
kW	Kilovatio
kW h	Kilovatio-hora
MJ	Mega Joule
m³/día	Metros cúbicos por día
mbar	Milibar
PVC	Policloruro de vinilo
C/N	Relación carbono-nitrógeno
SS	Sólidos suspendidos
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
H₂S	Sulfuro de hidrógeno
THR	Tiempo de retención hidráulica

GLOSARIO

Biodigestión anaerobia	Proceso mediante el cual se descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno.
Biodigestor	Contenedor hermético cerrado que sirve como reactor para la degradación de la materia orgánica.
Biogás	Combustible generado a partir de la descomposición de materia orgánica por el efecto de microorganismos en ausencia de oxígeno.
Demanda biológica de oxígeno	Materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión.
Demanda química de oxígeno	Parámetro que pretende medir principalmente la concentración de materia orgánica.
Deyecciones	Acción de expulsar excrementos.
Fermentación entérica	Metano que se genera durante la digestión de los rumiantes y monogástricos.
Materia orgánica	Materia formada por restos de otros organismos.

Purines

Residuos de origen orgánico, como aguas residuales y restos de vegetales, cosechas, semillas, concentraciones de animales muertos, pesca, comida, excrementos sólidos o líquidos, o mezcla de ellos, con capacidad de fermentar o fermentados que tienen impacto medioambiental.

RESUMEN

La investigación realizada tuvo por objetivo evaluar el potencial de producción de biogás a partir de los desechos orgánicos provenientes del estiércol de ganado a través de la implementación de un biodigestor tipo salchicha o Taiwán y su aprovechamiento como recurso energético, así como la estimación del beneficio ambiental representados en toneladas de CO₂ equivalentes evitadas a la atmósfera.

El estudio se desarrolló en una pequeña finca productora de leche artesanal en el municipio de Ipala, Chiquimula, utilizando como materia prima el estiércol de ganado, utilizando un biodigestor de sistema continuo como mecanismo de digestión anaeróbica, ya que aplicado a la realidad del contexto rural se necesitó de la implementación que permite una mayor velocidad de degradación de la materia orgánica proveniente del estiércol de ganado, para lo cual un factor importante para la determinación y funcionamiento del mismo fue la temperatura, la cual debe tener un promedio de 25.5 °C.

Para la construcción del biodigestor se consideró el área de implementación dentro de la finca, ya que la misma debe permitir un adecuado acoplamiento de la bolsa considerando la pedregosidad del terreno, así como la nivelación del mismo, ya que este debe tener 45° de inclinación en sus extremos y un desnivel de 80 centímetros en las paredes de la fosa. Asimismo, la materia orgánica a utilizar como materia prima debe ser fresca y estar diluida en agua, ya que esto impacta en la producción de biogás.

Con base en los resultados del estudio se determinó que la eficiencia de la producción de biogás está en función de la cantidad de materia fecal diluida y su velocidad de degradación de materia orgánica, ya que por cada kilogramo de estiércol se produjo en promedio 1.34 metros cúbicos de gas, lo cual está relacionado con la cantidad de DQO determinada en la muestra de estiércol tomada. Asimismo, cabe mencionar que con el biogás obtenido se sustituyó la leña que la familia utilizaba para la cocción de alimentos, ya que era su fuente energética principal, permitiendo su utilización para los tres tiempos de comida para un total de 5 personas, quienes son los que viven dentro de la finca, donde cada kilogramo de leña sustituido representa 2.37 metros cúbicos de biogás al día.

Respecto al beneficio ambiental con el aprovechamiento del potencial de producción de biogás, se evitaron 0.033 toneladas de CO₂ equivalentes a la atmósfera en promedio, a través del manejo integrado de 44.90 kilogramos de estiércol de ganado al día, lo que representa 2.37 metros cúbicos de biogás producidos.

En relación de costo-beneficio a través de la implementación de dicho biodigestor, la finca invirtió Q. 2,800.00 en materiales y mano de obra, sin embargo, se estimó que la finca está ahorrando Q.700.00 al mes en recursos energéticos utilizados para la producción de leche artesanal.

El estudio realizado demuestra que es factible la implementación de un biodigestor tipo salchicha o Taiwán para el aprovechamiento del biogás como un recurso energético a partir de los desechos orgánicos generados por el estiércol de ganado, el cual se adapta a las condiciones del área rural, permitiendo la sustitución de fuentes energéticas ineficientes por fuentes renovables y contribuyendo con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero

representados en toneladas de CO₂ equivalentes evitadas a la atmósfera, permitiendo también una mayor sostenibilidad de dicha actividad productiva.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los residuos orgánicos generados por el estiércol del ganado se dividen en dos grupos: estiércoles y purines. Los primeros están formados por las deyecciones, sólidas, líquidas y las camas del ganado. Los segundos disponen de una gran cantidad de agua en su composición. En cuanto a producción, se acepta, de forma general, una producción media diaria de deyecciones sólidas y líquidas, equivalente al 7 % del peso vivo del animal, pero también sometida a numerosos factores que inciden en una alteración del valor citado. El potencial contaminante de los residuos ganaderos viene determinado por los parámetros: materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y metales pesados, particularmente cobre. La mala disposición de estos desechos orgánicos producto de la actividad ganadera ha repercutido negativamente en el ambiente, principalmente en la emisión de gases de efecto invernadero como el metano y la poca sanidad en el entorno a esta actividad, principalmente en las fincas que carecen de estándares de gestión de calidad y su actividad la realizan de forma artesanal.

La intensificación de la actividad ganadera, principalmente en la región oriental del país, ha traído consigo un problema de excretas y de contaminación ambiental, debido a los grandes volúmenes de desechos orgánicos producidos por el estiércol de vaca, lo cual produce alteraciones significativas al ambiente e impacta negativamente la salud humana y animal, ya que que potencialmente son portadores de poblaciones microbianas que constituyen un riesgo.

El tratamiento de los desechos orgánicos producidos por el estiércol de vaca cada día se reviste de más importancia dada la dimensión del problema que

representa, no solo por el aumento de los volúmenes producidos como se mencionó anteriormente, lo cual genera a su vez una mayor intensificación de las producciones, sino también la aparición de nuevos productos y principalmente por enfermedades que afectan la salud humana y animal que tienen directa relación con el manejo inadecuado de los desechos orgánicos.

Actualmente muchas fincas ganaderas no cuentan con la tecnificación necesaria para tratar de manera eficiente estos desechos derivados de su actividad productiva, así como la falta de estudios técnicos que determinen la capacidad de dichas fincas para generar biogás a partir de las excretas vacunas que permitan el aprovechamiento de este recurso como una alternativa energética renovable.

A raíz de esta propuesta surge la siguiente pregunta principal:

- ¿Cómo producir biogás a partir de los desechos orgánicos provenientes del estiércol de ganado?

Y se complementa con las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Qué tipo de biodigestor se utilizará para la producción de biogás?
- ¿Cuánto biogás se podrá producir a partir de los desechos orgánicos provenientes del estiércol de ganado?
- ¿Qué uso se le dará al biogás en términos energéticos?
- ¿Cuál será el beneficio ambiental?

OBJETIVOS

General

Evaluar el potencial de producción de biogás a partir de los desechos orgánicos provenientes del estiércol de ganado.

Específicos

- Implementar un biodigestor como alternativa para el manejo integrado de los desechos orgánicos provenientes del estiércol de ganado.
- Estimar el volumen de biogás producido a partir de los desechos orgánicos provenientes del estiércol de ganado.
- Evaluar las diferentes alternativas de uso del biogás como fuente de energía.
- Estimar el beneficio ambiental del manejo integrado de los desechos orgánicos a partir de la producción de biogás.

HIPÓTESIS

El estudio es de tipo cuantitativo-descriptivo, por lo tanto, no se planteará hipótesis de investigación.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

El estudio realizado es de tipo cuantitativo-descriptivo, se evaluó el potencial de producción de biogás a partir de los desechos orgánicos de ganado integrándose dentro del área de Gestión Ambiental, específicamente dentro de la línea de investigación de Gestión y Tratamiento de los residuos.

Actualmente la inadecuada disposición y poca tecnificación para tratar los desechos orgánicos producto de la actividad ganadera ha repercutido negativamente en el ambiente, principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero, afectando al entorno y creando focos de contaminación para las poblaciones cercanas a las fincas dedicadas a dicha actividad pecuaria, principalmente en fincas que carecen de estándares de gestión de calidad y su actividad la realizan de forma artesanal.

Por lo que la digestión anaerobia se consideró como una alternativa de aprovechamiento del potencial energético del estiércol bovino reduciendo el impacto ambiental generado a través de un proceso no contaminante y de bajo costo, reduciendo la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero liberadas a la atmósfera.

Se seleccionó una pequeña finca dedicada a la producción de leche artesanal, ubicada en el municipio de Ipala, Chiquimula, debido a que dicha finca carece de estándares de calidad para el manejo integrado de sus desechos orgánicos, donde se implementó un biodigestor de tipo salchicha.

Se inició con la construcción del biodigestor con el zanjeo del área donde se colocaría, siendo las medidas de 7 metros de largo, 1 metro de ancho y 1 metro de profundidad, con una reducción a 80 centímetros y la construcción del área de entrada y salida del estiércol, con una inclinación de 45° para el ingreso y salida del material.

Posteriormente se procedió con el ensamblaje del fermentador o bolsa de almacenamiento, que es el principal componente del biodigestor, donde se utilizó plástico tubular de 72 pulgadas. De igual manera se insertó el tubo de afluyente con un diámetro de 4 a 6 pulgadas, el cual mantiene un flujo constante. Se utilizó un tubo de 2 pulgadas de diámetro para transportar el biogás, drenando así la humedad condensada.

Se instaló un dispositivo de seguridad utilizado para prevenir la ruptura del fermentador debido a presiones altas de la digestión anaerobia de los desechos, utilizando una botella de al menos 10 cm de profundidad, insertada en el tubo de salida, actuando inmediatamente cuando la presión del digestor es mayor a la del agua, se libera el biogás y elimina las toxinas.

Se estimó a través de instrumentos estadísticos simples la cantidad de biogás generado, conforme a la cantidad de volumen de estiércol diluido en relación a la cantidad de metano producido en un lapso de 40 días, considerando las variables de temperatura, pH y tiempo de retención.

Una vez obtenido el biogás, se eliminaron las toxinas a través de un filtro de sulfuro de hidrógeno, y se utilizó como fuente energética para la cocción de alimentos y como sustituto del gas licuado de petróleo (GLP), siendo una alternativa de las fuentes energéticas convencionales.

Por último, se estimó por medio de una herramienta diseñada en Excel llamada Coolfarmertool, la cantidad de CO₂ equivalente evitada a la atmósfera, por el manejo integrado de los desechos orgánicos de ganado y su aprovechamiento como un recurso energético. Por lo que con los resultados obtenidos se pudo evaluar el potencial del biogás como un recurso energético, beneficio ambiental alcanzado a partir del manejo integrado de los desechos orgánicos provenientes del estiércol de ganado y su relación beneficio-costo para una pequeña finca dedicada a la producción de leche artesanal y su inmersión dentro de la economía sostenible.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala la actividad ganadera sigue incrementándose, así como el impacto que esta tiene sobre el medio ambiente, principalmente por la inadecuada disposición de los desechos orgánicos provenientes del estiércol de ganado, lo cual genera grandes volúmenes de desechos, asimismo la falta de tecnificación para el tratamiento de estos desechos provoca que se emitan grandes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera. A pesar de que la implementación de biodigestores como una alternativa para atender esta problemática se ha expandido y desarrollado en los últimos años, en Guatemala aún existen áreas donde su utilización puede ser viable pero aún no se aplica, tal como es el caso de la ganadería en el área rural.

La implementación de un biodigestor continuo tipo salchicha o Taiwán permitió realizar un manejo integrado de los residuos orgánicos provenientes del estiércol de ganado, el cual es una alternativa de inserción práctica tanto económica como funcionalmente satisfactoria para el tratamiento de desechos orgánicos, específicamente desechos generados por el estiércol de vaca, permitiendo que las fincas ganaderas del país, concretamente la finca ubicada en el municipio de Ipala, Chiquimula, reduzca su contaminación ambiental por emisiones de gases, lo cual permitirá que sus procesos se desarrollen bajo un enfoque de producción limpia y de sostenibilidad.

El estudio realizado permitió un manejo integrado de los desechos orgánicos provenientes del estiércol de ganado y la utilización de biogás como un recurso energético, fomentando la utilización de recursos energéticos

renovables, permitiendo mantener un equilibrio entre el medio ambiente y las actividades productivas, que garanticen la sostenibilidad de la industria ganadera.

El método aplicado fue de tipo cuantitativo-descriptivo, donde se evaluó el potencial de producción de biogás a partir de los desechos orgánicos de ganado, para lo cual se seleccionó una pequeña finca dedicada a la producción de leche en forma artesanal. El proyecto se desarrolló en 7 fases iniciando desde la revisión bibliográfica, construcción e implementación de biodigestor, estimación del biogás producido y su utilización como recurso energético y la estimación del beneficio ambiental de la medida implementada.

En el capítulo 1 se realizó una revisión bibliográfica sobre los diferentes biodigestores que existen y son utilizados para realizar de procesos de digestión anaeróbica, conceptos de degradación de materia orgánica, producción de biogás y su utilización como recurso energético y los beneficios ambientales del aprovechamiento del estiércol de ganado como recurso energético. En el capítulo 2 se detalla el proceso de selección de materia a utilizar, así como la construcción e implementación del biodigestor tipo salchicha o Taiwán.

En el capítulo 3 se estimó el potencial de biogás producido a partir del análisis de los factores que contribuyeron a la producción de biogás tales como temperatura, presión, cantidad de materia orgánica degradada, tiempo de retención hidráulico, demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno, entre otros que limitan o favorecen la producción del mismo. Seguidamente en el capítulo 4 se detallan los criterios de selección del biogás como fuente energética dentro de la finca donde se desarrolló la investigación. En el capítulo 5 se describe el proceso de estimación del beneficio ambiental de la implementación del biodigestor para el manejo integrado de los desechos orgánicos del estiércol de ganado. Por último, en el capítulo 6 se presentan los

resultados obtenidos de la investigación y en el capítulo 7 se discute sobre los resultados de los mismos.

Se concluyó que la implementación de un biodigestor tipo salchicha o Taiwán se adapta idóneamente a las áreas rurales, permitiendo un manejo integrado de los desechos orgánicos que proceden del estiércol de ganado, lo cual permite a su vez el aprovechamiento del biogás como un recurso energético, contribuyendo así con la mitigación y reducción de las emisiones de gases representadas en toneladas de CO₂ equivalentes evitadas a la atmósfera derivadas de dicha actividad pecuaria.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Influencia de las actividades productivas en el cambio climático

La actividad productiva agropecuaria, incluyendo la ganadería, representa una pequeña proporción de la economía mundial generando menos del 2 % del PIB mundial, sin embargo, genera más del 14 % del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Según datos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2.600 millones de personas dependían económicamente del sector agropecuario (CEPAL, 2015).

Según datos reportados por FAO en 2013 las emisiones estimadas de dióxido de carbono a nivel mundial representan el 14.5 % de emisiones de GEI (7.1 giga toneladas de CO₂= por actividades productivas antropogénicas). Este dato nos indica que el sector productivo ganadero es unas de las principales fuentes de emisiones de GEI, lo cual repercute directamente en el cambio climático (Gerber, Steinfeld, Henderson, Mottet, Opio, Dijkman, Falcucci y Tempio, 2013).

Otros datos importantes respecto al uso de los recursos naturales son: se estima que el 30 % de la superficie del suelo a nivel mundial es utilizada para esta actividad, lo que representa el 80 % del total de la superficie agrícola (FAO, 2009). Respecto al recurso hídrico el 8 % del total de agua dulce del planeta es utilizada en la actividad ganadera, principalmente para la irrigación del forraje, utilizado para la alimentación del ganado. Adicional al consumo un problema importante producto de la ganadería es la contaminación hídrica subterránea por

la liberación de algunos nutrientes de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes, patógenos y otras sustancias contenidos en el estiércol del ganado (FAO, 2009).

Pareciera que los datos antes mencionados exoneran a la actividad ganadera de sufrir las consecuencias del cambio climático, pero las proyecciones a futuro de la disponibilidad de los recursos naturales evidencia que todo ser vivo será afectado directa o indirectamente, un ejemplo claro es que la disponibilidad de agua será seriamente afectada por el incremento de las temperaturas y la reducción de las fuentes de almacenamiento subterráneas del recurso hídrico (FAO, 2009).

La ganadería contribuye directamente al cambio climático a través de la liberación de metano y óxido nitroso por la fermentación entérica, así como el cambio de uso de la tierra que provoca la deforestación para el establecimiento de zonas para el cultivo de nuevos pastos liberando dióxido de carbono por el aprovechamiento de la biomasa contenida en los árboles. Como se mencionó anteriormente, a nivel mundial la actividad ganadera representa el 14 % del total de emisiones de GEI (FAO, 2009).

Guatemala es uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático, ya que destina poco presupuesto para la adopción de medidas de mitigación en el sector agropecuario, lo cual se ve evidenciado en la falta de reacción ante los eventos climáticos extremos como los fuertes huracanes y canículas prolongadas que afectan fuertemente los niveles de producción en esta industria y a la economía del país, que depende en mayor medida de este sector. Durante el periodo de 2000 a 2013 en América Latina los eventos climáticos provocaron 13,883 pérdidas y más de 52 mil millones de dólares en pérdidas económicas (CEPAL, 2015).

1.1.1 Digestión anaerobia

Dicho proceso se explica a continuación:

1.1.1.1 ¿Qué es la digestión anaerobia?

“La digestión anaerobia es un tratamiento biológico realizado en ausencia de oxígeno, el cual es útil para la recuperación de energía en forma de biogás y la estabilización de la materia orgánica” (Bastidas, 2017, p. 127). Una característica importante de dicho proceso es que puede ser aplicada para el tratamiento de diversos residuos orgánicos como es el caso del estiércol de ganado (Bastidas, 2017).

El biogás producido mediante la degradación y descomposición de materia orgánica está compuesto principalmente por gases como el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), el cual puede ser utilizado a través de diferentes tecnologías para la conversión en energía eléctrica, en motores de combustión, en lámparas de iluminación o en quemadores y calderas. Asimismo, la materia orgánica obtenida mediante la digestión anaerobia puede convertirse en un material rico en nutrientes y con una carga de patógenos reducidos, el cual se emplea normalmente para la recuperación de los suelos o producción de compost (Bastidas, 2017).

Podemos considerar la digestión anaerobia como una alternativa promisoría para mitigar las emisiones de los GEI del estiércol de ganado siendo una tecnología que permite obtener energía renovable afrontando la problemática alrededor de la generación de residuos (Bastidas, 2017).

1.2 Etapas del proceso de digestión anaerobia

Según Aguilera (2017):

El aprovechamiento de los procesos naturales de producción de biogás, a través del desarrollo de tecnologías prácticas, han permitido desarrollar un método probado para la conversión de materia orgánica compleja mediante digestión anaerobia con fines de obtener un gas con un alto poder calorífico. (p. 81)

1.2.1 Hidrólisis

Según Aguilera (2017):

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas que son hidrolizadas, mediante reacciones de oxidación-reducción, por enzimas extracelulares producidos por los organismos fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles, que serán metabolizados por las bacterias anaerobias en el interior de las células.

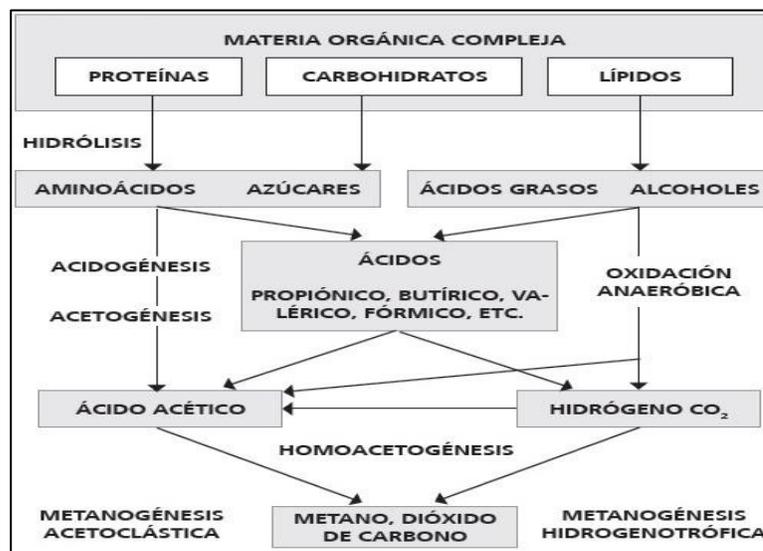
Los compuestos solubles, básicamente diferentes tipos de oligosacáridos y azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos, son fermentados por los microorganismos ácido génicos que producen principalmente, ácidos grasos de cadena corta, dióxido de carbono e hidrógeno.

La formación de metabolitos ácidos en esta fase produciría un pequeño descenso del pH del medio (hasta valores de 5,5

aproximadamente) si no existiesen, en la etapa siguiente, otros microorganismos capaces de consumir estos ácidos.

La hidrólisis depende fundamentalmente de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partícula, del pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis. (pp. 60-81).

Figura 1. **Esquema de reacciones en el proceso de la digestión anaerobia**



Fuente: Aguilera, E. (2017). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos*. Consulta: febrero 2019. Recuperado de <https://www.camjol.info/index.php/FAREM/article/view/5552/5248>

En la figura 1 se muestran los números indicando la población bacteriana responsable del proceso: 1. Bacterias fermentativas; 2. Bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno; 3. Bacterias homoacetogénicas; 4. Bacterias metanogénicas hidrogenotróficas, y 5. Bacterias metanogénicas acetoclásticas.

1.2.2 Acidogénesis y acetogénesis

Esta es la etapa donde ocurre la degradación y el material orgánico es fermentado por varios organismos, formando así compuestos que pueden ser utilizados primeramente por los microorganismos metanógenos (acético, fórmico, H₂), y compuestos orgánicos más reducidos (láctico, etanol, propiónico, butírico) que propiamente deben ser oxidados por las bacterias acetogénicas a pequeños sustratos, que le sean factibles de utilizar a las bacterias metanógenas (Gerardi, 2003). Solo el ácido acético formado da lugar al 70 % del metano formado (Aguilera, 2017).

1.2.3 Metanogénesis

De acuerdo con Aguilera (2017):

La metanogénesis es el último paso del proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica. En esta etapa los microorganismos metanogénicos son los responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H₂, CO₂, formiato, metanol, y algunas metilaminas. La mayoría de los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H₂ como aceptor de electrones, mientras que dos géneros son capaces de utilizar el acetato. (p. 81)

“A pesar de ello, en ciertos ambientes anaerobios, este es el principal precursor del metano, considerándose que alrededor del 70 % del metano producido en los reactores anaerobios se forma a partir de acetato” (Chynoweth

y Isaacson, 1987, p. 113), “mientras que el restante 30 % proviene del CO₂ y H₂” (Aguilera, 2017, p. 81).

1.3 Parámetros clave del proceso de digestión anaerobia

Son los siguientes:

1.3.1 Tipo de materia orgánica

Según Aguilera (2017):

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostado) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina. En lo atinente a estiércoles animales la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos. (p. 81)

1.3.2 Tiempo de retención hidráulico

Es el periodo de permanencia del sustrato con actividad de microorganismos que permiten el desarrollo degradativo de la materia orgánica

dependiendo de la tasa de crecimiento bacteriana y la temperatura del proceso (Bastidas, 2017).

1.3.3 Temperatura

Aguilera (2017) señala:

En el desarrollo de cualquier proceso bioquímico, la temperatura es uno de los parámetros ambientales más importantes ya que mejora o inhibe a grupos microbianos específicos, esto debido a que las actividades implican reacciones enzimáticas, donde las enzimas son complejos moleculares sensibles a la temperatura.

Otra razón son los diferentes tiempos de activación de los grupos bacterianos durante el curso de la digestión, ya que cada uno de estos grupos, tiene una temperatura óptima en donde se puede estabilizar su tasa de crecimiento celular máximo.

La biodigestión anaerobia puede ocurrir en un amplio rango de temperaturas que van desde los 5 °C hasta los 60 °C. Las bacterias metanogénicas son más sensibles a la temperatura que los demás microorganismos de un biodigestor, debido a que su velocidad de crecimiento es más lenta.

El proceso de digestión anaerobio no se ve afectado si la temperatura aumenta en unos pocos grados; sin embargo, un decrecimiento podría retardar la producción de metano, sin perjudicar la actividad de las bacterias acidificantes, lo cual permite una excesiva acumulación de ácidos y una posible falla en el biodigestor. (pp. 69-73)

En este sentido, se debe procurar mantener un microclima cálido en el biodigestor para conservar una tasa de producción de biogás alta (Bidlingmaier, 2006) (Osorio, Ciro y González, 2007).

1.3.4 Acidez o PH

El pH afecta directamente la actividad enzimática de los microorganismos mediante cambios de estado de los iones de las enzimas como el carboxil y amino; alteración que se presenta en los componentes no ionizables del sistema, como por ejemplo la desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas. (Aguilera, 2017, p. 81)

Según Bastidas (2017):

El pH es un parámetro muy importante durante la digestión anaerobia ya que no solo afecta la actividad microbiana, sino que también determina las vías metabólicas, donde su importancia se debe a que las bacterias anaerobias necesitan diferentes intervalos de pH para su crecimiento.

Las bacterias fermentativas, por ejemplo, se adaptan a pH entre 4.0-8.5; las metanogénicas son más estrictas, y el rango favorable está entre 6.5 a 7.2, sin embargo, algunos autores recomiendan que el proceso de desarrolle a un pH de 7.4. (p. 81)

1.3.5 Relación DBO y DQO

De acuerdo con Aguilera (2017), habitualmente se utiliza la relación DBO/DQO para estimar la biodegradabilidad de un agua residual. La determinación

de la DBO y la DQO permite establecer la relación existente de contaminantes y, según el resultado, conocer la posibilidad o no de efectuar algún tratamiento para las aguas residuales. La diferencia más notable es que la DBO representa la cantidad de materia orgánica biodegradable, mientras que la DQO representa ambas, tanto la materia biodegradable como la no biodegradable.

1.4 Biogás

“El biogás es el producto de la digestión anaerobia, el cual está conformado por un (55 %-65 %) de gas metano (CH_4)”. (Otlica, 2012, p. 88)

1.4.1 Composición del biogás

El biogás lo constituyen una mezcla de gases y su composición depende del tipo de residuo orgánico utilizado para su producción. Para el presente estudio el residuo a utilizar es el estiércol de ganado. El valor energético del biogás está determinado por la concentración del metano y de las condiciones en que se procesa. (UNAM, s/f, p. 20)

En la tabla I, en la siguiente página, se muestra la composición de biogás:

Tabla I. **Gases presentes en el biogás**

Componente	% en volumen
Metano (CH ₄)	45- 55
Bióxido de carbono (CO ₂)	40-50
Nitrógeno (N ₂)	3-3
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	1-2
Hidrógeno (H ₂)	Menos de 1
Oxígeno (O ₂)	Menos de 1
Monóxido de carbono (CO)	Traza
Amoníaco (NH ₃)	Traza
Hidrocarburos aromáticos	Traza
Compuestos orgánicos volátiles	Traza

Fuente: UNAM. *Biodigestor alternativa energética*. Consulta: febrero 2019. Recuperado de https://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria20/feria254_01_biodigestor_alternativa_energetica.pdf

1.4.2 Estimación de biogás

Se estimará la producción de biogás a partir de los residuos orgánicos generados a partir del estiércol de ganado. Uno de los parámetros que permite evaluar la generación de metano a partir del proceso de fermentación de la materia orgánica es la productividad de metano o productividad metanoica. Este parámetro se define como la cantidad de metano generado en la unidad de tiempo respecto de la materia dispuesta en el reactor. (UNAM, s.f., p. 20)

UNAM (s.f.) define la expresión matemática que permite calcular la productividad de metano de un determinado resto orgánico en un tiempo determinado. Es la siguiente:

$$PCH_4 = VCH_4 / V_{Reactor} * t$$

Donde:

- “V CH₄ es el volumen de metano generado.
- Vreactor es el volumen de materia dispuesta en el recinto fermentador.
- t es el tiempo considerado” (UNAM, s.f., p. 20).

Asimismo, UNAM (s.f.) define la “producción de metano, tiene un límite y este depende fundamentalmente de la naturaleza de la materia dispuesta en el sistema digesor” (p. 20). La fórmula que permite estimar la máxima generación de metano para un producto determinado es la siguiente:

- “MMax= VCH₄/ S org. total.
- V CH₄ es el volumen de metano generado.
- S org total es la cantidad de materia orgánica total utilizado en todo el proceso” (UNAM, s.f., p. 20).

“La máxima generación de metano en el prototipo de biodigestor a implementar se estimará a partir de los 40 y 50 días, número de días en los que la biodigestión anaerobia pasa a la última fase” (UNAM, s.f., p. 20).

1.4.3 Ventajas de su utilización

Según Martínez (2013) existen diferentes ventajas al momento de aprovechar el biogás:

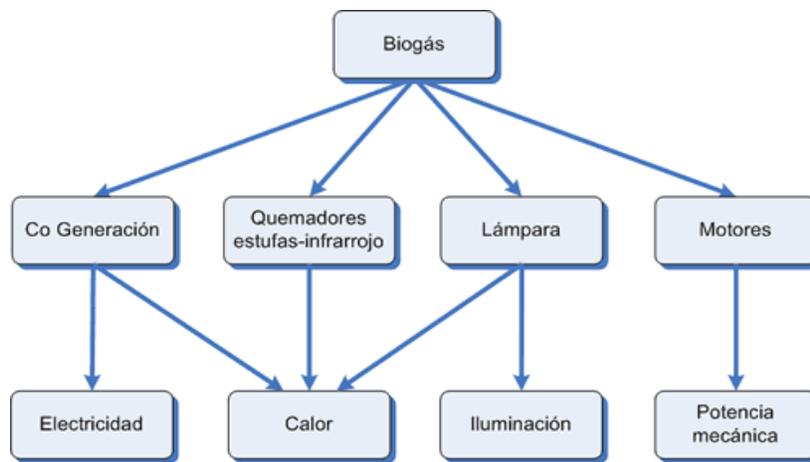
- Su producción es renovable.

- Su proceso de producción primaria y elaboración industrial determina un balance de carbono menos contaminante que los combustibles fósiles.
- Cumple con los requisitos de la EPA (Environmental Protection Agency) para los combustibles alternativos.
- Puede emplearse puro o combinado con los combustibles fósiles en cualquier proporción. No contiene azufre y por tanto no genera emanación de este elemento, las cuales son responsables de las lluvias ácidas.
- Mejor combustión, que reduce el humo visible del arranque en un 30 %. Cualquiera de sus mezclas reduce en proporción equivalente a su contenido las emanaciones de dióxido de carbono y partículas e hidrocarburos aromáticos. Dichas reducciones están en el orden del 15 % para los hidrocarburos, del 18 % para las partículas en suspensión, del 10 % para el óxido de carbono y del 45 % para el dióxido de carbono. Estos indicadores se mejoran notablemente si se adiciona un catalizador.
- Los derrames de este combustible en las aguas de ríos y mares resultan menos contaminantes y letales para la flora y fauna marina que los combustibles fósiles.
- Volcados al ambiente se degradan más rápidamente que los combustibles fósiles.
- Su combustión genera menos elementos nocivos que los combustibles tradicionales reduciendo así las posibilidades de producir cáncer. (pp. 21-24)

1.4.4 Aprovechamiento energético

El biogás como fuente energética puede ser utilizado para la cocción de alimentos como sustituto del gas licuado de petróleo (GLP) empleado para cocinar, o bien ser aprovechado para refrigeración o iluminación como una alternativa de las fuentes energéticas convencionales (UNAM, s.f.). En la siguiente figura se muestra el diagrama para la utilización del biogás.

Figura 2. **Diagrama sobre el uso de biogás**



Fuente: UNAM. (s.f). *Biodigestor alternativa energética*. Consulta: febrero 2019. Recuperado de: https://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria20/feria254_01_biodigestor_alternativa_energetica.pdf

1.5 Biodigestor

Se define a continuación:

1.5.1 ¿Qué es un biodigestor?

Según Aguilera (2017), Valdivia (2000) indica:

Un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor) dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar en determinada dilución de agua para que se descomponga por microorganismos, produciendo por un lado gas metano y por otros fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio. (p. 81)

1.5.2 Tipos de biodigestores

Según Contreras (2006) se establecen diferentes tipos de biodigestores: “de cúpula fija, de cúpula móvil y tipo salchicha. Estos biodigestores tienen la característica principal que son de flujo continuo, lo que permite la entrada y salida constante de fluido. A continuación, se describe cada uno de ellos”. (p. 46)

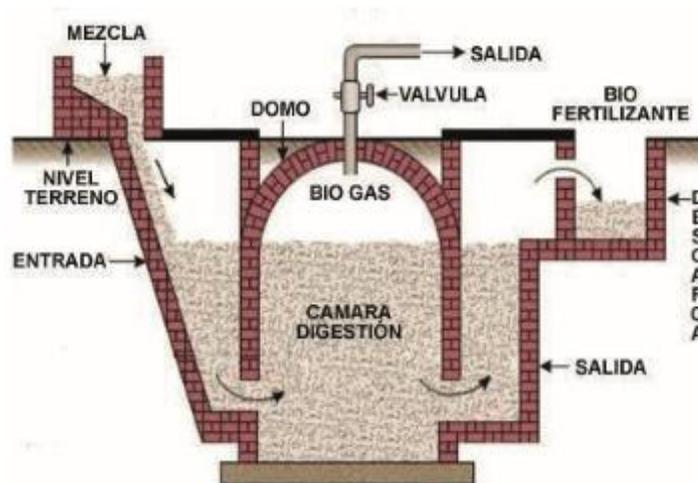
1.5.3 De cúpula fija

Aguilera (2017) indica:

Son aquellos armados en una sola estructura que por regla general es hecha en materiales rígidos (concreto, bloques o ladrillos). Debido a la alta presión que pueden alcanzar en su interior y a la constante variación de la misma, se recomienda su construcción en forma de domo, bajo tierra en suelos estables y firmes, y la impermeabilización de la parte interna de la estructura a fin de evitar el escape de líquido y gases. Estos factores hacen obligatorio el uso de mano de obra altamente calificada para su diseño y construcción. (p. 81)

Tal como se muestra en la figura 3:

Figura 3. **Cámara de digestión con cúpula fija**



Fuente: Aguilera, E. (2017). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos*. Consulta: febrero 2019. Recuperado de: <https://www.camjol.info/index.php/FAREM/article/view/5552/5248>

1.5.4 Biodigestor de cúpula fija o tipo chino

Según Aguilera (2017), Jarauta (2005) señala:

El modelo de cúpula fija tiene como principal característica que trabaja con presión variable; sus principales desventajas son que la presión de gas no es constante y que la cúpula debe ser completamente hermética, ello implica cierta complejidad en la construcción y costos adicionales en impermeabilizantes. Sin embargo, este modelo presenta la ventaja de que los materiales de construcción son fáciles de adquirir a nivel local, así como la inexistencia de partes metálicas que pueden oxidarse y una larga vida útil

si se le da mantenimiento, además de ser una construcción subterránea. (p. 81)

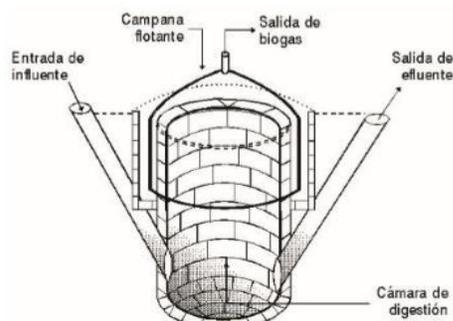
1.5.5 De cúpula móvil

Aguilera (2017) indica que Valdivia (2000) dice:

Los biodigestores de cúpula móvil como un contenedor que contiene dos estructuras: la primera al igual que en los de estructura sólida fija, va enterrada y hecha en concreto, bloque o ladrillo; la segunda en la mayoría de los casos es una campana metálica que flota sobre la primera estructura. (p. 81)

Como se muestra en la figura 4:

Figura 4. Diagrama de biodigestor de cúpula móvil



Fuente: Aguilera, E. (2017). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos*. Consulta: febrero 2019. Recuperado de: <https://www.camjol.info/index.php/FAREM/article/view/5552/5248>

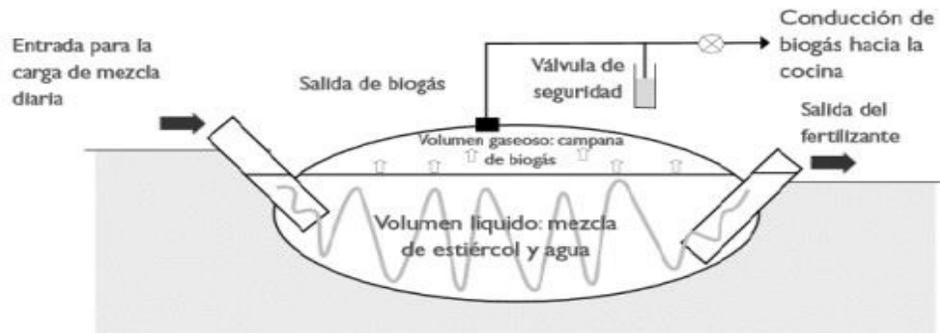
1.5.6 Biodigestor tipo Taiwán, tubular o salchicha

En términos generales, este tipo de biodigestor consiste en una estructura hecha de una membrana impermeable a los gases y líquidos (*nylon*, caucho, PVC, polietileno), que es depositado en forma horizontal en una fosa excavada en el suelo (Montenegro, 2018).

En este digestor el gas se acumula en la parte superior de la bolsa, parcialmente llena con biomasa o residuos orgánicos en fermentación, donde la bolsa se va inflando lentamente con una presión de operación baja, pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma. Aunque este modelo trabaja a presiones bastantes bajas, no funciona con residuos orgánicos fibrosos, la duración del cilindro es de unos cinco a 10 años (aunque de fácil reemplazo) (Montenegro, 2018). En la figura 5 se muestra el esquema de un biodigestor tipo Taiwan, tubular o salchicha.

Tal como se muestra en la siguiente página:

Figura 5. Diagrama de biodigestor tipo Taiwan, tubular o salchicha



Fuente: Montenegro, P. (2018). *Propuesta de la implementación de un biodigestor tipo geomembrana pvc mediante la evaluación de un reactor piloto anaerobio para la producción de biogás a partir de estiércol vacuno, residuos de cocinas industriales y aguas residuales provenientes de sanitarios y mingitorios en ingenio Santa Ana*. Consulta: marzo 2019.

Recuperado de:

<http://www.repositorio.usac.edu.gt/8785/1/Paulina%20Mar%C3%ADa%20Castillo%20Montenegro.pdf>

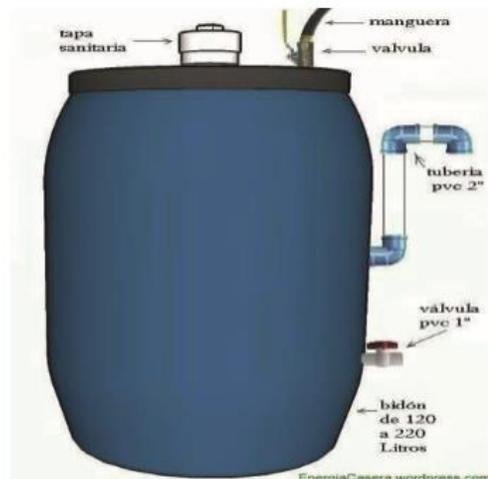
1.5.7 Sistemas *batch* o discontinuo

Aguilera (2017) define estos sistemas como:

Procesos anaeróbicos que se encargan completamente de una sola vez y son vaciadas por completo después de un tiempo de retención fijado. Dentro de esta categoría la más conocida es la planta Olade Guatemala. El modelo tipo Batch es apropiado para cargar todo tipo de materiales de fermentación, debido a que el tiempo de retención con el que se trabaja es largo. (p. 81)

En la figura 6 se muestra el esquema de un biodigestor discontinuo o tipo *batch*.

Figura 6. Diagrama de biodigestor discontinuo o tipo *batch*



Fuente: Aguilera, E. (2017). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos*. Consulta: marzo 2019. Recuperado de:
<https://www.camjol.info/index.php/FAREM/article/view/5552/5248>

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Implementación de biodigestor para la producción de biogás

Se explica a continuación:

2.1.1 Selección de material orgánico a utilizar

Existen diferentes formas de aprovechar la materia orgánica, una de las alternativas es el proceso de fermentación metanogénica. Dicha materia orgánica puede tener su origen en diferentes residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico u otros.

En la selección del material orgánico para la producción de biogás se consideró las características bioquímicas del material, ya que la actividad microbiana dependerá de dichas características, principalmente de la relación carbono-nitrógeno. De acuerdo con la investigación bibliográfica realizada, las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un postratamiento aeróbico.

Con base en la revisión bibliográfica, se determinó que los estiércoles son una opción viable para materia prima dentro del proceso de digestión anaeróbica, por lo que se seleccionó el tipo de estiércol a utilizar, ya que, en el caso de los estiércoles de animales, la degradación de cada uno de ellos depende fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido.

Para seleccionar el tipo de estiércol a utilizar se consideró en función de su apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y características cuantitativas, como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO). En función a estos parámetros hay cuatro sustratos:

- Sustratos de clase 1: los cuales pueden degradarse eficientemente en digestores tipo *batch* o por lotes.
- Los sustratos de la clase 2: se degradan de manera eficiente en digestores mezcla completa de operación continua, por presentar una dilución mayor y en consecuencia una DQO menor.
- Sustratos de clase 3: se tratan con digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio.
- En cuanto a los sustratos de clase 4: debido a su alto contenido de DQO deben ser degradados en digestores aerobios intensivos para mayor eficiencia.

La materia prima para alimentar el biodigestor es el estiércol de ganado, ya que este es considerado un sustrato clasificación 2, con base en lo establecido en el manual de producción de biogás de la FAO, los cuales son sustratos que se degradan de eficiente en digestores mezcla completa de operación continua, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla II. **Clasificación de sustratos para la clasificación anaerobia**

Características	Clase	Tipo de sustrato	Características cuantitativas
Sólido	1	Basura doméstica	> 20 % ST 40-70 % Fracción Orgánica
		Estiércol sólido	
		Restos de cosecha	
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces animales	100-150 g/l DQO 5%-10% ST 4%-8% SV
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS)	3	Heces animales de cría y levante diluido con agua de lavado	3-17 g/l DQO 1-2 g/l SS
		Aguas residuales de mataderos	
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias	5-18 g/l DQO
		Aguas negras	4-500 g/l DQO

Fuente: FAO. (2011). *Manual de Biogás*. Consulta: junio 2019. Recuperado de:
<http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Se estimó que una vaca lechera produce el 7 % de su peso vivo en estiércol y orina, por lo que se cuenta con el desecho necesario para la producción de biogás a partir del estiércol de vaca.

2.1.2 Selección de sitio para la implementación del biodigestor

Una vez determinado el material utilizado para el proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás, se seleccionó el sitio para la implementación del biodigestor, la cual fue una pequeña finca ubicada en el municipio de Ipala, Chiquimula, dedicada a la producción de leche artesanal. Se definió como pequeña finca dada su poca cantidad de cabezas de ganado y la nula tecnificación para la realización del proceso de producción de leche, la finca

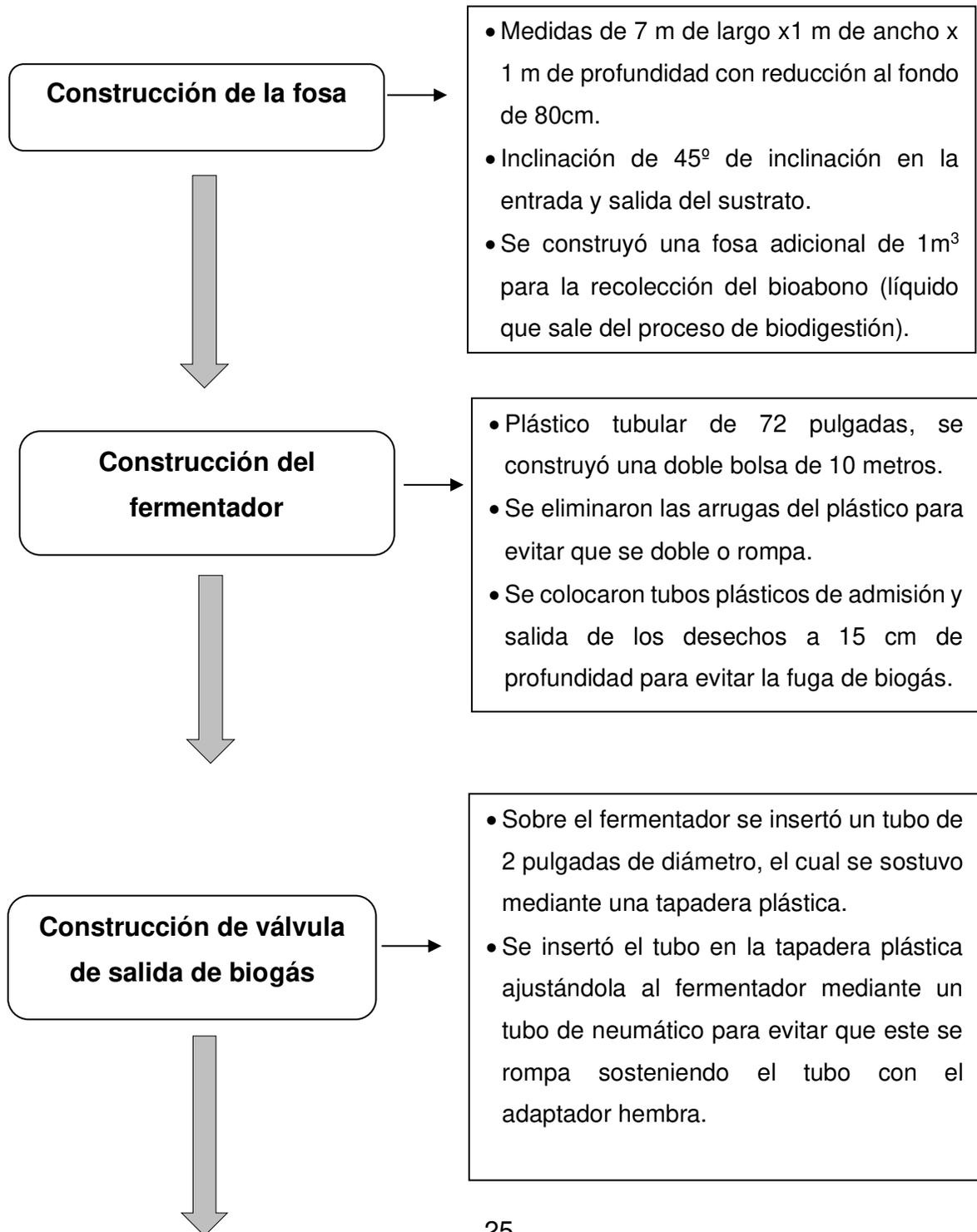
seleccionada desea aprovechar los desechos orgánicos generados por el ganado y producir biogás para utilizarlo como una alternativa energética dentro de la finca y así poder hacer sostenible ambientalmente dicho proceso productivo. La finalidad de haber aprovechado el gas metano generado por los desechos orgánicos provenientes del estiércol de ganado, es que dicha aplicación pueda ser útil en las fincas ganaderas principalmente en zonas rurales donde el nivel de tecnificación es muy bajo y aún no cuentan con el capital suficiente para acceder a una mediana tecnificación.

2.1.3 Implementación del biodigestor

En esta fase llevó a cabo la implementación de un biodigestor tipo Taiwán o salchicha, ya que debido a la materia prima (estiércol de ganado) que seleccionamos, se requirió de uno cuya característica principal sea de flujo continuo permitiendo la entrada y salida constante de fluido.

El tamaño del biodigestor varía de acuerdo a las necesidades que se tengan del biogás y abono orgánico, y además a la cantidad del estiércol disponible. Por esta razón, las medidas de la fosa también varían. Para la implementación del biodigestor de flujo continuo tipo salchicha o Taiwán se desarrollaron las siguientes fases:

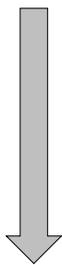
Figura 7. Esquema de implementación de biodigestor



Continuación de la figura 7.

Instalación de válvula de seguridad

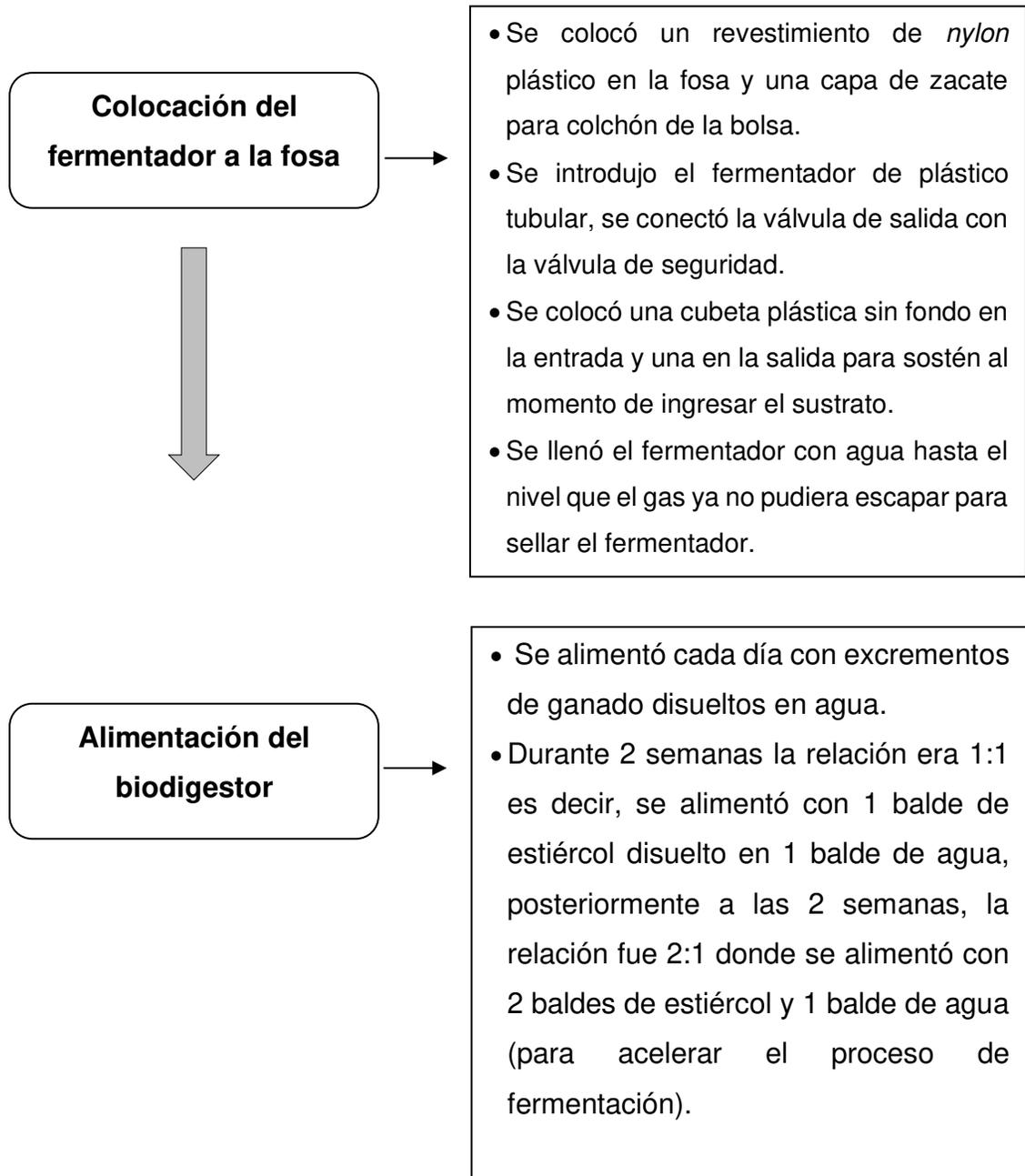
Instalación de válvula de seguridad



- Se introdujo a presión el adaptador macho PVC pegado a otra tapadera plástica con un tubo de neumático en la parte interna del fermentador, para lo cual se insertó el adaptador macho al adaptador hembra y pegando las tapaderas con pegamento especial.

- Previene la ruptura del fermentador por presiones altas. Se utilizó una T de una pulgada en la cual se inserta el niple de PVC de 20 a 25 cm, dentro de la misma se insertó alambriña que ayuda a eliminar los iones de sulfuro de hidrogeno.
- En los extremos de la T se colocan los niples cortos de 8 a 10 cm pegados con pegamento. Se llenó la botella plástica con agua y se procedió a insertar el niple en la lámina de agua que tiene 5 cm de espesor.
- La válvula de seguridad se conecta directamente con la válvula de salida del biogás.

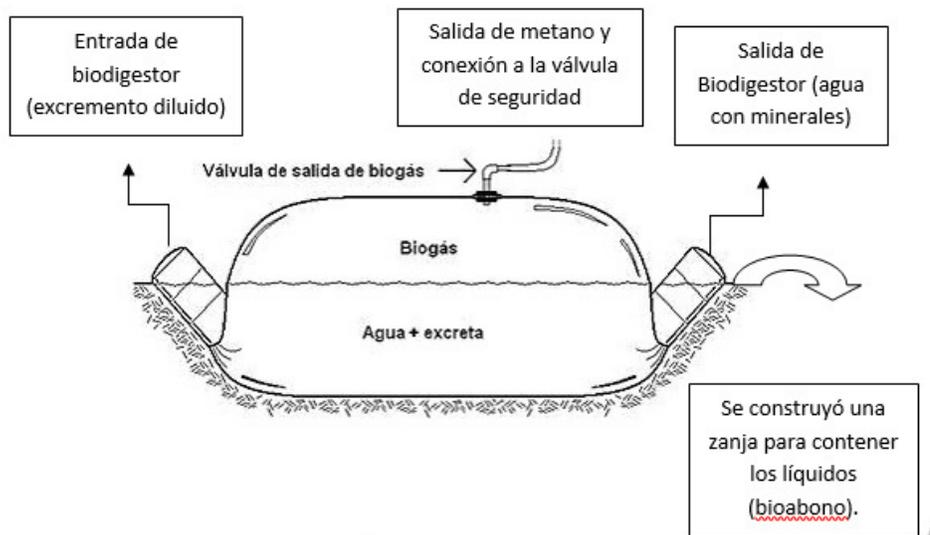
Continuación de la figura 7.



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se ejemplifica el modelo de biodigestor implementado en la finca ganadera ubicada en el municipio de Ipala, Chiquimula:

Figura 8. Representación esquemática del biodigestor implementado



Fuente: elaboración propia.

2.2 Estimación de biogás producido

En esta etapa se analizaron y determinaron los factores que contribuyeron a la producción de biogás a partir del estiércol de ganado. Se investigó el promedio de temperaturas durante un año del municipio donde se implementará el biodigestor ya que, según el manual de producción de biogás de la FAO, existe una regla general de para un óptimo funcionamiento del digestor, se recomienda que el tratamiento anaeróbico se diseñe para que opere con variaciones de temperatura que no excedan los 0.6 – 1.2 °C /día (FAO, 2011).

Con base en el manual se establecieron rangos de temperatura para la operación mínima, óptima y máxima en un biodigestor, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla III. **Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica**

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psycrophilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente: FAO. (2011). *Manual de biogás*. Consulta: julio 2019. Recuperado de:
<http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Con base en datos proporcionados por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), se estimó que el promedio anual de temperatura es 23.5 °C. El promedio de la temperatura mínima es de 18.3 °C y el promedio de la temperatura máxima anual es de 28.7 °C, así que nos basamos en el promedio anual para determinar los rangos de temperatura, los cuales se encuentran dentro del rango de las temperaturas para el tiempo de fermentación.

En la siguiente página se muestra el cuadro de temperaturas promedio en el municipio de Ipala, Chiquimula.

Tabla IV. **Temperaturas promedio en el municipio de Ipala, Chiquimula**

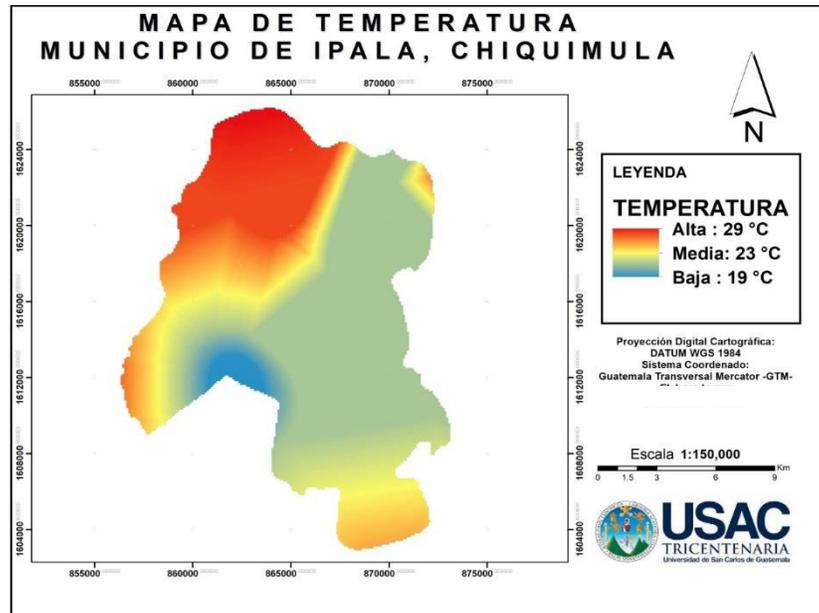
Parámetros climáticos promedio de Ipala													
Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Temp. máx. media (°C)	27.7	28.9	30.7	31.6	30.7	28.6	28.3	28.6	27.9	27.6	27.2	27.1	28.7
Temp. media (°C)	21.9	22.8	24.3	25.4	25.1	23.9	23.9	23.9	23.4	23.1	22.3	21.8	23.5
Temp. mín. media (°C)	16.2	16.8	18.0	19.3	19.6	19.3	19.5	19.2	19.0	18.6	17.5	16.6	18.3
<i>Fuente: Climate-Data.org⁵ Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala</i>													

Fuente: INSIVUMEH. (2012). *Clima promedio de Ipala*. Consulta: julio 2019. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com>

La temperatura del proceso actúa también sobre aspectos fisicoquímicos del mismo, tal como la solubilidad de los gases generados desciende al aumentar la temperatura, favoreciéndose la transferencia líquido-gas. Esto supone un efecto positivo para gases tales como NH₃, H₂ y H₂S, dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaeróbicos.

En la figura 9 el mapa que representa la distribución de la temperatura en el municipio de Ipala, Chiquimula tal como se muestra en la siguiente página.

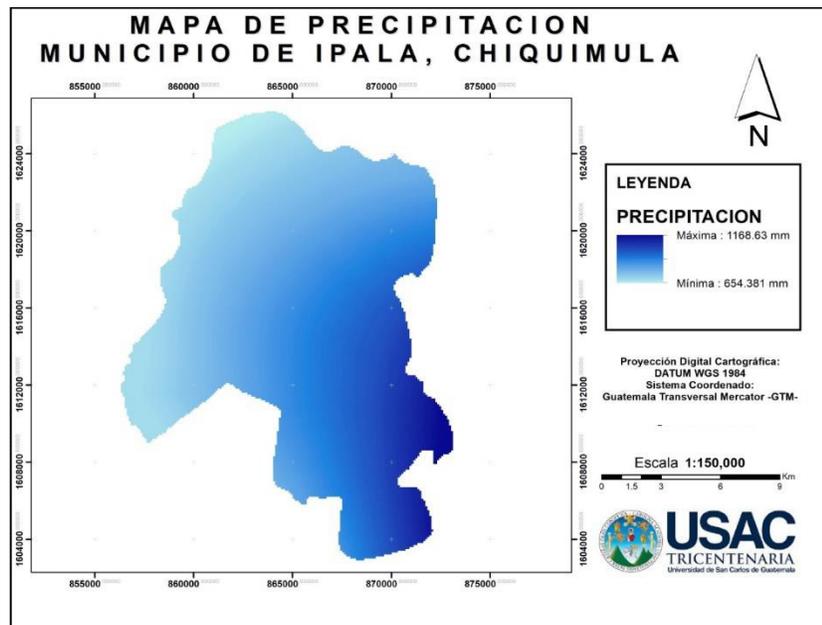
Figura 9. Mapa de temperatura del municipio de Ipala, Chiquimula



Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS.

Asimismo, en la siguiente página en la figura 10 se muestra el mapa de la distribución espacial de la precipitación, ya que estos dos factores climáticos afectan en la velocidad de la degradación de la materia orgánica.

Figura 10. Mapa de precipitación del municipio de Ipala, Chiquimula



Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS.

También se consideró el tiempo de retención hidráulico (THR) y velocidad de carga, el cual designa al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. Con base en lo establecido por la FAO, la mezcla de las heces de animales no debe contener un porcentaje mayor del 10 % de materia seca de la mezcla de agua estiércol.

El biodigestor implementado trabaja con un tiempo de retención de 40 días, de acuerdo a la FAO los digestores que trabajan con tiempos de retención entre 20 y 55 días deben contar con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digestor. Por tal razón, para alimentar el biodigestor, se consideró durante las primeras dos semanas (15 días) diluir una caneca de estiércol fresco de ganado en una caneca de agua diariamente hasta concluir los

15 días. Posterior a este periodo se inició con dos canecas de estiércol en una caneca de agua, para incrementar la producción de biogás hasta concluir los 40 días para iniciar el proceso de producción de biogás, sabiendo que el tiempo de retención hidráulico varía con la temperatura media de cada región y con la variación diaria estacional, para tal determinación se utilizó de base el tiempo de retención hidráulico para el estiércol de ganado como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla V. **Tiempo de retención hidráulico de estiércol de ganado en distintas regiones**

Tiempo de retención hidráulico	Características
30 – 40 días	Clima tropical con regiones planas. Ej. Indonesia, Venezuela, América Central.
40 – 60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos. Ej. India, Filipinas, Etiopía.
60 – 90 días	Clima temperado con inviernos fríos. Ej. China, Corea, Turquía.

Fuente: FAO. (2011). *Manual de biogás*. Consulta: julio 2019. Recuperado de:
<http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Se indica que la eficiencia de la producción de biogás se determina expresando el volumen de biogás producido por unidad de peso de materia seca. La fermentación de biogás requiere un cierto rango de concentración de materia seca que es muy amplio, usualmente desde 1 % al 30 % (FAO, 2011).

Otro de los valores medidos para la estimación de la producción de biogás fue la demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno de una muestra de estiércol, a partir de las cuales se determinó la velocidad de degradación de la materia orgánica. Para eso se tomó una muestra de 10-30

gramos y se llevó a análisis de laboratorio en el Centro Universitario de Oriente (CUNORI), el análisis duró cuatro días y los datos obtenidos fueron:

Tabla VI. **Datos de DQO y DBO₅**

DQO mg/L	DBO₅ mg/L
3,829	2,172

Fuente: elaboración propia.

Por lo anterior, como regla general se asume que un 10 % de la materia orgánica removida (DQO) durante el proceso anaeróbico se utiliza para la síntesis de biomasa. Referente a la relación de carbono-nitrógeno, con base en la fuente de la FAO estos dos elementos constituyen las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas, siendo el carbono 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, ya que se ha demostrado que la descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente por la falta de nitrógeno. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, con el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

Para el caso de nuestra investigación, como ya se ha mencionado en párrafos anteriores, la mezcla óptima de estiércol utilizado fue de 1:1, lo cual representa un valor promedio de relación carbono-nitrógeno de 25:1. Para la estimación del volumen de biogás se procedió a determinar el volumen de biogás generado a partir del peso teórico y volumen teórico a través de estequiometría,

el peso real y volumen real de biogás generado, aplicando la fórmula del cilindro de $\pi R^2 h$.

Se estimó que un bovino tiene la capacidad de producir 10 Kg de estiércol al día, lo que equivale en función de la materia prima a 0.40 m³/día de biogás, actualmente la finca donde se implementó el biodigestor cuenta con 20 bovinos, por lo que se estimó que la finca genera un total de 120 Kg de estiércol, lo cual genera un potencial de producción de biogás de 8 m³/día. Actualmente con el biodigestor implementado se trata un total de 61.23 Kg de estiércol al día, generando una producción promedio de biogás de 2.37 m³; un máximo diario de biogás de 3.67 m³/día y un mínimo diario de 1.67 m³/día.

2.3 Uso del biogás como fuente energética

Posteriormente de llevarse a cabo el proceso de la digestión anaerobia y obtener el biogás, se realizó el análisis y la evaluación de las diferentes alternativas del biogás para uso energético dentro de la finca de acuerdo a sus necesidades. Con base en lo establecido por la FAO (2011), las necesidades de biogás para una familia compuesta por 5 personas son las siguientes:

Cocinar (5 horas)	0.30 * 5	1.50 m ³ /día
3 lámparas (3 horas)	0.15 * 3 * 3	1.35 m ³ /día
1 refrigerador medio	2.20 * 1	2.20 m ³ /día
Total		5.05 m ³ /día

Dentro de la finca vive una familia compuesta por 5 miembros, quienes utilizan la leña como principal recurso energético para la cocción de los alimentos, debido a la falta de alternativas de fuentes energéticas, por lo que se identificó como principal necesidad el aprovechamiento del biogás como fuente energética

para la cocción de alimentos como sustituto del gas licuado de petróleo (GLP) empleado para cocinar, ya que sí cuentan con energía eléctrica en su vivienda.

Para poder aprovechar el biogás se hizo una reducción en la boquilla de salida para aumentar la presión ya que estos sistemas mantienen niveles bajos de la misma. Asimismo, se instaló un medidor de presión de gas en la línea de distribución de biogás para llevar un control de la misma, ya que este necesita mantener niveles de 8 a 25 mbar.

Se instaló filtro desulfurizador para planta familiar, el cual permite la extracción del sulfuro de hidrógeno (H_2S), el cual es muy corrosivo y su eliminación garantiza una mayor vida útil de los equipos domésticos utilizados con el biogás, que es componente natural del biogás. Se adaptaron los quemadores de gas convencional, se cambió la relación aire-gas (aumentando la presión o bien incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas (el biogás requiere de una apertura 2 a 3 veces mayor a la utilizada por el metano puro y modificando la geometría del paso de aire desde el exterior), incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas (el biogás requiere de una apertura 2 a 3 veces mayor a la utilizada por el metano puro y modificando la geometría del paso de aire desde el exterior).

2.4 Estimación de beneficio ambiental

Se utilizó el programa diseñado en Excel por el Dr. Jon Hillier y sus colegas en el grupo de modelización ambiental en la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad de Aberdeen, Escocia, llamada CoolFarmTool, aplicada a diferentes granjas dedicadas a la producción, donde ya estimado el volumen de biogás en m^3 se estimó cuántos Kw/h equivalen y se transformó en una sola unidad de energía, la unidad de medida mega joule, con lo cual se estimó el CO_2 equivalente evitado a la atmósfera, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Emisiones de CO₂ equivalente evitadas a la atmósfera**

Metros cúbicos de biogás producidos promedio día	Equivalente de Kw	Kw/h equivalente	Equivalente a Mega Joule (MJ)	CO₂ equivalente evitados a la atmosfera
2.37	15.41	5.93	21.35	0.033

Fuente: elaboración propia.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1 Implementación de biodigestor

Se implementó un biodigestor tipo salchicha o Taiwán, ya que debido a la materia prima (estiércol de ganado) que seleccionamos, se requirió de uno cuya característica principal sea de flujo continuo permitiendo la entrada y salida constante de fluido. Para nuestro caso se implementó con las siguientes medidas:

Tabla VIII. **Medidas utilizadas para la implementación del biodigestor**

Largo	Ancho	Alto
7 metros	1 metro	1 metro
Inclinación de 45° de cada lado para la entrada y salida de los desechos	Con reducción de 80 centímetros al fondo	

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Aspectos técnicos para alimentación del biodigestor**

Variables	Datos
Tiempo de retención hidráulica	40 días
Velocidad de carga orgánica	0.6-0.8 Kg-SV/m ³ -día
Caudal de carga/día	1.17 m ³
Kg/día estiércol	61.23Kg
Mezcla óptima relación estiércol/agua	1:1
Presión	1.35 PSI

Fuente: elaboración propia.

3.2 Estimación del volumen de biogás

Ya implementado el biodigestor tipo salchicha y después de un periodo de retención de cuarenta días, se realizó la medición de temperatura y se estimó el volumen de producción de biogás por un periodo de quince días, tal como se resume en la siguiente tabla:

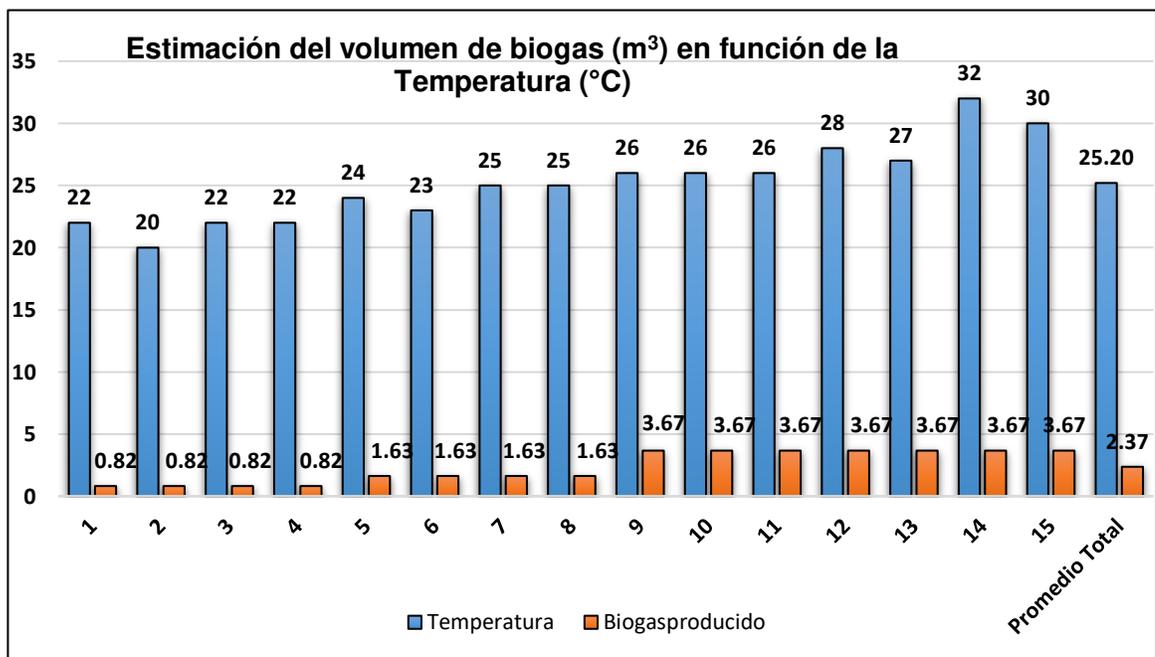
Tabla X. **Estimación del volumen de biogás en función de la temperatura**

Día	Temperatura °C	Producción de biogás m³
1	22	0.82
2	20	0.82
3	22	0.82
4	22	0.82
5	24	1.63
6	23	1.63
7	25	1.63
8	25	1.63
9	26	3.67
10	26	3.67
11	26	3.67
12	28	3.67
13	27	3.67
14	32	3.67
15	30	3.67
Promedio Total	25.2	2.37

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se representa la producción de biogás en función de la temperatura, esta influye en el proceso de degradación de la materia a partir de la activación de las bacterias que producen metano, considerando que no es un ambiente controlado como sería el caso a nivel laboratorio, podemos observar que estas diferencias de temperatura sí influyen en dicho proceso, tal como se muestra en la figura 11.

Figura 11. **Estimación del volumen de biogás en función de la temperatura**



Fuente: elaboración propia.

Asimismo, se estimó la eficiencia de la producción de biogás en función de la cantidad de materia fecal diluida y su velocidad de degradación de materia orgánica. Los resultados son los siguientes:

Tabla XI. **Estimación de la eficiencia del biogás en función del peso diluido de estiércol**

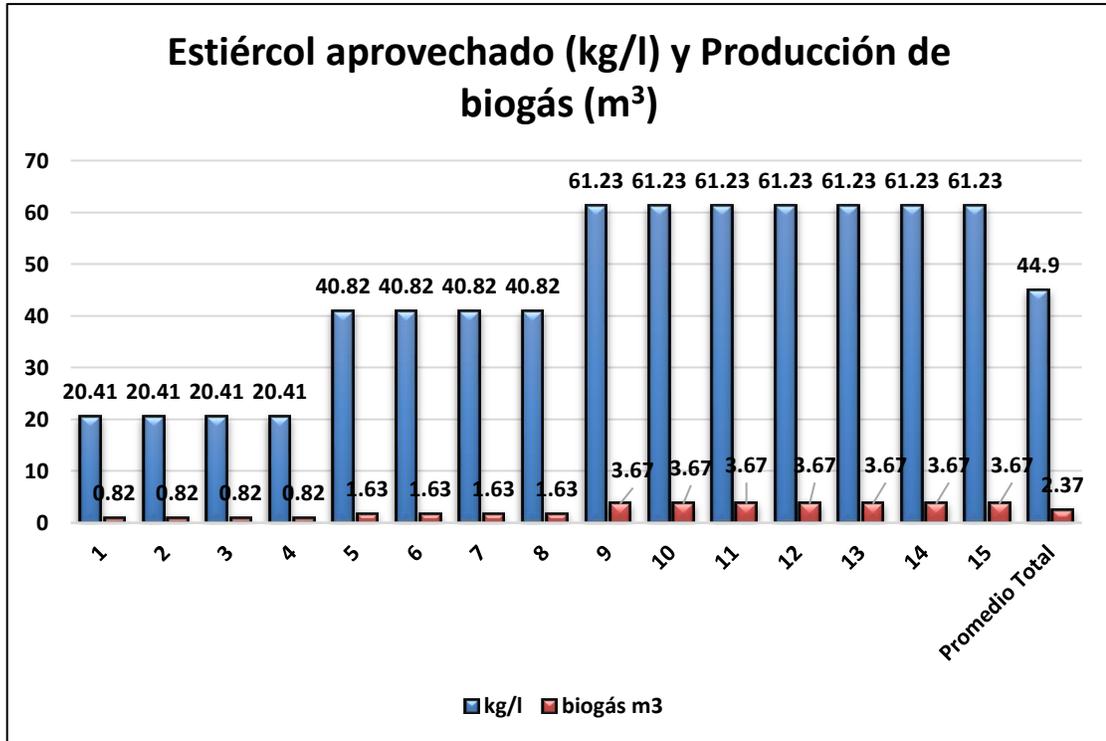
Día	Estiércol bovino kg/l	Producción de biogás m³
1	20.41	0.82
2	20.41	0.82
3	20.41	0.82
4	20.41	0.82
5	40.82	1.63
6	40.82	1.63
7	40.82	1.63
8	40.82	1.63
9	61.23	3.67
10	61.23	3.67
11	61.23	3.67
12	61.23	3.67
13	61.23	3.67
14	61.23	3.67
15	61.23	3.67
Promedio Total	44.90	2.37

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, se estimó que, de acuerdo a la demanda química de oxígeno, por cada kilogramo de DQO destruida se generó 0.35 m³ de biogás, lo cual con base en la toma de heces diluida equivale a 1.34m³.

En promedio se dio tratamiento a un total de 44.90 kg/l para producir un promedio de 2.37m³ de biogás, conforme se fue agregando mayor cantidad de sustrato de estiércol diluido, así fue aumentando la producción de metano, esto sucede porque a mayor cantidad de sustrato mayor alimento para las bacterias que producen el metano, como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Producción de biogás en función de la cantidad de estiércol diluido



Fuente: elaboración propia.

3.3 Uso de biogás como fuente energética

Con base en el análisis y la evaluación de las diferentes alternativas del biogás para uso energético dentro de la finca, se estimó la cantidad de biogás que se consume en un periodo de quince días para uso energético dentro de la finca, en función de:

$$(\text{volumen generado m}^3 / \text{volumen consumido m}^3) * 100$$

Como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla XII. **Estimación del uso del biogás como fuente alterna de energía**

Día	Producción de biogás m³	Horas utilizadas	Cantidad de biogás consumido m³	Eficiencia de consumo (%)
1	0.82	2	0.6	73%
2	0.82	2	0.6	73%
3	0.82	2	0.6	73%
4	0.82	2	0.6	73%
5	1.63	3	0.9	55%
6	1.63	3	0.9	55%
7	1.63	3	0.9	55%
8	1.63	3	0.9	55%
9	3.67	4	1.2	33%
10	3.67	4	1.2	33%
11	3.67	4	1.2	33%
12	3.67	4	1.2	33%
13	3.67	4	1.2	33%
14	3.67	4	1.2	33%
15	3.67	4	1.2	33%
Promedio Total	2.37	3.20	0.96	41%

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, en función del uso del biogás como fuente alterna de energía, se estimó cuántos kilogramos de leña fueron sustituidos por dicho recurso energético como se muestra en la siguiente página en la tabla XIII:

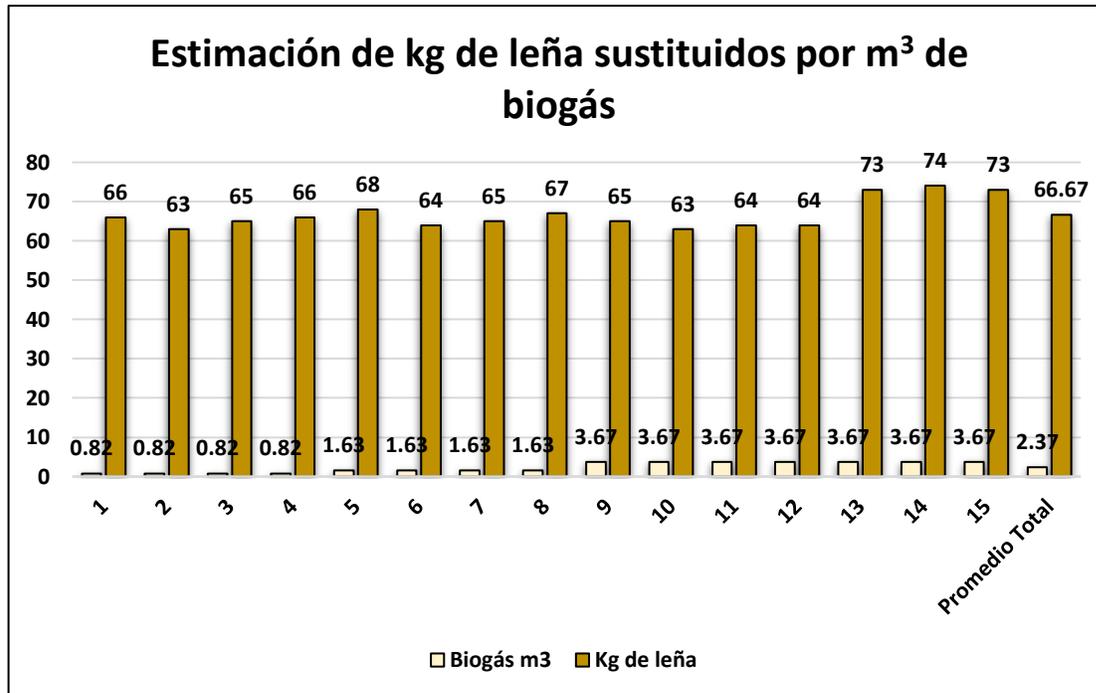
Tabla XIII. **Estimación de kilogramos sustituidos por la producción de biogás**

Día	Producción de biogás m³	Kg de leña sustituidos
1	0.82	66
2	0.82	63
3	0.82	65
4	0.82	66
5	1.63	68
6	1.63	64
7	1.63	65
8	1.63	67
9	3.67	65
10	3.67	63
11	3.67	64
12	3.67	64
13	3.67	73
14	3.67	74
15	3.67	73
Promedio Total	2.37	66.67

Fuente: elaboración propia.

El biogás producido fue aprovechado para la cocción de alimentos en sustitución de la leña, lo cual representa un promedio de 66.67 kilogramos de leña sustituida dentro de la finca donde se realizó el estudio. Como se muestra en la siguiente página en la figura 13:

Figura 13. Kilogramos de leña sustituidos por producción de biogás



Fuente: elaboración propia.

3.4 Estimación del beneficio ambiental

Se estimó la cantidad de CO₂ equivalente que fue evitada a la atmósfera con el manejo integrado de los desechos ganado, para determinar el beneficio ambiental a partir del uso de estiércol como recurso energético. El detalle de los resultados se visualiza en la siguiente página, en la tabla XIV:

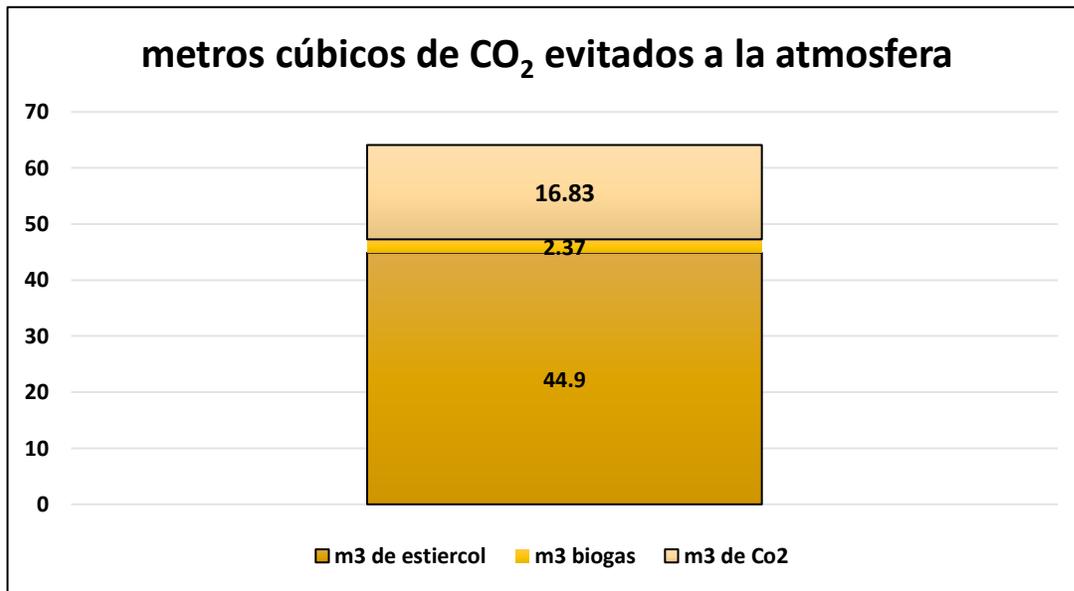
Tabla XIV. **Estimación de toneladas de CO₂ equivalentes evitadas**

Día	Kg de estiércol bovino	Metros cúbicos de biogás producido	Toneladas de CO₂ equivalentes evitadas
1	20.41	0.82	0.011
2	20.41	0.82	0.011
3	20.41	0.82	0.011
4	20.41	0.82	0.011
5	40.82	1.63	0.022
6	40.82	1.63	0.022
7	40.82	1.63	0.022
8	40.82	1.63	0.022
9	61.23	3.67	0.051
10	61.23	3.67	0.051
11	61.23	3.67	0.051
12	61.23	3.67	0.051
13	61.23	3.67	0.051
14	61.23	3.67	0.051
15	61.23	3.67	0.051
Promedio Total	44.90	2.37	0.033

Fuente: elaboración propia.

Para poder graficar el impacto ambiental obtenido a partir del tratamiento de los desechos orgánicos derivados del estiércol de ganado, se realizó la conversión de las tres dimensionales a m³, para unificar las medidas, para lo cual se determinó que por la cantidad de desechos tratados se evitaron 0.033 toneladas de CO₂ a la atmósfera, lo cual equivale a 16.83 m³ de CO₂ evitados en un promedio al día. Como se presenta en la siguiente página en la figura 14:

Figura 14. **Estimación de metros cúbicos de CO₂ equivalente evitados a la atmósfera**



Fuente: elaboración propia.

3.5 **Estimación de costos y ahorro por consumo energético a partir de la producción de biogás**

El análisis económico realizado para este proyecto se centra en el cálculo de los costos de la implementación del biodigestor y para su utilización como recurso energético en la cocina y en función del ahorro en el consumo energético, específicamente del recurso de biomasa (leña). Por lo que la rentabilidad no puede definirse en función de un retorno económico del proyecto porque no es su finalidad, pero sí puede definirse con base en las condiciones familiares a nivel local.

Los costos para la realización del proyecto se presentan en la siguiente tabla:

Tabla XV. **Costos de insumos utilizados**

Insumos	Cantidad	Costo total
Nylon de 72 pulgadas	20 m	Q. 400.00
Hembra de una pulgada	1	Q. 5.00
Macho de una pulgada	1	Q. 5.00
Tubo de llanta de carro	1	Q.1.00
Sellador para PVC	2	Q.16.00
“T” de una pulgada	1	Q. 8.00
Codos de 1 pulgada	2	Q.14.00
Reducidor liso para entrada de Manguera	2	Q.12.00
Manguera	3 m	Q.45.00
Alambre de amarre	1 lb	Q. 8.00
Uniones de PVC de una pulgada	3	Q.12.00
Abrazaderas de una pulgada	2	Q.10.00
Llave de paso de una pulgada	1	Q.5.00
Bote plástico	1	Q. 25.00
Tubo de PVC de 1 pulgada	2 m	Q. 27.00
Manómetro	1	Q. 85.00
Reducidor de ½ pulgada	1	Q.65.00
Manguera de ½ pulgada	4 m	Q. 32.00
Adaptador de manguera de ½ pulgada	1	Q. 25.00
Llave de paso de metal para ½ pulgada	2	Q. 120.00
Llave de ingreso de gas	1	Q.65.00
Manguera para gas no transparente	2 m	Q.195.00
Abrazaderas de ½ pulgada	4	Q. 14.00
Estufa pequeña de dos hornillas	1	Q.400.00
TOTAL		Q. 1, 644.00

Fuente: elaboración propia.

Así mismo se estimó los costos de mano de obra y los costos de transporte para la implementación del proyecto, los cuales se resumen en la siguiente página en la tabla XVI:

Tabla XVI. **Costos de mano de obra, mantenimiento y transporte**

Fase	Costos
Construcción de Fosa	Q.400.00
Construcción de fermentador	Q.300.00
Mantenimiento de biodigestor	Q.156.00
Costos de transporte	Q.300.00
Total	Q.1,156.00

Fuente: elaboración propia.

Respecto al consumo de leña la familia informó que ellos compran 1 tarea de leña cada 15-20 días, por lo que su consumo es de 1 a 2 tareas equivalente al mes, el costo de la leña en la región es de Q.350.00/ tarea, lo equivalente a un costo mensual de Q.700.00.

En relación con lo anterior y haciendo referencia al costo que tuvo el proyecto al implementarlo, se estimó el costo de inversión (costos de insumos, costos de mano de obra, costos de mantenimiento y costos de transporte) y el ahorro expresado en quetzales por mes tendría el proyecto al utilizarlo como una alternativa de fuente energética renovable, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla XVII. **Estimación de costo/beneficio de la implementación de un biodigestor para la producción de biogás**

Costo del proyecto en quetzales	Q. 2,800.00
Ahorro energético mensual (Q/mes)	Q. 700.00

Fuente: elaboración propia.

Si el ahorro representado para la familia en el cuadro anterior se proyectará a 12 meses, ellos se estarían ahorrando en compra de leña un total de Q.8,400.00, por lo que no solo conlleva un bajo costo si no que contribuye a la economía familiar.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La realidad del contexto rural necesitó de la implementación de un biodigestor Taiwan o tipo salchicha, ya que es un sistema continuo, lo cual permitió una mayor velocidad de degradación de la materia orgánica proveniente del estiércol de ganado, para lo cual un factor importante para la determinación y funcionamiento del mismo fue la temperatura, la cual debe tener un promedio de 25.2 °C.

La ubicación del biodigestor debe ser un área que permita un adecuado acoplamiento de la bolsa, principalmente no debe ser un área pedregosa ya que esto puede romper la bolsa por la presión que tendrá por el contenido de la materia orgánica diluida y la generación de biogás, asimismo, se debe tener en cuenta la nivelación del terreno, ya que este debe tener 45° de inclinación en sus extremos y un desnivel de 80 centímetros en las paredes de la fosa.

La materia orgánica a utilizar como materia prima debe ser fresca y ser diluida en agua, para el caso de la finca donde se implementó se utilizó una cubeta fresca de estiércol diluida en una cubeta en agua por una semana y posteriormente se utilizó dos de estiércol diluidas en una cubeta de agua, este cambio de proporción se dio principalmente porque en la época de producción disminuyó la temperatura, por lo que se duplicó la materia prima para que se generara la misma cantidad de biogás a un tiempo menor.

La eficiencia de la producción de biogás en función de la cantidad de materia fecal diluida y su velocidad de degradación de materia orgánica se estimó así: por cada kilogramo de DQO eliminada se generará 1.34 m³ al día.

Con base en el biogás obtenido se pudo sustituir la leña que la familia utilizaba para la cocción de alimentos, ya que era su fuente energética principal. El biogás generado permite su utilización para los tres tiempos de comida para un total de 5 personas, quienes viven dentro de la finca, lo cual equivale a un promedio de 66.67 kilogramos de leña sustituidos por un promedio 2.37 metros cúbicos de gas al día.

Respecto al beneficio ambiental del proyecto se evitaron un promedio de 0.032 toneladas de CO₂ equivalentes a la atmósfera al día, a través del manejo integrado de 44.90 kilogramos de estiércol de ganado, lo cual representa un promedio de 2.37 metros cúbicos de biogás producidos.

La eficiencia promedio por día estimada de utilización de biogás fue del 41 %, ya que es utilizado un promedio de 3.20 al día, consumiendo un promedio de 0.90 m³ biogás, de 2.32 m³ de biogás producidos en promedio al día.

En relación de costo-beneficio a través de la implementación de dicho biodigestor, la finca invirtió Q. 2,800.00 en materiales, mano de obra, costos de transporte, entre otros. Sin embargo, se estimó que la finca está ahorrando Q.700.00 al mes en recursos energéticos utilizados para la producción de leche artesanal, por lo que, si se proyecta ese ahorro a los 12 meses del año, se estaría ahorrando un promedio de Q.8,400.00, por lo que el beneficio es alto para la familia de la finca donde se realizó el estudio.

CONCLUSIONES

1. Bajo las condiciones adecuadas se determinó que, en promedio, por cada 44.90 kilogramos de estiércol de ganado utilizado dentro del proceso de digestión anaerobia, se produjo 2.37 metros cúbicos de biogás en promedio por día.
2. Debido a las condiciones del área donde se llevó a cabo el proceso de producción biogás, el sustrato a utilizar, se determinó que para lograr una mejor eficiencia del proceso de digestión se debe utilizar un sistema continuo tipo Taiwán o salchicha, el cual es el que mejor se adapta en zonas rurales.
3. Con el tratamiento de 61.23 kg de estiércol de ganado al día, se estimó un volumen máximo diario de 3.67 m³, un mínimo diario de 1.67 m³ y un promedio diario de 2.37 m³ de volumen de biogás.
4. El aprovechamiento del biogás como recurso energético dentro de la finca ubicada en el municipio de Ipala, Chiquimula, fue para la cocción de alimentos en sustitución de la cocina de leña.
5. A través del manejo integrado de los desechos orgánicos generados a partir del estiércol de ganado, se contribuyó con evitar la emisión de 0.033 toneladas de CO₂ equivalentes en promedio por día por la descomposición de los desechos orgánicos a la intemperie.

RECOMENDACIONES

1. Cuidar la alimentación del ganado, ya que un alto contenido de fibra podría disminuir la eficiencia en la degradación de la materia orgánica, generando que el estiércol de ganado no pueda utilizarse dentro del proceso de producción de biogás.
2. Implementar el biodigestor tipo Taiwán o salchicha para el manejo integrado de los desechos orgánicos provenientes del estiércol de ganado, por ser una tecnología de bajo costo y con alta efectividad para la degradación de la materia orgánica, especialmente para los desechos de estiércol de vaca.
3. Realizar el proceso de biodigestión en época seca, ya que su nivel de fermentación y degradación será mucho más rápido debido a las altas temperaturas de la zona.
4. Utilizar el biogás como recurso energético para la cocción de alimentos en sustitución de la leña como recurso energético, cargando el biodigestor en función del volumen de consumo para evitar una sobrecarga de material.
5. Tratar el estiércol de ganado a través de la producción de metano es una alternativa de bajo costo para la mitigación de los gases de efecto invernadero que genera dicha actividad productiva.

REFERENCIAS

1. Aguilera, E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano* (24), 60-81. Recuperado de [file:///C:/Users/Ale/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/5552-19220-1-PB%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Ale/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/5552-19220-1-PB%20(1).pdf)
2. Bastidas, R. C. (2017). *Aprovechamiento del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal-Nariño para obtener energía renovable mediante digestión anaerobia*. Palmira, Colombia: autor. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/57424/1/Tesis%20de%20maestr%C3%ADa%20en%20Ingenier%C3%ADa%20Ambiental%20ROSA%20RUIZ.pdf>
3. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2015). *Cambio climático y actividades agropecuarias en Latinoamérica*. Santiago, Chile: autor. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/39824-cambio-climatico-actividades-agropecuarias-america-latina>
4. Doroteo, J. (2012). *Aprovechamiento de biogás proveniente del abono de ganado vacuno en un establo ubicado en Ixtapaluca Estado de México*. México D.F., México: Instituto Politécnico Nacional, de la

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura U.Z, sección de Estudios de Posgrado e investigación en la ciudad de México. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/11057/1/52.pdf>

5. FAO. (2011). *Manual de biogás*. Santiago, Chile: autor. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
6. Fong, H. (2013). *Diseño de la investigación de un sistema de generación de energía eléctrica para el autoconsumo a partir de la biodigestión del estiércol bovino en una finca del municipio de Taxisco, Santa Rosa*. (Tesis de Maestría). Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0705_Ml.pdf
7. Gerber, P.; Steinfeld, H.; Henderson, B.; Mottet, A.; Opio, C.; Dijkman, J. y Tempio, G. (2013). *Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería – Una evaluación global de las emisiones*. Roma, Italia: FAO.
8. Hristov, A.; Joonpyo, O.; Chanhee, L.; Meinen, R.; Montes, F.; Troy, O. y Oosting, S. (2013). *Mitigación de las emisiones. Una revisión de las opciones técnicas para la reducción*. Roma, Italia: B. H. Pierre J. Gerber.
9. Jiménez, D. (2012). *Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo*. (Tesis de Maestría). Universidad Veracruzana en Xalapa, Veracruz, México. Recuperado de <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/31560/delamerc>

edjimenezdiego.pdf;jsessionid=A9BB12CB9A47486AA4A2224560
354962?sequence=1

10. Jiménez, S. (2016). *Alternativas para generación de energía*. Valladolid, España: autor. Recuperado de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/22117/1/TFG-P-503.pdf>
11. Martínez, H. (2013). *Diseño de la investigación de un sistema de generación de energía eléctrica para el autoconsumo a partir de la biodigestión del estiércol bovino en una finca del municipio de taxisco, Santa Rosa*. (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Taxisco, Santa Rosa, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0705_Ml.pdf
12. Montenegro, P. (2018). *Propuesta de la implementación de un biodigestor tipo geomembrana PVC mediante la evaluación de un reactor piloto anaerobio para la producción de biogás a partir de estiércol vacuno, residuos de cocinas industriales y aguas residuales en Ingenio Santa Ana*. (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/8785/1/Paulina%20Mar%C3%ADa%20Castillo%20Montenegro.pdf>
13. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Roma, Italia: autor.

14. Otlica, J. (2012). *Aprovechamiento de biogás proveniente del abono de ganado vacuno en un establo ubicado en Ixtapaluca, Estado de México*. (Tesis de Maestría). UNAM, Ixtapaluca, México. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/11057/1/52.pdf>
15. Ramírez, C. (2014). *Análisis de oportunidades para la gestión eficiente del carbono en un sistema de producción de café en el departamento de Caldas*. (Tesis de Maestría). Universidad de Manizales, Manizales. Recuperado de http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/1837/Isaza_Ramirez_Carlos_Hernando_2014.pdf?sequence=1
16. Universidad Nacional Autónoma de México. (s.f.). *Biodigestor: alternativa energética*. México D.F., México: autor. Recuperado de https://feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria20/feria254_01_biodigestor_alternativa_energetica.pdf

APÉNDICES

Apéndice 1. Construcción de fosa para biodigestor



Fuente: elaboración propia, en Ipala, Chiquimula.

Apéndice 2. Construcción de biodigestor o fermentador anaeróbico



Fuente: elaboración propia, en Ipala, Chiquimula.

Apéndice 3. Implementación de válvula de seguridad



Fuente: elaboración propia, en Ipala, Chiquimula.

Apéndice 4. **Biodigestor implementado**



Fuente: elaboración propia, en Ipala, Chiquimula.