



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

**POTENCIAL ENERGÉTICO DEL MERCADO LA PARROQUIA ZONA 6 DE LA CIUDAD DE  
GUATEMALA, POR MEDIO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS  
SÓLIDOS**

**Ing. Carlos Eduardo García Cano**

Asesorado por el Mtro. Ing. Edgar Yanuario Laj Hun

Guatemala, mayo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DEL MERCADO LA PARROQUIA ZONA 6 DE LA CIUDAD DE  
GUATEMALA, POR MEDIO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS  
SÓLIDOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. CARLOS EDUARDO GARCÍA CANO**  
ASESORADO POR EL MTRO. ING. EDGAR YANUARIO LAJ HUN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE**

GUATEMALA, MAYO DE 2022

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. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Alvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Marvin Eduardo Mérida Cano
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **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:

**POTENCIAL ENERGÉTICO DEL MERCADO LA PARROQUIA ZONA 6 DE LA CIUDAD DE  
GUATEMALA, POR MEDIO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS  
SÓLIDOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 20 de noviembre de 2020.

**Ing. Carlos Eduardo García Cano**

LNG.DECANATO.OI.385.2022

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 Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **POTENCIAL ENERGÉTICO DEL MERCADO LA PARROQUIA ZONA 6 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, POR MEDIO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS**, presentado por: **Carlos Eduardo García Cano**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Energía y ambiente después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, mayo de 2022

AACE/gaoc



**Guatemala, mayo de 2022**

LNG.EEP.OI.385.2022

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 del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“POTENCIAL ENERGÉTICO DEL MERCADO LA PARROQUIA ZONA 6 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, POR MEDIO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS”**

presentado por **Carlos Eduardo García Cano** 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 Colí**  
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería**





Guatemala, octubre 2021

Como coordinador de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“POTENCIAL ENERGÉTICO DEL MERCADO “LA PARROQUIA” ZONA 6 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, POR MEDIO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS”** presentado por el ingeniero **Carlos Eduardo García Cano** quien se identifica con carné **201403959**.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

**Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque**  
**Coordinador de Maestría**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**



Guatemala, 11 octubre 2021.

**Ingeniero M.Sc.  
Edgar Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería USAC  
Ciudad Universitaria, Zona 12**

**Distinguido Ingeniero Álvarez:**

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor del trabajo de graduación del estudiante Carlos Eduardo García Cano, Carné número 999003308, cuyo título es "**POTENCIAL ENERGÉTICO DEL MERCADO "LA PARROQUIA" ZONA 6 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, POR MEDIO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS**", para optar al grado académico de Maestro en Energía y Ambiente, he procedido a la revisión del INFORME FINAL y del ARTÍCULO.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante García Cano, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



**Ing. Edgar Yanuario Laj Hun**  
Mtro. Energía y Ambiente  
Asesor  
*Edgar Yanuario Laj Hun*  
*Ingeniero Electricista*  
*Col.11475*

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser parte de mi motivación a cumplir mis metas.
- Mis padres** Carlos Ovidio García y Flavia Arminda Cano. Su apoyo y amor me ha permitido seguir adelante en mis sueños.
- Mis hermanos** Gabriela, Víctor, Marcos y Argelia García Cano su apoyo me motiva a seguir esforzándome en mi carrera.
- Mis abuelos** Glenda Miriam Cano y Raúl Tello (q. d. e. p.) a pesar de no estar cerca siempre están presentes apoyándome y dándome su cariño, permitiéndome seguir adelante.
- Mis tíos y primos** Por la felicidad y la orientación que me han dado en todo momento.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser el pilar de conocimiento que me permitió una mejor formación académica.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por los conocimientos que me permitieron mejorar como estudiante.
<b>Escuela de Estudios de Postgrado</b>	Por el apoyo brindado en todo momento.
<b>Mis amigos</b>	Por acompañarme durante toda la carrera, apoyándome en todo momento.
<b>Mi asesor</b>	Mtro. Ing. Edgar Yanuario Laj Hun, por sus consejos y su conocimiento impartido.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO .....	XXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Residuos sólidos y su gestión .....	4
1.2.1. Implicaciones medioambientales .....	5
1.2.2. Clasificación de los residuos sólidos .....	6
1.2.2.1. Según su origen.....	6
1.2.2.2. Según peligrosidad .....	7
1.2.2.3. Según composición .....	8
1.2.3. Gestión integral de residuos sólidos en Guatemala .....	9
1.2.4. Principios de la política integral de residuos de Guatemala .....	10
1.3. Proceso de digestión .....	13
1.3.1. Digestión aeróbica .....	14
1.3.2. Digestión anaeróbica .....	14

1.3.3.	Principios de la fermentación anaeróbica.....	15
1.3.3.1.	Hidrólisis.....	16
1.3.3.2.	Etapa fermentativa .....	17
1.3.3.3.	Etapa acetogénica.....	17
1.3.3.4.	Etapa metanogénica .....	17
1.3.4.	Microorganismos involucrados .....	18
1.3.4.1.	Bacterias que participan de la hidrólisis .....	18
1.3.4.2.	Bacterias que participan de la acidogénesis y acetogénesis.....	18
1.3.4.3.	Bacterias que participan de la metanogénesis .....	19
1.3.5.	Relación carbono/nitrógeno.....	19
1.4.	Reactores anaeróbicos .....	20
1.4.1.	Reactor continuo .....	20
1.4.2.	Reactor semicontinuo.....	20
1.4.3.	Reactor discontinuo o de régimen estacionario.....	21
1.4.4.	Componentes de un digestor anaeróbico.....	21
1.4.4.1.	Reactor.....	21
1.4.4.2.	Cúpula .....	22
1.4.4.3.	Válvulas de seguridad .....	22
1.4.4.4.	Medidor de gas.....	22
1.4.4.5.	Sistema de gas y quemador.....	22
1.4.5.	Tipos de reactores para medios rurales .....	23
1.4.5.1.	Modelo Chino .....	23
1.4.5.2.	Modelo Hindú .....	24
1.4.5.3.	Horizontal .....	25
1.4.5.4.	Tipo <i>batch</i> .....	26
1.4.5.5.	Reactor de alta velocidad .....	27

	1.4.5.6.	Reactor de contacto.....	27
1.5.		Biogás como fuente energética .....	28
	1.5.1.	Aplicaciones para el biogás .....	29
		1.5.1.1. Generación de electricidad o calor .....	30
		1.5.1.2. Combustible de motores.....	31
		1.5.1.3. Antorchas de quema de gas.....	31
	1.5.2.	Purificación y adaptaciones para aprovechamiento .....	32
	1.5.3.	Usos del residuo o lodo de digestión.....	33
2.		CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS .....	35
	2.1.	Histórico de generación de residuos .....	35
	2.2.	Recolección y separación de muestras .....	37
	2.3.	Determinación de la fracción biodegradable.....	38
3.		BIODIGESTOR PARA GENERACIÓN DE BIOGÁS .....	41
	3.1.	Selección del biodigestor.....	41
	3.2.	Diseño y construcción del biodigestor .....	43
	3.3.	Operación del biodigestor y producción de biogás .....	45
4.		EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL GAS .....	49
	4.1.	Determinación del potencial energético del biogás .....	49
	4.2.	Usos potenciales del biogás generado.....	51
5.		RESULTADOS.....	55
	5.1.	Historial de producción de residuos.....	55
	5.2.	Caracterización de los residuos.....	56
	5.3.	Total de biogás producir .....	57
	5.4.	Producción energética.....	59

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	61
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES .....	67
REFERENCIAS .....	69
APÉNDICES.....	75

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Composición de los residuos generados en el 2018 .....	4
2.	Acumulación de residuos sólidos en el lago de Amatitlán.....	5
3.	Normativa para la gestión de residuos en Guatemala.....	10
4.	Diagrama de las reacciones involucradas en la digestión anaeróbica.. ..	16
5.	Biodigestor modelo Chino .....	24
6.	Biodigestor modelo Hindú .....	25
7.	Biodigestor horizontal.....	26
8.	Biodigestor tipo <i>batch</i> .....	27
9.	Biodigestor de contacto.....	28
10.	Aplicaciones del biogás.....	30
11.	Alternativas de purificación .....	32
12.	Histórico de recolección de residuos del mercado La Parroquia.....	37
13.	Recolección de residuos .....	38
14.	Separación de materia vegetal.....	40
15.	Pesaje de materia vegetal.....	40
16.	Reactor experimental tipo Batch .....	44
17.	Medición de lodos .....	53
18.	Extracción de lodos del reactor .....	53
19.	Histórico de producción de residuos .....	55
20.	Relación de producción y temperatura.....	58
21.	Relación de producción y pH .....	58

## TABLAS

I.	Rendimiento de metano según el tipo de sustrato .....	13
II.	Microorganismos presentes en las 3 etapas de la digestión.....	19
III.	Características generales del biogás .....	29
IV.	Estadística de recolección de desechos sólidos en mercados y satélites enero 2020.....	36
V.	Producción de biogás .....	45
VI.	Composición de biogás.....	49
VII.	Características de los lodos resultantes .....	52
VIII.	Características químicas de los lodos.....	54
IX.	Porcentaje de composición de residuos .....	56
X.	Peso de materia orgánica generada .....	56
XI.	Composición química de la materia orgánica .....	57
XII.	Total de producción de biogás.....	57
XIII.	Producción de metano .....	59
XIV.	Características del lodo producido.....	59
XV.	Producción mensual .....	60
XVI.	Producción anual .....	60
XVII.	Ejemplificación mensual de producción energética .....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Ácido sulfhídrico
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrógeno molecular
<b>H</b>	Humedad
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>Kwh</b>	Kilowatt hora
<b>Lt</b>	Litro
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>N<sub>2</sub></b>	Nitrógeno molecular
<b>Kcal/m<sup>3</sup></b>	Poder calorífico
<b>%</b>	Porcentaje
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>Pr</b>	Proteína
<b>ST</b>	Sólidos totales
<b>SV</b>	Sólidos volátiles



## GLOSARIO

<b>CD</b>	Carga diaria de residuos orgánicos, es mezcla de materia orgánica que ingresa en un reactor anaerobio en el periodo de retención hidráulica.
<b>Cromatografía</b>	Método de análisis que permite la separación de gases o líquidos de una mezcla en sus componentes más básicos.
<b>CTR</b>	Volumen total del reactor, es la suma del volumen de trabajo dentro de un reactor anaerobio y el volumen de almacenamiento de gases.
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero, son componentes gaseosos de la atmósfera que absorben y emiten radiación infrarroja.
<b>Hidrocarburo</b>	Compuesto orgánico conformado únicamente por átomos de carbono e hidrógeno.
<b>MARN</b>	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, es el instituto encargado de regular la gestión ambiental y promover el desarrollo sostenible en Guatemala.

<b>PCH<sub>max</sub></b>	Producción máxima de metano, representa la producción de metano dentro de una mezcla de materia orgánica disuelta.
<b>PM</b>	Peso de materia orgánica disuelta en el reactor, representa el peso en Kg de la mezcla de materia orgánica utilizada en el proceso de digestión anaerobia.
<b>Poder calorífico</b>	Cantidad de energía por unidad de masa o por unidad de volumen de materia que puede desprenderse al producir una reacción química.
<b>TRH</b>	Tiempo de retención hidráulica, es el periodo de tiempo en el que la mezcla orgánica permanece retenida dentro del reactor anaerobio.
<b>VT</b>	Volumen de trabajo del reactor, representa la mezcla de materia orgánica y agua necesaria para el proceso de digestión, dicho volumen representa el 75 % del volumen total del reactor anaerobio.

## RESUMEN

Se realizó un proceso experimental con la finalidad de determinar el potencial energético y de generación de biogás del mercado La Parroquia debido a su constante generación de residuos orgánicos. Se inició identificando los porcentajes de materia vegetal y separándose de otros residuos estimando su producción mensual, pudiendo luego de la etapa experimental calcular la energía presente en el gas y pudiendo así en base a la generación estimada las formas de aprovechar el biogás.

Se hizo una búsqueda del historial de recolección de los residuos realizado por la Municipalidad desde el 2016 hasta el 2020, caracterizando los tipos de residuos que componen dicha materia. Se realizaron mediciones en la materia vegetal a utilizar para obtener su peso, volumen y densidad, así como para obtener su porcentaje de sólidos totales y volátiles por medio de un análisis de laboratorio.

Para el proceso de obtención de biogás se hizo un digestor tipo *batch* para evaluar la carga experimental, utilizando dicho tipo por sus características de espacio y funcionamiento estable, además de la facilidad para tomar medidas de temperatura, pH y volumen producido, controlando las características para mejorar la producción diaria de gas.

Se realizó un análisis del gas producido para obtener la composición del biogás y los niveles de metano presentes para estimar el poder calorífico. Conocida la energía presente y el volumen generado se estima la producción total de energía que puede entregar el mercado con los residuos generados

mensual y anualmente. Se midió el peso del logo resultante para estimar su producción total en el proceso de digestión.

Se logró obtener el promedio de producción mensual con el historial de recolección y la caracterización, se obtuvo la producción total de biogás en metros cúbicos y el poder calorífico en kilowatts hora, esto nos permite estimar la producción mensual energética considerando el total de residuos y las características de estos, se realizó un ejemplo para visualizar la energía presente en el gas y poder determinar sus condiciones como fuente energética.

Se concluye que el mercado La Parroquia puede considerarse como una fuente energética debido a su producción constante de materia que equivale a 152 toneladas, con la que se puede generar 284.9 m<sup>3</sup> de gas que en términos energéticos representan 1,3908 Kwh de energía producida para abastecer 3 hogares promedio por un mes aproximadamente.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El mercado municipal La Parroquia ubicado en zona seis de la ciudad de Guatemala, presenta una generación constante de residuos que dañan el entorno comercial, residencial y peatonal, provocando la expulsión de olores fétidos, la acumulación de desechos varios y contaminación, generando incomodidad entre los vecinos y molestia tras las actividades comerciales que se llevan a cabo en dicho lugar. El problema ha aumentado debido al crecimiento de las actividades comerciales en las cercanías sin un plan establecido, lo cual generó un crecimiento desordenado que afecta a los vecinos.

El mercado posee un área específica para la acumulación de los desechos, preparándose así para su recolección a través del servicio municipal de recolección de basura y posterior trasladado al relleno sanitario ubicado en la zona 3 de la ciudad capital. La actividad de recolección ocurre todos los días por las tardes, pero al tener un gran número de comerciantes en las cercanías y sumado a ello el difícil acceso al área de recolección a las horas pico del sector, impide que se complete el proceso de traslado de desechos al lugar específico, por lo cual se llega a generar una acumulación no deseada de residuos que emiten olores fétidos y molestia en los vecinos del sector.

El deficiente manejo de residuos y la falta de interés o poca conciencia de los comerciantes provoca acumulación de desechos varios que son producidos bajo la actividad comercial, esto permite generar las condiciones necesarias para la propagación de plagas como cucarachas, moscas, roedores y otros animales rastreros, los cuales pueden transmitir enfermedades y llegar a contaminar los productos y alimentos que se venden en los puestos.

Al no existir una mejor organización entre las entidades responsables, se han descuidado aspectos como el manejo adecuado de los residuos, esto afecta negativamente a los locatarios y a los vecinos debido a la aparición de plagas, olores fétidos y la contaminación visual del entorno, al mismo tiempo el desconocimiento del potencial energético de los residuos y las aplicaciones que pueden tener los residuos orgánicos provoca que sean desechados o descartados, contribuyendo a su acumulación.

Por lo que nos lleva a plantear la pregunta ¿Cuál es el potencial energético del mercado La Parroquia?

Por lo que para responder a esta interrogante se deben de contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuántos residuos son biodegradables del total generado de forma diaria?
- ¿Cuánto biogás se puede producir por tonelada de residuos?
- ¿Cuánta es la energía que se puede generar mensual y anualmente?
- ¿De qué forma puede aprovecharse el biogás y los subproductos?

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar el potencial energético del mercado La Parroquia, ubicado en la Ciudad de Guatemala.

### **Específicos**

- Identificar la cantidad de residuos biodegradables que se producen diariamente.
- Estimar la producción de biogás por tonelada de residuos biodegradables.
- Calcular la energía presente en el gas generado de forma mensual y anual.
- Clasificar las formas en que puede aprovecharse el biogás y los subproductos generados.



## **HIPÓTESIS**

Debido a que la investigación es del tipo cuantitativo explicativo y que no formula un nuevo método para la obtención del biogás, la hipótesis no aplica en dicho caso.



## INTRODUCCIÓN

El mercado La Parroquia presenta una constante generación de residuos que dañan el entorno comercial y debido al aumento de ventas y comerciantes en el sector el problema se vuelve más presente, por ello mismo la actividad de recolección se realiza diariamente transportando los residuos a los rellenos autorizados por la municipalidad, sin embargo dicho manejo presenta deficiencias en el proceso y falta de interés por mejorar la gestión actual, lo que provoca acumulación de residuos en áreas no autorizadas afectando al área aledaña.

El proceso de digestión anaerobia transforma la materia orgánica en biogás, esto se convierte en una solución para mejorar el sistema de gestión de residuos además de establecer el potencial de generación del mercado La parroquia para futuros proyectos energéticos.

La determinación del potencial energético se realizó por medio de un proceso experimental para evaluar la producción de biogás y las condiciones necesarias para realizar un proceso de digestión anaerobia utilizando un digester discontinuo. La constante generación de residuos posiciona al mercado La Parroquia como una posible fuente energética pudiendo aprovechar de mejor manera los residuos generados dando un uso más apropiado luego de su recolección, así como los lodos resultantes del proceso.

En el capítulo 1 se presentan las bibliografías relacionadas con el proceso de digestión anaerobia y generación de biogás así como los antecedentes relacionados a proyectos con planteamientos similares, estos establecerán las

bases del proyecto y los factores a considerar. En el capítulo 2 se establecen el promedio de producción de residuos en base al historial de recolección y la caracterización de los residuos, separando la materia prima de la fracción que no puede procesarse por medios anaeróbicos (plástico, metal, cartón, vidrio).

En el capítulo 3 se establecen las razones principales por las que se realizó el experimento utilizando un biodigestor tipo *batch*, así como la construcción e implementación de dicho digestor para la toma de muestras. El capítulo 4 presenta la evaluación de las muestras obtenidas del proceso experimental descrito en el capítulo 3, determinando la estimación de biogás generado de forma mensual y estableciendo su potencial energético y los subproductos generados. Por último, en el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos de la investigación y en el capítulo 7 se discuten los resultados del mismo.

Se concluyó que los residuos generados representan una posible fuente energética en proyectos energéticos futuros, permitiendo mejorar la gestión de residuos por una forma que aprovecha la materia. La energía generada puede ser implementada en sistemas de generación que pueden beneficiar futuros estudios.

## RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El presente estudio es de tipo cuantitativo descriptivo, debido a que se enfoca en las características de poder calorífico y volumen de biogás generado, con la finalidad de clasificar al mercado La Parroquia como una posible fuente energética.

Se utilizó el historial de recolección de residuos sólidos del Departamento de Limpieza de la Municipalidad de Guatemala para estimar la producción de residuos orgánicos de forma mensual y anual, al mismo tiempo se consideraron diferentes casos de estudio de generación de biogás de materia biodegradable así como los factores de mayor repercusión en el experimento.

La recolección de la materia prima se hizo directamente en el área de desecho designada, en la cual se procedió a recolectar muestras en recipientes de 18.90 Lt en el transcurso de una semana, posteriormente se clasificó la materia en orgánica e inorgánica para determinar los porcentajes de los distintos residuos generados y las estimaciones mensuales de dichos residuos.

Posterior a la clasificación y recolección de datos históricos y la materia prima se procedió a la etapa experimental, donde por medio de un biodigestor de tipo discontinuo se inició la digestión de la materia orgánica, luego de un intervalo de tiempo en el cual inicia la producción de gas, se inició la etapa de muestreo donde se recolectaron los datos de la temperatura, pH, volumen de gas experimental y producción de biogás por medio de las estimaciones de producción de metano y máxima producción de metano de la muestra dentro del biodigestor.

Por último, se hicieron mediciones en el sustrato biofertilizante analizando su composición química para establecer sus usos según los resultados y al mismo tiempo se ejecutó un análisis de laboratorio en el biogás generado para determinar su composición y poder calorífico, así estableciendo la producción neta de energía de forma mensual y anual, como también su potencial como proyecto energético o de reducción de gases de efecto invernadero.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Antecedentes

En Guatemala se han hecho estudios sobre el aprovechamiento de los residuos sólidos biodegradables para la generación de biogás con fines energéticos, tanto en el uso doméstico reemplazando fuentes de calor como leña y carbón, como en el uso industrial para la generación de electricidad conectada a la red de distribución. A continuación, se presentan algunos casos de estudio y diseño de equipos generadores de biogás.

En la tesis de graduación *Diseño de un prototipo bioenergético, empleando residuos sólidos orgánicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala*, Barillas (2017), se estableció que los niveles de pH en la mezcla de compuestos biodegradables deben estar entre 6 y 8, fuera de estos valores de acidez el compuesto generará un biogás con un pobre contenido de metano, disminuyendo así sus cualidades energéticas. La temperatura de los biodigestores anaeróbicos debe ubicarse entre el rango de 30 °C y 40 °C, para fomentar el crecimiento de los microorganismos ligados a la descomposición de los residuos.

En la tesis de graduación titulada *Potencial de producción de biogás de los residuos orgánicos biodegradables de la terminal zona 4*, Alvarado (2017), se encontró que la fase más crítica durante el proceso de digestión anaeróbica es en la hidrólisis, en la cual se degradan los residuos orgánicos, el tiempo de duración de dicha etapa depende de la composición de los residuos, al tener residuos con compuestos complejos la degradación será más prolongada; se demostró que la temperatura es el factor determinante en la producción de

biogás, ya que al alcanzar los 33 °C se inicia la producción de gas dentro del biodigestor.

En otros países se encontraron estudios relacionados al tema de investigación, los cuales se presentan a continuación:

En la publicación *Evaluación de la pre-factibilidad de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás con estiércol de ganado vacuno o porcino en Cundinamarca*, Sánchez y García (2014), se encontró que para poder producir 3 Kwh eran necesarias 2.43 m<sup>3</sup> de gas, que equivalen a los residuos producidos de 40 reses; utilizando un sistema de recolección de biogás a partir de un biodigestor de polímero tipo tubular y una mezcla de agua y excretas de 4:1 para obtener la mayor cantidad de biogás, reduciendo la cantidad de sustrato generado.

En la publicación *Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: Una estrategia para diferentes contextos*, Carrasco (2015), se contempló la viabilidad técnica como económica de un proyecto de generación de biogás con fines energéticos, mencionando los puntos más importantes a considerar a la hora de incursionar en un proyecto de este tipo, entre los cuales se mencionan las propiedades físico-químicas del sustrato, el potencial de generación de biogás, la disponibilidad de materia prima y las distintas tecnologías para generación de gas tomando en consideración sus ventajas y desventajas dependiendo de las condiciones en las que se estará operando.

En la tesis de graduación *Producción de biogás en sustrato sólido mediante la digestión anaerobia de pulpa de café*, Rosa (2015), se demostró que el inóculo puede alterar la producción de biogás, al hacer una adaptación previa de la

biomasa a degradar, puede dar lugar a una mayor producción de biogás y metano. Así mismo, se expone un método analítico para el cálculo de metano considerando las condiciones ideales de trabajo, en promedio la capacidad calorífica del biogás es de 5500 Kcal/m<sup>3</sup>, siendo así un buen sustituto en actividades diarias que requieran combustibles fósiles.

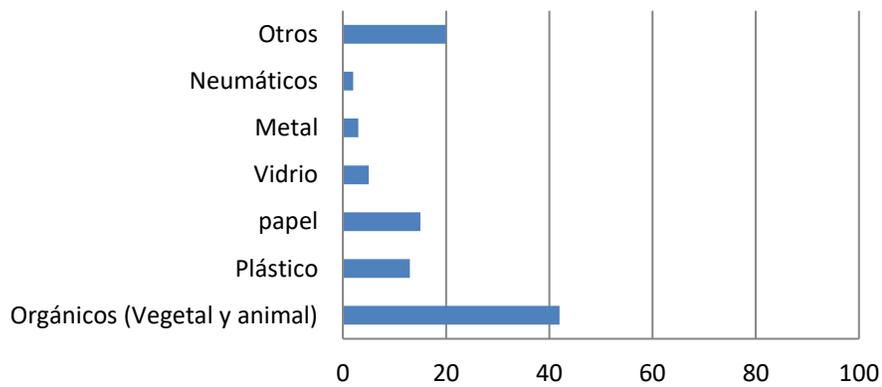
En la publicación *Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca*, Montenegro, Rojas, Cabeza y Hernández (2016), se encontró que los cultivos como el mango, la lima, la naranja, el tomate, la papa y las flores aportan un mayor porcentaje de sólidos volátiles, conteniendo en promedio 94.6 % de sólidos volátiles que favorecen la generación de metano, pero es necesario un proceso de codigestión para poder contrarrestar las deficiencias de los residuos y estimular la síntesis de enzimas que favorezcan el proceso.

En la tesis de graduación *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia a partir de aprovechamiento de sustratos orgánicos (pasta y aserrín)*, en la ciudad de Estelí en el año 2017, Sanabria, Sánchez y Rodas (2018), se determinó que un reactor tipo Batch muestra el mejor comportamiento al momento de iniciar una pequeña producción de biogás con fines energéticos o experimentales; se estima la producción de biogás en 23 a 30 días, pudiendo reducir el tiempo de producción si se incluye en el sustrato inóculos de materia fecal (estiércol animal) y controlando la temperatura dentro del biodigestor, la cual se estima entre 25 °C y 30 °C, siendo en los primeros días que alcance una temperatura por encima de los 30°C, estabilizándose después de la primera semana.

## 1.2. Residuos sólidos y su gestión

Los residuos sólidos representan toda la materia sobrante o de desecho tanto de procesos industriales como de desechos residenciales. Su origen proviene de la actividad humana como de la producción animal, por lo que pueden obtenerse tanto productos orgánicos como inorgánicos, los sólidos orgánicos representan casi el 50 % de los desechos generados, el otro 50 % representa materia que puede recuperarse, como lo es el papel, plástico, metales, cartón y vidrio. Otra parte de los desechos son los materiales que no se pueden recuperar debido a que son materiales peligrosos, nocivos o inertes, entre los principales podemos encontrar todos los desechos que generan los hospitales, así como los desperdicios generados de la actividad industrial (García, 2016).

Figura 1. **Composición de los residuos generados en el 2018**



Fuente: elaboración propia, con datos de Dirección de Gestión y Manejo de Residuos y Desechos Sólidos de la Municipalidad de Guatemala (2018). *Memoria de Labores 2018*.

### **1.2.1. Implicaciones medioambientales**

La expansión de la población, la sobreproducción y el uso frecuente de los productos desechables sobre los retornables ha causado que la acumulación de basura sea la principal causa de problemas ambientales en la actualidad. “Un cambio en la mirada desde el concepto de desechar, al de reducir y reutilizar, puede abrir el camino a la mitigación del problema” (Franco, 2019, p. 14).

La deficiente gestión de residuos puede ocasionar la contaminación del suelo y de los cuerpos acuíferos como ríos y lagos, muchos de los cuales son fuentes vitales para el sector económico. En las ciudades y comunidades urbanas puede ocasionar contaminación visual; sumado a ello la irresponsabilidad de los pobladores para el manejo de los desechos arrojándose a las calles o utilizando áreas que no son rellenos sanitarios, lo que originar olores fétidos y la aparición de insectos y plagas que pueden ser portadores de enfermedades.

Figura 2. **Acumulación de residuos sólidos en el lago de Amatitlán**



Fuente: Prensa Libre (2016). *Alarmante contaminación de ríos y lagos de Guatemala.*

## **1.2.2. Clasificación de los residuos sólidos**

Los residuos abarcan una gran variedad que dependen de factores como su procedencia, su naturaleza como desecho o su peligrosidad, a continuación, se mencionan algunas de ellas.

### **1.2.2.1. Según su origen**

En este tipo podemos clasificar los residuos según la actividad económica de donde provienen, ya sea de origen domiciliario, industrial, hospitalario, construcción y agroindustria. Esta forma de clasificación permite agrupar las actividades de donde provienen los residuos y desechos de una forma general, sin embargo, en algunas ocasiones es más importante conocer la procedencia de los residuos, como lo es en el caso de los residuos hospitalarios o los residuos mineros (García, 2016).

- Domiciliar: son todos los desechos que provienen de hogares o comercios pequeños, representan una mezcla entre materia orgánica e inorgánica como plástico, vidrio y metales; usualmente no se separan por lo que llegan a los vertederos como una mezcla de residuos (Franco, 2019).
- Industrial: son los residuos que se generan por la misma actividad industrial, el tipo de residuo dependerá del tipo de industria y su tecnología, pudiendo ser productos de limpieza o derivados del petróleo (García, 2016).
- Hospitalario: es un tipo de residuo que requiere un manejo especial debido a la actividad a la que está ligada, muchos de estos residuos pueden ser

infecciosos, cortantes y fármacos que deben ser desechados de manera especial (Franco, 2019).

- **Minero:** estos residuos incluyen los materiales que se obtienen de la remoción de tierras para poder acceder a los minerales requeridos. La minería ha resultado muy controversial en los últimos tiempos debido a los efectos negativos que genera y que en muchos casos afectan a la población aledaña (García, 2016).

#### **1.2.2.2. Según peligrosidad**

- **No peligrosos:** son todos aquellos materiales que no representan un peligro a las personas o animales, tal es el caso del papel y los metales comunes que no tengan aleaciones con elementos dañinos o estén contaminados de alguna otra forma (Recytrans, 2013).
- **Inertes:** son todos aquellos materiales que son estables con el paso del tiempo, por lo que no producen efectos nocivos al medio ambiente. Los materiales inertes no son solubles, ni tampoco reaccionan químicamente ante la presencia de otros agentes que puedan ser contaminantes o dañinos al ser humano y el medio ambiente, ejemplos de residuos inertes son los desechos de construcción como el ripio, pedrín y tierra (Recytrans, 2013).
- **Peligrosos:** es todo residuo que por sus características y propiedades puede causar enfermedades o la muerte, por lo que representa un serio riesgo para la salud del ser humano y del medio ambiente; por lo que deben de ser manejados y desechados de maneras específicas cumpliendo con normativos de seguridad (Recytrans, 2013).

### **1.2.2.3. Según composición**

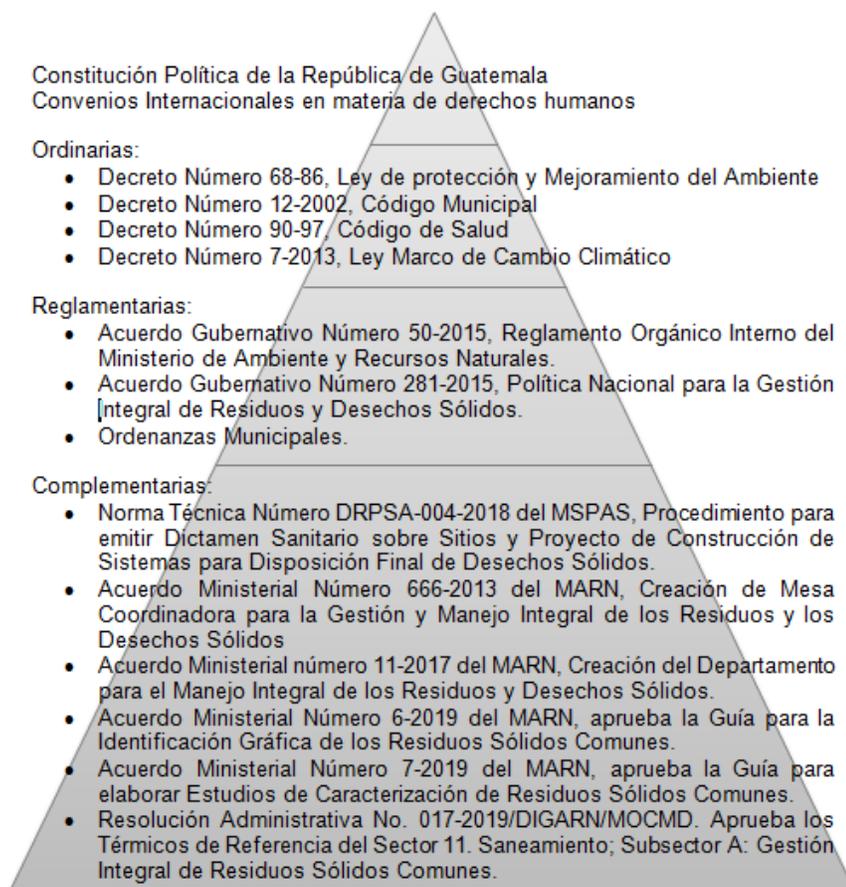
- **Orgánicos:** residuos de origen biológico, en el que podemos incluir restos de alimentos (vegetales, frutas, carnes), hojas y ramas de poda y heces de origen humano y animal.
- **Papel:** material hecho a partir de celulosa, entre los que podemos encontrar cartones, periódicos, servilletas, papel fotografía y celofán.
- **Metales:** todo material metálico ferroso y no ferroso, entre los más comunes encontramos el hierro, acero, cobre, aluminio y estaño. La mayoría de los derechos metálicos se encuentran como chatarra o piezas metálicas que ya no tienen uso (tuberías rotas, herramientas desgastadas, restos de construcción).
- **Vidrio:** es un material cerámico hecho a partir de silicio como materia prima, en su mayoría es reciclable y es implementado para diversas aplicaciones en la industria alimenticia (envases para alimentos y bebidas) como en la construcción y en automóviles.
- **Plásticos:** es un material sintético que se deriva del petróleo, es un material que tiene infinidad de aplicaciones debido a sus diferentes propiedades según qué tipo de plástico sea (PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS), su uso masivo en los diferentes ámbitos de la industria y la vida cotidiana hace que sea uno de los principales contaminantes del medio ambiente.

### **1.2.3. Gestión integral de residuos sólidos en Guatemala**

La Política Nacional para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos tiene como propósito fundamental establecer a través de programas y líneas de política, acciones para minimizar de la manera más eficiente los riesgos a los seres humanos y al ambiente, en especial la reducción de la cantidad o peligrosidad de los desechos sólidos que llegan a los sitios de disposición final a través de una gestión integral que contribuya al bienestar del ambiente y la salud.

La presente política se enfoca a toda clase de residuo y desecho sólido en general, es una Política Marco que orienta y plantea la necesidad de fortalecer el marco jurídico y normativo en la materia considerando las características en base al origen, composición o peligrosidad de los residuos y desechos sólidos. (Acuerdo Gubernativo 281-2015, 2015, p. 29)

Figura 3. **Normativa para la gestión de residuos en Guatemala**



Fuente: Ministerio de ambiente y recursos naturales (2019). *Normativa*. Consultado el 23 de septiembre de 2020. Recuperado de [https://www.marn.gob.gt/s/dsolidos/paginas/Normativa\\_1](https://www.marn.gob.gt/s/dsolidos/paginas/Normativa_1).

#### **1.2.4. Principios de la política integral de residuos de Guatemala**

Las políticas de gestión de residuos se sustentan en los aspectos regulatorios que se relacionan fuertemente con la conservación, protección y cuidado ambiental, por ende, están unidas a las políticas de conservación ambiental vigentes hasta la fecha.

En los convenios internacionales acordados por el gobierno de Guatemala, a efectos de reducir la acumulación de residuos sólidos y emisiones de gases de efecto invernadero, son relevantes las siguientes cuestiones para su funcionamiento:

- Derecho humano a un ambiente sano: todos los pobladores tienen el derecho de vivir en un ambiente saludable que garantice su bienestar y desarrollo seguro.
- Estado facilitador y solidario: el Estado de Guatemala deberá fomentar, apoyar y dar seguimiento a los proyectos que permitan fortalecer la descentralización económica, política y fiscal de la gestión ambiental y los recursos naturales. Asimismo, tiene el deber de fortalecer las acciones que promuevan la participación de los sectores públicos y privados para la gestión integral de los residuos y los desechos sólidos.
- Precautoriedad: el Estado de Guatemala, con la finalidad de proteger al medio ambiente deberá aplicar ampliamente el criterio de gestión integral del riesgo conforme a sus capacidades. “Cuando haya peligro de daño grave o irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del medio ambiente” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017, p. 37). Lo que significa que no es requerida una comprobación científica para demostrar sus efectos, solamente es necesario saber si genera malestar a la población, por lo que las autoridades de gobierno deberán de tomar las medidas para afrontar el problema social.

- Gestión integral del riesgo: comprende toda acción que prevenga, reduzca y elimine los riesgos para la población y el medio ambiente, es uno de los requisitos fundamentales para lograr la gestión integral de los residuos y desechos sólidos.
- Adaptabilidad: incorpora los efectos del cambio climático y los planes de proyecto para mitigar efectos en la población.
- Desarrollo sostenible: búsqueda de la mejora del desarrollo sostenible y equitativo para el mejoramiento de la calidad de vida de toda la población guatemalteca, sin generar alteraciones dañinas al ecosistema del país.
- Participación ciudadana y pertinencia cultural: promover la participación de toda la población del país sin importar su género, cultura o creencia, promoviendo el diálogo de la correcta gestión de los desechos.
- Educación ambiental con énfasis en la gestión integral de los residuos y desechos sólidos: implementar un diseño y sistema que permita la participación de toda la población, creando hábitos para el manejo de desechos y fomentando su implementación.
- Responsabilidad compartida pero diferenciada: la responsabilidad social y empresarial debe ser reconocida y asumida en forma diferenciada durante el ciclo de vida de los residuos por los diferentes participantes, los cuales son el sector público, privado, entidades de servicio y otras organizaciones de la sociedad civil, así como la población en general. Para ello, las entidades del Estado deben ejercer una constante vigilancia y control en forma coordinada con entidades encargadas de tratar los residuos, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de las medidas propuestas.

- Responsabilidad extendida: las entidades industriales deberán de implementar propuestas para la utilización de productos y materiales de calidad por medio de la recolección, tratamiento y reutilización o reciclaje de manera ecológica, garantizando la seguridad y salud de la población.
- Sanciones y multas: toda aquella entidad pública o privada que genere residuos deberá de comprometerse con los costos de la gestión integral y en caso de un mal manejo que ocasione repercusiones negativas al medio ambiente, la entidad deberá de hacerse responsable de dicha falta.

### 1.3. Proceso de digestión

Según Acosta y Abreu (2005), el proceso de digestión es:

Dependiendo de las sustancias y materias que forman los residuos, será de efectiva la degradación anaerobia. Mientras más compleja sea la mezcla mayor será el rendimiento del metano. Dicho esto podemos concluir que se requiere de un buen balance entre los nutrientes del sustrato, se plantea que debe regirse con base en la demanda química de oxígeno, buscando no tener un exceso de nitrógeno ya que este puede inhibir el proceso anaeróbico. (p.39)

Tabla I. Rendimiento de metano según el tipo de sustrato

Componente	% CH <sub>4</sub>	m <sup>3</sup> /Kg SV
Carbohidratos (C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> )	50.0	0.886
Grasas (C <sub>50</sub> H <sub>90</sub> O <sub>6</sub> )	70.0	1.335
Proteínas (6C.2NH <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O)	84.0	0.587

Fuente: Acosta y Abreu (2005). *La digestión anaeróbica. Aspectos teóricos parte I.*

### **1.3.1. Digestión aeróbica**

Este proceso consiste en la descomposición de la materia o desechos orgánicos en presencia de oxígeno, este proceso puede observarse en los vertederos al aire libre.

Por este medio los lodos o desechos se someten a una aeración prolongada en un tanque separador expuesto al aire libre, el proceso requiere que la materia orgánica se oxide para proceder a la descomposición, el cual puede requerir de algunos días y exceder por varias semanas dependiendo del tipo de desecho. A medida que avanza la oxidación de la materia, disminuye la tasa de crecimiento de las bacterias. Luego las fuentes de carbono en la materia orgánica se limitan junto con el oxígeno, seguido de ello los microorganismos comienzan a auto-oxidarse al no tener suficiente oxígeno para garantizar su crecimiento (Varnero, 2011).

El proceso de digestión aeróbica presenta grandes ventajas a la hora de implementarse, como lo es la reducción de los malos olores, reducción de sólidos volátiles en los desechos, desinfección del lodo resultante, y un bajo costo de implementación a diferencia de un sistema anaeróbico, sin embargo presenta grandes desventajas como lo son la falta de parámetros para su diseño, presenta una elevada dificultad para separar el lodo por medios mecánicos y presenta una acumulación de sólidos debido a su proceso de reposo (Varnero, 2011).

### **1.3.2. Digestión anaeróbica**

Es un proceso de digestión microbiana en ausencia de oxígeno, que da como resultado una mezcla de gas suspendido (biogás) y lodos donde se

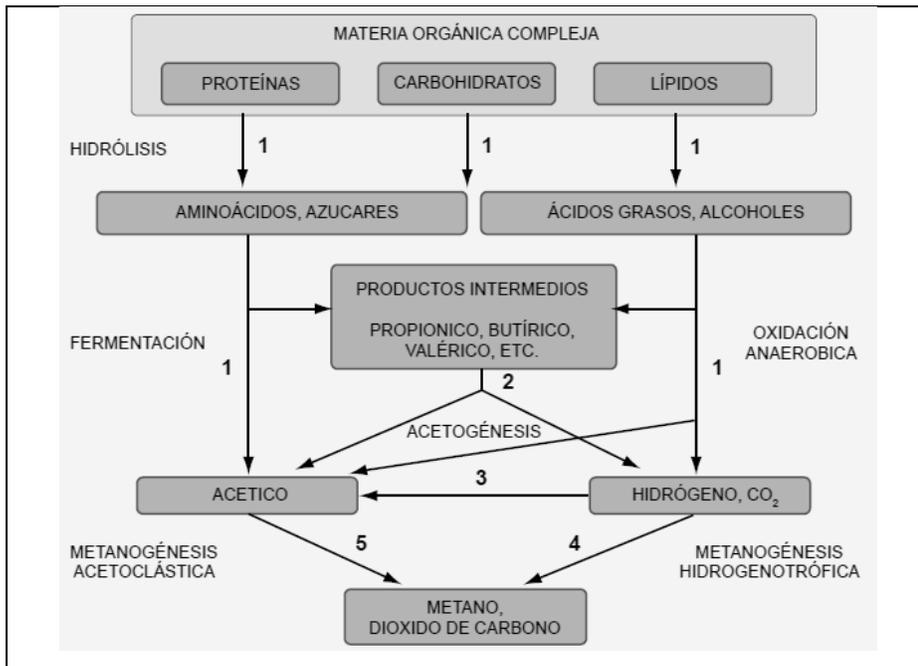
encuentran los microorganismos responsables de la fermentación de la materia orgánica.

Por medio de este proceso es posible tratar grandes cantidades de materia biodegradable de origen animal o vegetal (estiércol, vegetación, viseras) y convertirlos en biogás que es su subproducto principal; la cantidad de gas que puede producir depende de la mezcla de residuos, pero se encuentra alrededor de 350 l/Kg de sólidos degradables con un contenido de metano alrededor de 70 %. Aunque el gas generado tenga un poder calorífico menor en comparación al gas natural o cualquier otro combustible (3,500 Kcal/m<sup>3</sup>), tiene la ventaja de que es un recurso renovable y que puede producirse en casi cualquier lugar que genere desechos, como lo son ciudades, mercados, fincas ganaderas y plantaciones (Acosta y Abreu, 2005).

### **1.3.3. Principios de la fermentación anaeróbica**

La digestión es un proceso complejo en el que están involucradas varias etapas, entre las principales que se encuentran involucradas se mencionan la hidrólisis, la etapa fermentativa, la etapa acetogénica y la etapa metanogénica (Ortiz, 2017).

Figura 4. **Diagrama de las reacciones involucradas en la digestión anaeróbica**



Fuente: Varnero (2011). *Manual de biogás*.

### 1.3.3.1. Hidrólisis

Los desechos orgánicos poliméricos no pueden ser utilizados en el proceso de digestión hasta que se hidrolicen en compuestos solubles. La hidrólisis por lo tanto es el proceso en donde los compuestos poliméricos se hidrolizan por enzimas excretadas de bacterias que actúan en el exterior de la célula, convirtiendo de esta forma los polímeros en sus respectivos monómeros para proseguir con las etapas de fermentación (Acosta y Abreu, 2005).

La etapa de hidrólisis puede repercutir en la velocidad del proceso de digestión anaeróbica, en especial si la mezcla de compuestos orgánicos contiene un gran porcentaje de sólidos. Además, que en esta etapa se encuentran otros

factores que pueden afectar su proceso como lo son la temperatura, los niveles de pH, la retención hidráulica, así como la composición propia del sustrato (Varnero, 2011).

#### **1.3.3.2. Etapa fermentativa**

Durante esta etapa los compuestos orgánicos solubles se fermentan, la materia resultante será utilizada por las bacterias metanogénicas y acetogénicas. La importancia del proceso radica en que durante esta fermentación se producirán ácidos orgánicos como el acético, el propiónico y el butírico (Acosta y Abreu, 2005).

#### **1.3.3.3. Etapa acetogénica**

También llamada acidogénesis, es la materia resultante de la etapa anterior convertida en ácidos, materiales importantes para la formación de metano. Un tipo de bacteria acetogénica es la homoacetogénica, la cual se prolifera en presencia de azúcares produciendo acetato como producto de su metabolismo (Varnero, 2011).

Luego de que la mayoría de las bacterias anaeróbicas hayan consumido su alimento de los residuos, darán paso a productos ácidos volátiles que son utilizados como sustratos para las bacterias de la etapa metanogénica (Corrales, Romero, Macías y Vargas, 2015).

#### **1.3.3.4. Etapa metanogénica**

En esta etapa se metabolizan los productos de las etapas anteriores, dando como resultado el metano ( $\text{CH}_4$ ), así como una mezcla de hidrógeno y dióxido de

carbono, completando el proceso de digestión; aproximadamente el 70 % del metano producido en el biodigestor viene de la descarbonización del ácido acético (Acosta y Abreu, 2005).

#### **1.3.4. Microorganismos involucrados**

A continuación, se presentan las bacterias que repercuten en cada etapa del proceso de digestión anaerobia.

##### **1.3.4.1. Bacterias que participan de la hidrólisis**

“Entre los microorganismos que contribuyen con esta etapa, destacan los siguientes: *Bacteroides*, *Lactobacillus*, *Propionibacterium*, *Sphingomonas*, *Sporobacterium*, *Megasphaera*, *Bifidobacterium*” (Corrales, Romero, Macías y Vargas, 2015, p. 60).

##### **1.3.4.2. Bacterias que participan de la acidogénesis y acetogénesis**

En estas etapas contribuyen los mismos microorganismos, entre los que destacan: *Clostridium*, *Paenibacillus* y *Ruminococcus*, también podemos mencionar los *Syntrophobacter* que se especializan en la oxidación de propano y ácidos grasos que contribuirán en la etapa metanogénica (Corrales, Romero, Macías y Vargas, 2015).

### 1.3.4.3. Bacterias que participan de la metanogénesis

En esta fase la descomposición se ve dominada por un grupo específico de organismos, entre los cuales destacan *Bacteroides*, *Clostridium*, *Bifidobacterium*, *Sphaerophorus*, *Fusobacterium*, *Veillonella*, *Peptococcus*, *Desulfovibrio* y *Methanobacterium* (Corrales, Romero, Macías & Vargas, 2015).

Tabla II. Microorganismos presentes en las 3 etapas de la digestión

Etapa	Género
No metanogénica	<i>Lactobacillus</i> , <i>Spirillum</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Actinomyces</i> , <i>Vibrio</i> , <i>Corynebacterium</i> , <i>Bacillus</i> , <i>micrococcus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Alcaligenes</i> , <i>Sacina</i> , <i>Aerobacter</i> , <i>Bacteroides</i> , <i>Clostridium</i> , <i>Bifidobacterium</i> , <i>Sphaerophorus</i> , <i>Fusobacterium</i> , <i>Veillonella</i> , <i>Peptococcus</i> , <i>Deulfovibrio</i> .
Metanogénica	<i>Methanobacterium</i> , <i>Methanococcus</i> , <i>Methanospirillum</i> , <i>Methanobrevibacter</i> , <i>Methanomicrobium</i> .

Fuente: Acosta y Abreu (2005). *La digestión anaeróbica. Aspectos teóricos parte I.*

### 1.3.5. Relación carbono/nitrógeno

En la formación de metano no solo se debe de considerar las bacterias que actúan en cada etapa, también debe de considerarse la calidad de la materia a utilizar, debido que ella representara la fuente de energía necesaria para que las bacterias puedan iniciar el proceso de formación de metano. El carbón y el nitrógeno son las fuentes principales de alimento para las bacterias, por lo que su relación fomentará el crecimiento de estas.

Según Varnero (2011), la relación óptima debe de ser entre 30:1 hasta 20:1 esto debido que al aumentar la relación el crecimiento de bacterias será más prolongado y lento y si la relación baja por debajo de 20 puede inhibir el proceso debido que el alimento de las bacterias escasea.

#### **1.4. Reactores anaeróbicos**

El reactor o digestor es la parte principal y donde se llevan a cabo todas las transformaciones químicas y físicas de los residuos orgánicos, contiene la carga de residuos, así como los gases resultantes, por lo que su hermeticidad debe estar garantizada. Dependiendo de la aplicación o del tipo de materia prima el reactor tendrá distintas configuraciones y componentes que permitirán utilizar los gases y los lodos de manera segura para la aplicación.

##### **1.4.1. Reactor continuo**

Como su nombre lo indica este tipo de configuración fue diseñado para la alimentación continua de sustratos o residuos sólidos, principalmente aguas negras. Usualmente son plantas de gran tamaño que generan grandes cantidades de gas que se aprovecha en la industria o en poblaciones pequeñas como fuente de energía (Bautista, 2010).

##### **1.4.2. Reactor semicontinuo**

Es el tipo de configuración más común en áreas rurales o sistemas domiciliarios con poca demanda energética que no tenga acceso al servicio eléctrico. Su nombre proviene de que la carga de residuos ingresa en el reactor y permanece un tiempo retenido dentro de él, luego es removido el lodo para dar

paso a una nueva carga. Entre los reactores más usados de esta configuración se encuentran el tipo Chino y el Hindú (Varnero, 2011).

#### **1.4.3. Reactor discontinuo o de régimen estacionario**

En esta configuración los reactores se cargan completamente con los residuos y luego se sella el reactor, la evolución de la producción de biogás sigue la tendencia de microorganismos por lo que luego de un tiempo de retención la producción de gas disminuye, por lo que se procede a retirar la materia resultante y se carga nuevamente con materia. En esta configuración se puede usar cualquier residuo con un alto contenido de sólidos, como vegetación o residuos pastosos de ganado (Bautista, 2010).

#### **1.4.4. Componentes de un digestor anaeróbico**

El reactor dependiendo del tipo se compone de diferentes partes que contribuyen en el proceso de digestión, a continuación, se denotan las principales.

##### **1.4.4.1. Reactor**

Representa el cuerpo del digestor, la parte más importante del sistema ya que dentro de él ocurren los respectivos procesos químicos y físicos para la generación de biogás.

Los reactores pueden tener diversas formas, pero usualmente son cilíndricos o rectangulares, deben ser herméticos para evitar fuga de metano y malos olores, algunos de estos son construidos bajo tierra para facilitar la afluencia de residuos (modelo Chino y modelo Hindú).

#### **1.4.4.2. Cúpula**

Representa la parte superior del reactor, dentro de él se almacenan los gases generados por la digestión, pueden ser de ladrillo rígido (tipo Chino) o de polímero en forma de tubo (tipo horizontal). Según Varnero (2011), “tiene como función proteger la estructura del tanque del exceso de presiones positivas causadas por la extracción de lodos en los reactores continuos o semicontinuos” (p. 80).

#### **1.4.4.3. Válvulas de seguridad**

La válvula de seguridad se coloca en la tubería del sistema de gas, su función es proteger contra las sobrepresiones de gas que se acumula en la cúpula y la tubería, al detectar dicha presión la válvula se abrirá y dejará escapar gas para recuperar las presiones deseables de operación.

#### **1.4.4.4. Medidor de gas**

Medidor que indica el caudal de gas que sale de la cúpula del digestor, cuentan con dispositivos de seguridad y en algunos casos se combinan con válvulas de regulación de caudal.

#### **1.4.4.5. Sistema de gas y quemador**

En el sistema de gas se agrupan todos los componentes que permiten el almacenamiento, la conducción y el control del gas del reactor, en ellas podemos agrupar las tuberías de gas, las válvulas de protección, los sistemas de medición de presión y temperatura y los filtros, estos componentes variarán dependiendo

de si el gas será usado para generación de energía eléctrica o será quemado en su totalidad.

“Los quemadores son antorchas que como su nombre indica queman el gas sobrante del reactor y en algunos casos queman todo el gas producido del reactor con la finalidad de disminuir la cantidad de metano que ingresa a la atmósfera” (Varnero, 2011, p. 82).

#### **1.4.5. Tipos de reactores para medios rurales**

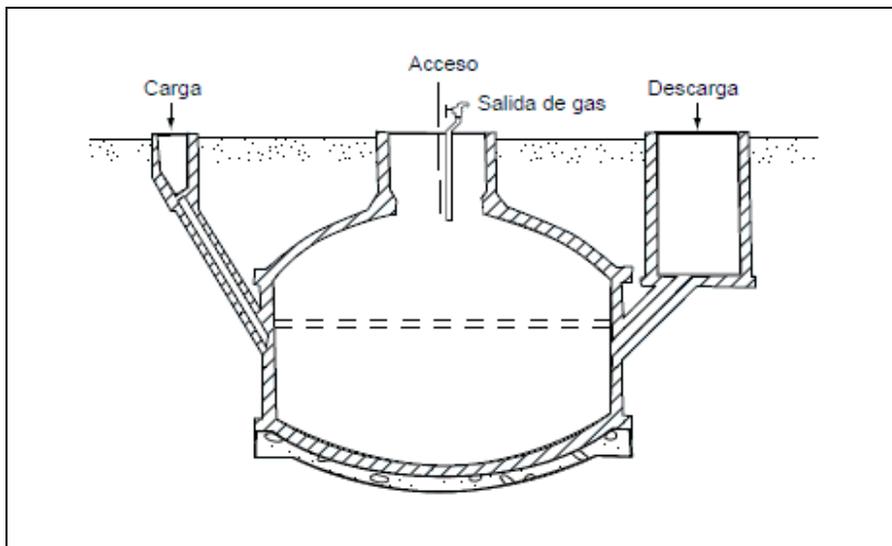
A continuación, se denotan los tipos más comunes en los medios rurales.

##### **1.4.5.1. Modelo Chino**

Este reactor consiste en una cámara de gas construida de ladrillos o de hormigón, formada por un cilindro en cuyos extremos se colocan semiesferas que retendrán los residuos en el fondo y el gas en la parte superior.

El interior es completamente aislado para evitar filtraciones y la tubería de la entrada está nivelada en los extremos con la tubería de descarga; el gas se acumula en la cúpula y al no ser flexible su presión incrementa entre 1 y 1.5 m de columna de agua. Este sistema tiene la ventaja de poseer una mayor vida útil debido a su sencilla construcción y funcionamiento, se estima que en China se encuentran funcionando más de 5 millones de estos digestores (Bautista, 2010).

Figura 5. **Biodigestor modelo Chino**



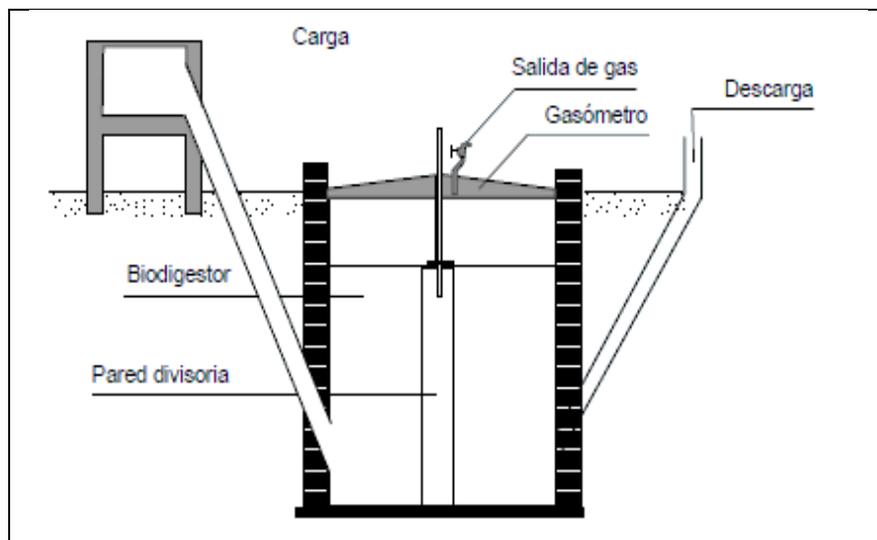
Fuente: Varnero (2011). *Manual de Biogás*.

#### 1.4.5.2. **Modelo Hindú**

Según Forget (2011) menciona que:

Consiste en un pozo o tambor hecho de ladrillo y reforzado con hormigón, el domo es de plástico y se desplaza por medio de una guía que se instala en el centro del pozo. Este tipo de reactor es de carga semicontinua y es de sencilla operación; funciona a través de presiones constantes por lo que se comporta de buena manera con equipos alimentados con gas. (p.12)

Figura 6. **Biodigestor modelo Hindú**

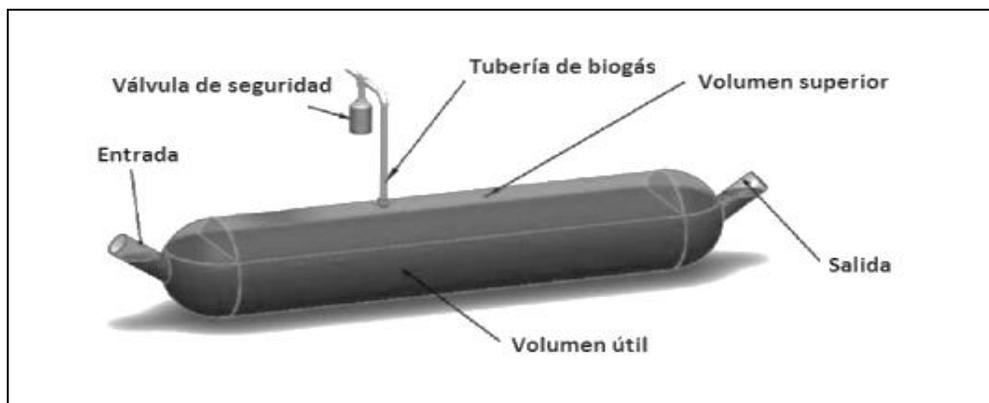


Fuente: Varnero (2011). *Manual de Biogás*.

#### 1.4.5.3. **Horizontal**

Consiste en un reactor enterrado en una zanja, tiene la particularidad de que no es una estructura fija, sino que es una estructura flexible hecha de nylon, neopreno y polietileno, lo cual disminuye el costo de construcción. Se operan en régimen semicontinuo y se utilizan para volúmenes mayores a 15 m<sup>3</sup> debido a la dificultad de construir un pozo para un digestor vertical convencional (Forget, 2011).

Figura 7. **Biodigestor horizontal**



Fuente: Ecocosas (2019). *Qué es y cómo se hace un biodigestor*. Consultado el 23 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://ecocosas.com/energias-renovables/biodigestor/>.

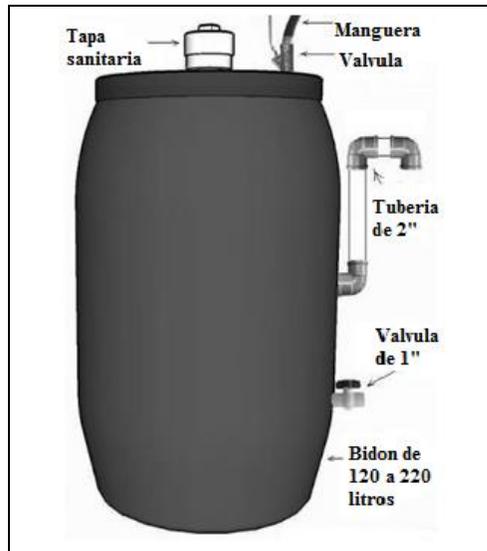
#### 1.4.5.4. **Tipo *batch***

Consiste en un tanque hermético con una salida de gas en la parte superior; se utilizan varios tanques debido a su funcionamiento, mientras que unos se encuentran en la etapa de carga de residuos, los otros se encuentran en la etapa de producción de gas. Este sistema se utiliza en aplicaciones donde se tiene dificultad para la obtención o almacenamiento de la materia prima, así mismo cuando la materia es complicada de digerir metagénicamente.

Las ventajas que presenta este tipo son las siguientes:

- Menor volumen de agua
- Menor volumen de espacio
- No sufre cambios violentos de temperatura
- No requiere cuidado especial

Figura 8. **Biodigestor tipo *batch***



Fuente: Ecoinventos (2020). *Cómo hacer un biodigestor casero*. Consultado el 30 de agosto de 2020. Recuperado de <https://ecoinventos.com/biodigestor-casero/>.

#### **1.4.5.5. Reactor de alta velocidad**

Son los más usados en la industria, similar al modelo hindú debido a que opera a presión constante, “consta de un sistema de agitación mecánica que permite que la materia que no ha sido digerida entre en contacto con las bacterias, ocasionando un tiempo de retención hidráulica más corto, de aproximadamente 2 semanas” (Bautista, 2010, p. 37).

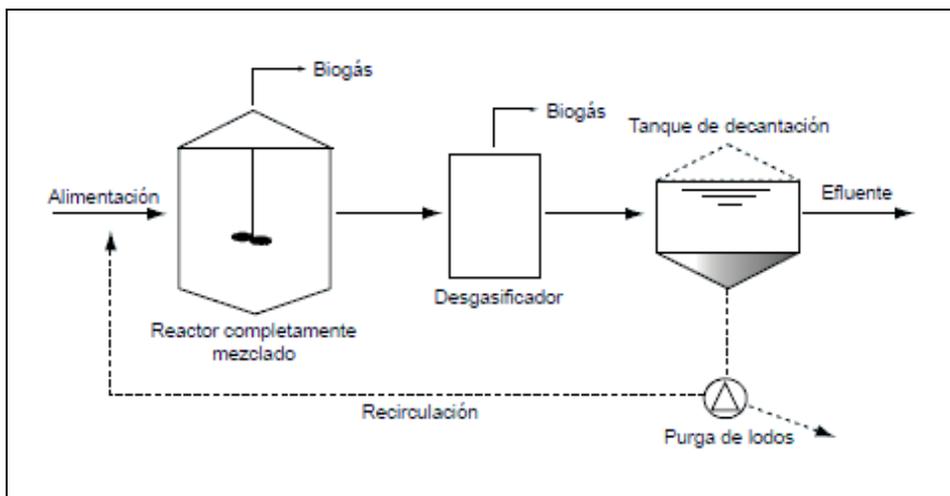
#### **1.4.5.6. Reactor de contacto**

Se compone de un reactor anaerobio convencional con agitador, donde se pone en contacto el residuo que alimenta el reactor con el residuo que existe dentro del mismo. Este proceso de agitación permite que los compuestos

orgánicos se descomponen de manera más uniforme, al mismo tiempo permite reducir la retención hidráulica a un intervalo de 12 a 24 horas.

“La eficiencia de todo el proceso está estrechamente ligada a los sedimentos que se generen en el tanque desgasificador antes de ingresar al tanque decantador para seguir con el proceso” (Varnero, 2011, p. 86).

Figura 9. **Biodigestor de contacto**



Fuente: Varnero (2011). *Manual de Biogás*.

### 1.5. **Biogás como fuente energética**

El biogás es el principal producto generado de la digestión anaerobia dentro de los reactores, el gas está compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y en menor medida hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). Su densidad es menor a la del aire y su llama puede alcanzar los  $870\text{ }^\circ\text{C}$ .

Ortiz (2017) establece que “si su contenido de metano cae por debajo del 50 % del volumen producido, el gas deja de ser inflamable, por lo tanto, su aplicación para fines energéticos se ven mermadas” (p. 11).

Tabla III. **Características generales del biogás**

<b>Valores</b>	<b>Características</b>
	55 – 70 % metano
Composición	30 – 45 % dióxido de carbono
	Otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 Kwh/m <sup>3</sup>
Temperatura de ignición	650 – 750 °C
Presión Crítica	74 – 88 atm
Densidad normal	1.2 Kg/m <sup>3</sup>
Olor	Huevo podrido en caso de que no haya sido desulfurado
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Equivalente de combustible	0.6 – 0.65 Lt de petróleo/m <sup>3</sup> de biogás

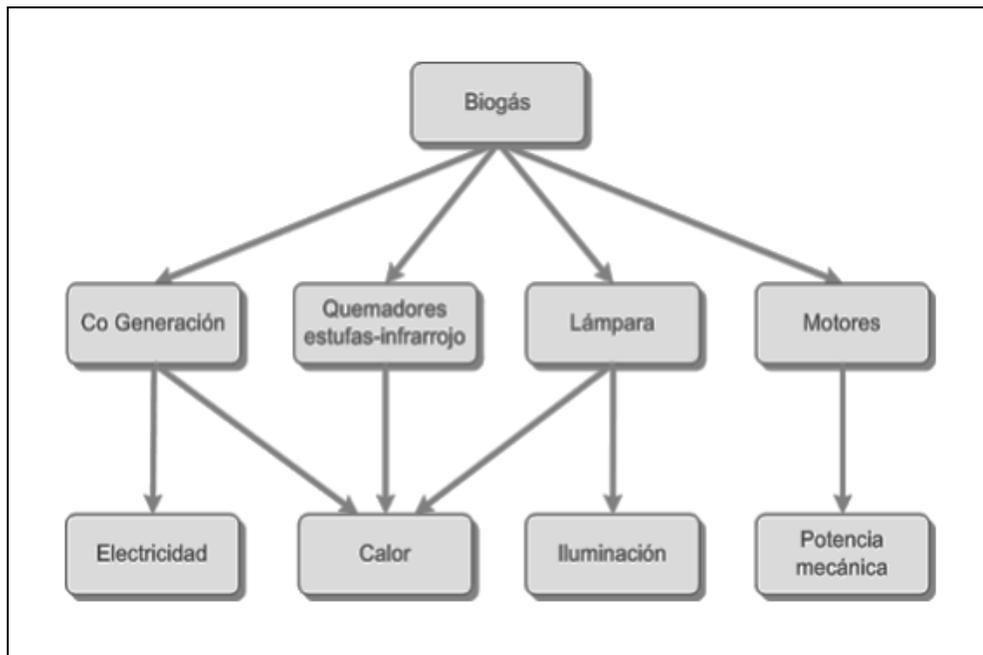
Fuente: Varnero (2011). *Manual de Biogás*.

### **1.5.1. Aplicaciones para el biogás**

El biogás es el producto principal del proceso de digestión, a pesar de poseer un poder calorífico inferior a otros combustibles (metano, propano, gas natural, gasolina), presenta la ventaja de ser un producto renovable, por lo que es prácticamente infinito, aumentando su atractivo y considerándolo como fuente energética en áreas con poco o ningún acceso a la energía eléctrica. Algunos ejemplos de su aplicación son la producción de calor, la generación de energía

eléctrica, como combustible de vehículos o maquinaria y en algunos casos la quema del gas para la reducción de gases de efecto invernadero según políticas medioambientales.

Figura 10. **Aplicaciones del biogás**



Fuente: Bautista (2010). *Sistema de biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos*.

### 1.5.1.1. **Generación de electricidad o calor**

Algunos sistemas producen una combinación entre calor y electricidad, siendo la electricidad el producto principal y el calor remanente el producto secundario. “La combinación permite un aumento de eficiencia que no se conseguiría con medios convencionales” (Varnero, 2011, p.56).

Para la generación de electricidad se utilizan comúnmente motores de combustión interna de ignición por chispa adaptados para funcionar con gas, esto

requiere de filtros desulfuradores y trampas de agua que limpien el biogás antes de entrar a la máquina. Según Bautista (2010), “para pequeñas centrales de generación se requieren aproximadamente 2.43 m<sup>3</sup> de gas para producir 3 Kwh de electricidad” (p. 27).

#### **1.5.1.2. Combustible de motores**

En la actualidad existe una gran cantidad de vehículos y motores que utilizan gas como combustible, la mayoría de estos vehículos son agrícolas, montacargas o adaptaciones para utilizar gas debido a que es más fácil obtenerlo o generarlo en comparación a otros combustibles. “El biogás puede utilizarse debido a que presenta características similares al gas natural” (Varnero, 2011, p.56).

Sin embargo, presenta desventajas que lo limitan:

- El biogás debe ser purificado antes de almacenarse en tanques de alta presión.
- La conversión de los motores es relativamente costosa y no es tan abundante la red de suministro de gas.
- Se requiere de una inversión elevada para el almacenamiento y generación de biogás para su uso en vehículos.

#### **1.5.1.3. Antorchas de quema de gas**

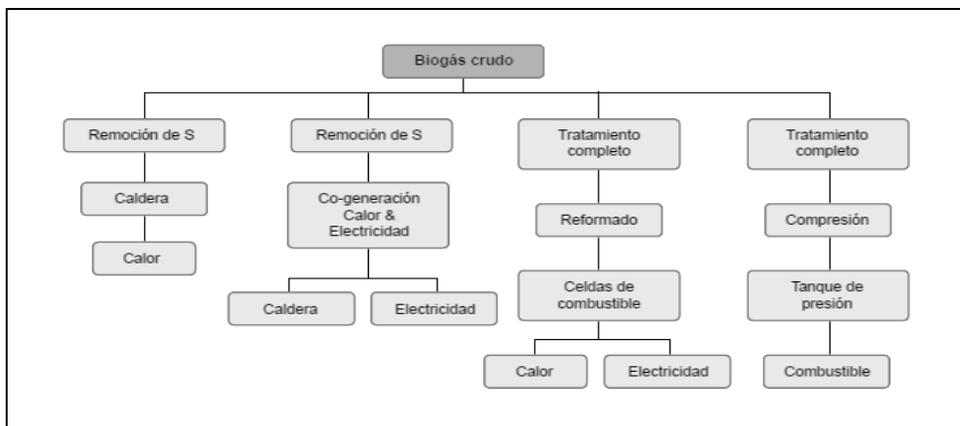
Las antorchas son elementos para la protección del medio ambiente debido a que los productos de la combustión son menos nocivos, reduciendo 21 veces

el potencial de gas de efecto invernadero del biogás. Sin embargo, su uso exige un control de emisiones y en la mayoría de las plantas se utiliza como componente de seguridad para quemar los gases excedentes.

### 1.5.2. Purificación y adaptaciones para aprovechamiento

El biogás generado en los digestores no es puro, contiene partículas de otros gases que afectan en su rendimiento y el tiempo de vida de los equipos, la purificación permite aumentar el poder calorífico del gas al remover partículas de agua y gases no inflamables, así como cumplir con requerimientos para equipos como calderas, motores, generadores y tuberías (Varnero, 2011).

Figura 11. Alternativas de purificación



Fuente: Varnero (2011). *Manual de Biogás*.

Según Varnero (2011), entre las alternativas de filtrado y purificación del biogás encontramos las siguientes:

- Remoción de CO<sub>2</sub>: el dióxido de carbono representa entre el 30 % y 45 % del biogás, con el fin de alcanzar un alto contenido de

metano se procede a separar el CO<sub>2</sub> para que el porcentaje de metano en el gas supere el 95 %. Existen diversas tecnologías que permiten remover el CO<sub>2</sub>, entre los que destacan diafragmas, adsorción y criogenización.

- Remoción de humedad (vapor de agua): el biogás en su mayoría sale del biodigestor saturado de vapor y humedad que obtiene por la temperatura y composición del residuo en su interior, debido a esto se colocan filtros y trampas de agua para reducir su contenido de humedad.
- Remoción de sulfuro de hidrógeno: el sulfuro es un elemento que debe de extraerse del gas debido a su alta capacidad para corroer metales, su forma de tratamiento es posible gracias a microorganismos, reacciones químicas con compuestos de hierro o filtrado con carbón activo.
- Remoción de oxígeno: no es requerido el filtrado del oxígeno en el biogás, aunque puede realizarse en casos especiales, utilizando filtros de carbón o diafragmas. (pp. 57-64)

### **1.5.3. Usos del residuo o lodo de digestión**

Los residuos o lodos del proceso de digestión son un subproducto de la digestión anaeróbica en los reactores, debido a las reacciones químicas esta materia es rica en elementos minerales, lo que lo convierte en un excelente fertilizante y según el tipo de reactor el lodo puede presentarse de 2 formas.

- Líquido: generado en biodigestores continuos, presentan un bajo contenido de sólidos totales y presentan una dificultad en empaque y transporte debido a su presentación física.
- Sólido: proviene de reactores semicontinuos y discontinuos, son los más usados como fertilizantes debido a su presentación similar a otros fertilizantes en el mercado, puede secarse para reducir el contenido de agua que presenta luego del proceso de digestión.

Los lodos de digestión o biofertilizantes representan un beneficio ambiental debido a que sus emisiones de GEI desde su producción hasta su utilización son menores en comparación a otros fertilizantes. “Debido a que son ricos en minerales y pueden obtenerse en grandes lotes, son usados para recuperar los suelos degradados, reduciendo el uso de fertilizantes químicos que son costosos y una fuente importante de emisiones de GEI” (Garra, Pequeño y De la Cruz, 2011, p. 8).

## **2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS**

Debido a las actividades comerciales que se realizan diariamente en el mercado La Parroquia, esta presenta una generación constante de residuos, el cual se compone de una mezcla de diversos materiales orgánicos como inorgánicos. Algunos de los desechos son recolectados por personas ajenas al proceso debido a su uso (cajas de cartón o madera), el resto es transportado a un vertedero autorizado.

### **2.1. Histórico de generación de residuos**

El mercado La Parroquia cuenta con un área de recolección donde almacena la basura que será recolectada por el servicio de recolección municipal que posteriormente traslada los desechos a los vertederos autorizados por la municipalidad, este servicio lo realiza de 4 a 5 veces a la semana debido al volumen de residuos que maneja y la ubicación del mercado que es en un área céntrica de la ciudad.

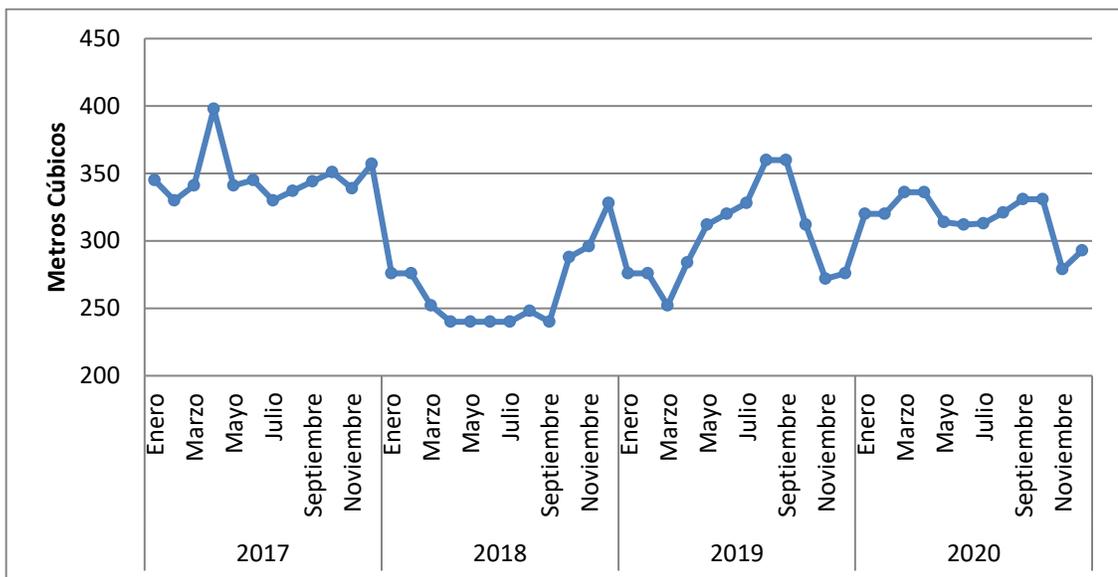
La operación es gestionada por el departamento de limpieza pública de la municipalidad de Guatemala, debido a ello y a los controles para determinar la procedencia de dichos residuos, el departamento realiza una medición del volumen que transportan semanalmente sus unidades de recolección. La medición se realiza para determinar el volumen y peso de materia que es transportada en cada viaje y para determinar si requieren más camiones para la recolección o si incrementa o disminuye la generación de residuos.

Tabla IV. **Estadística de recolección de desechos sólidos en mercados y satélites enero 2020**

<b>RECOLECCIÓN DE BASURA EN LOS MERCADOS (METROS CÚBICOS)</b>							
<b>MERCADOS</b>	<b>21 AL 26</b>	<b>27 AL 01</b>	<b>02 AL 07</b>	<b>08 AL 13</b>	<b>14 AL 20</b>	<b>TOTAL</b>	
1	BETHANIA	40	36	38	40	38	192
2	CANDELARIA	15	15	18	13	20	81
3	CENTRAL	56	70	63	58	61	308
4	CERVANTES	22	18	18	20	18	96
5	COLÓN	44	47	43	50	48	232
6	EL AMATE	42	63	54	49	48	256
7	EL GALLITO	44	40	46	39	53	222
8	EL GUARDA	219	218	233	207	219	1096
9	FLORES	55	58	55	49	59	276
10	GRANERO	1543	1549	1544	1551	1553	7740
11	LA ASUNCIÓN	12	13	12	14	11	62
12	LA FLORIDA	86	92	88	85	81	432
13	LA PALMITA	67	70	69	66	64	336
14	LA PARROQUIA	64	66	63	64	63	320
15	LA PLACITA	84	87	83	82	88	424
16	LA PRESIDENTA	40	37	41	40	37	195
17	LA REFORMITA	28	32	29	26	25	140
18	LA VILLA	31	30	29	31	31	152
19	ROOSEVELT	71	71	73	72	73	360
20	SAN JOSÉ	42	39	40	38	39	198
21	SAN MARTIN	121	123	121	122	121	608
22	SANTA FE	24	27	29	29	27	136
<b>TOTAL DE RECOLECTADO</b>						<b>13862</b>	
<b>MERCADOS SATÉLITES</b>	<b>21 AL 26</b>	<b>27 AL 01</b>	<b>02 AL 07</b>	<b>08 AL 13</b>	<b>14 AL 20</b>	<b>TOTAL</b>	
23	GERONA	12	11	12	12	12	59
24	3 DE MAYO Z.6	24	22	19	22	20	107
25	AVE ELENA Z.3	13	13	11	10	11	58
26	JUSTO R. BARRIOS	14	15	16	13	14	72
27	MAYA Z.18	36	34	34	35	36	171
28	STA. ANA	22	19	20	20	21	102
29	TIERRERO	10	11	9	9	10	49
<b>TOTAL DE RECOLECTADO</b>						<b>618</b>	

Fuente: Departamento de limpieza pública (2020). *Memoria de labores.*

Figura 12. **Histórico de recolección de residuos del mercado La Parroquia**



Fuente: elaboración propia, con información del departamento de limpieza pública (2020).  
*Memoria de Labores.*

## 2.2. Recolección y separación de muestras

Para la categorización efectiva de los residuos generados se recolectaron muestras durante una semana, la recolección se realizó utilizando un recipiente plástico de 18.90 Lt de capacidad, en el cual se recolectó una mezcla de residuos que contenía tanto materia orgánica como inorgánica, previo a la separación de materia según su tipo de residuo (plástico, cartón, metal, vidrio, entre otros).

Se recolectaron 5 muestras a lo largo de la semana para corroborar los porcentajes de materia generada y estimar los volúmenes de materia orgánica en función de los porcentajes calculados en la caracterización.

Figura 13. **Recolección de residuos**



Fuente: [Fotografía de Carlos Eduardo García]. (Mercado La Parroquia, Guatemala. 2020).  
Colección particular. Guatemala.

Las muestras luego de ser recolectadas son trasladadas al área de experimentación donde por medio de una inspección minuciosa se separarán todos los tipos de materias que contienen y separando toda la materia orgánica de la inorgánica.

### **2.3. Determinación de la fracción biodegradable**

Luego de la separación de la materia orgánica vegetal del resto de los residuos, esta se vuelve a clasificar para retirar materiales que no se degradan tan fácilmente como algunas semillas grandes (aguacate), al momento de terminar la separación se procede a romper la materia para llevarlas a un tamaño menor que no obstruya el digestor y que permita la digestión de mejor manera.

Se vuelven a recolectar en recipientes plásticos de 18.90 Lt y se procese a pesar las muestras de materia vegetal por medio de una balanza semi-industrial, determinando la densidad de residuos vegetales y preparándose para ingresar al biodigestor e iniciar el proceso que descompondrá la materia y generará biogás.

La materia vegetal debe de analizarse para determinar su contenido sólido volátiles y sólidos totales, además de conocer su porcentaje su potencial de acidez y densidad, esto nos permitirá determinar en base a la densidad el peso total de la materia que se genera en el mercado, junto con la cantidad de material que puede quedar luego de desprender los gases de digestión.

En función del volumen de total del biodigestor se prepara un volumen de materia vegetal, según Varnero (2011) la mezcla ideal de materia orgánica debe de ser de 3 Lt de agua por cada litro de materia orgánica y esta mezcla debe representar el 75 % del volumen total del reactor. La materia vegetal que se utilizará posteriormente para las cargas diarias debe de seguir la misma relación de volúmenes y no debe de contener materia de origen animal (grasas, huesos, carne, cornamentas) ya que afectarían el rendimiento del digestor o la formación de microorganismos.

Figura 14. **Separación de materia vegetal**



Fuente: [Fotografía de Carlos Eduardo García]. (Mercado La Parroquia, Guatemala. 2020).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 15. **Pesaje de materia vegetal**



Fuente: [Fotografía de Carlos Eduardo García]. (Mercado La Parroquia, Guatemala. 2020).  
Colección particular. Guatemala.

### **3. BIODIGESTOR PARA GENERACIÓN DE BIOGÁS**

La carga del biodigestor representa el inicio del proceso de generación de biogás y es parte fundamental en el proceso junto con el biodigestor, debido que en él se llevan a cabo todas las reacciones químicas necesarias para el proceso, la selección, diseño y operación de un biodigestor para el proceso de experimentación se explicaran a continuación.

#### **3.1. Selección del biodigestor**

Previo a la caracterización de la materia orgánica para el proceso de generación de biogás se selecciona el tipo de biodigestor a utilizar tomando en cuenta características como la materia a utilizar y la aplicación que se dará al gas resultante.

Se consideró que el área de experimentación no cuenta con un espacio para almacenar por mucho tiempo los residuos necesarios para la carga del biodigestor, además de que la materia prima es materia vegetal sin ningún tipo de residuo animal o estiércol por la ubicación del mercado. Para el reactor experimental se optó un sistema discontinuo con un biodigestor tipo *batch* debido a las características de espacio que se cuentan el en área de experimentación, así como las propiedades que tiene este sistema de poder utilizar cualquier material biodegradable para el proceso de digestión.

El biodigestor *batch* presenta las siguientes características:

- Menor volumen de agua consumida: en sistemas continuos se requiere que diariamente se reemplace la materia prima, por lo que el consumo de agua es constante mientras que en un sistema discontinuo al tener un mayor tiempo de retención hidráulica dentro del digestor, se reduce el consumo drásticamente en comparación.
- Menor volumen de espacio requerido: no requiere de grandes construcciones, puede utilizar tanques con un diseño cilíndrico que pueda ocupar menor espacio, de la misma forma si se requiere que el sistema ocupe menor espacio de trabajo puede ser enterrado de forma parcial o total.
- No sufre cambios violentos de temperatura: los sistemas continuos como los biodigestores horizontales que son instalados en el exterior tienden a sufrir los cambios que presenta el clima, por lo que debe de considerarse las temporadas y la región donde se instalan para estimar su producción y evitar cambios muy abruptos que puedan afectar o interrumpir las reacciones químicas internas, en un digestor *batch* al ser un sistema pequeño en comparación a otros digestores puede ser instalado en casi cualquier sitio, tanto interiores como exteriores, esto permite controlar los cambios de temperatura al poder ubicarlo en un ares que no se verá afectada por las condiciones climáticas.
- No requiere atención especial: al ser un sistema compacto, hermético y con un tiempo de retención hidráulica mayor, no requiere de cuidados especiales, por lo que puede cargarse el sistema con la mezcla de materia

orgánica, sellarlo y dejarlo operando hasta que inicie la formación de biogás.

Se considera también que la materia orgánica no se encuentra en descomposición o previamente digerida por lo que se requiere de un tiempo mayor de retención para que pueda completarse el proceso de forma efectiva, siendo junto con los puntos mencionados anteriormente la razón de elegir un sistema discontinuo tipo *batch*.

### **3.2. Diseño y construcción del biodigestor**

El biodigestor consiste principalmente de un tanque plástico hermético que funcionara como reactor , el recipiente cilíndrico tendrá una capacidad de 150 Lt (40 galones) para realizar mediciones y poder almacenar las muestras vegetales previamente caracterizadas y medidas, en la parte inferior del tanque se instaló una válvula tipo mariposa para extraer muestras de la mezcla y poder realizar mediciones de pH, en la tapa superior se realizan 2 agujeros, uno para la alimentación y poder realizar las cargas de materia orgánica y otra para la salida de los gases resultantes de la digestión y poder realizar mediciones de volumen de dicho gas, además de poseer un termómetro de alcohol para controlar los cambios internos de temperatura que pueden afectar el experimento.

La construcción del reactor se compone de las siguientes partes:

- Tanque hermético de plástico con capacidad de 150 Lt
- Tubería de 3" para alimentación de carga diaria
- Válvula de ¾" para remoción de lodos y toma de muestras de pH
- Válvula de paso para apertura y cierre de la salida del gas
- Manguera de conexión de 3/8" para etapa de medición de gas generado

- Probeta graduada con capacidad de 500ml para medición de gas
- Conector T para conexiones de gas
- Termómetro de alcohol graduado de 0 °C a 100 °C

El tanque de experimentación se ubicó en un área donde puede recibir el calor del día y estar protegido de la lluvia y las condiciones al intemperie que pueden hacer que la temperatura se reduzca por debajo de los 15 grados Celsius o incremente por arriba de los 50 grados, ubicándose en un régimen óptimo para la formación de bacterias.

Figura 16. **Reactor experimental tipo *batch***



Fuente: [Fotografía de Carlos Eduardo García]. (Mercado La Parroquia, Guatemala. 2020).  
Colección particular. Guatemala.

### 3.3. Operación del biodigestor y producción de biogás

El biodigestor completamente cargado con la mezcla de materia orgánica y agua se debe de dejar sellado para que las bacterias que generan los procesos metagenicos se formen y pueda dar inicio a la producción de metano, según Varnero (2011) se debe de considerar la región ya que afecta la temperatura promedio y el tiempo de retención hidráulica que se debe de aplicar para reemplazar la mezcla dentro del bigestor, así mismo el pH de la mezcla debe de permanecer en un valor neutro o muy cercano al neutro, si se reduce demasiado puede inhibir la formación de bacterias y frenar las reacciones internas, combinado con la temperatura, el proceso puede acelerarse o retrasarse, el tiempo de retención hidráulica para la región centroamericana es entre 45 y 60 días, el experimento se llevó a cabo en un periodo de 90 días donde se medía diariamente el pH, la temperatura y el volumen de gas generado, se optó por un periodo más prolongado para garantizar la formación de biogás debido a la lentitud con la que la materia orgánica puede generar metano.

Tabla V. **Producción de biogás**

<b>Día</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>pH</b>	<b>Volumen de gas (ml)</b>
32	32.00	6.00	455.00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para la medición de pH se procedió a extraer una porción de la mezcla de materia orgánica desde la llave de drenaje de lodos en la parte inferior del digestor y utilizando una cinta reactiva que al contacto con la solución cambia de color según la acidez presente en la mezcla, esto permite tener una evaluación visual muy acertada del coeficiente de acides o pH presente en todo momento, realizando dicha medición diariamente para evitar que el valor caiga por debajo

de 5 lo que causaría la muerte de las bacterias, de preferencia la mezcla debe de encontrarse entre las 6 y 7 unidades.

El control de temperatura se lleva por medio de una inspección visual del que se realiza diariamente por medio de un termómetro graduado que nos permite apreciar las variaciones de un grado dentro del digestor, esta medición se realiza antes de la medición volumétrica debido a que extraer una parte del gas puede variar la medición. Al medir se corrobora que la escala no esté cambiando y que las condiciones en ese instante se encuentren estables para evitar errores.

Por último la medición volumétrica del gas se realiza utilizando una probeta de 500 ml con escala de 5 ml, esto por el alto volumen de gas que genera, la probeta se llena de agua y se voltea para sumergirlo dentro de un recipiente de mayor tamaño que contiene agua, esto generará un sello que impida que la probeta se vacíe por efectos de la gravedad, una vez hecho eso se conecta el tanque y el interior de la probeta con una manguera que posee una llave de paso para impedir que el gas escape en cualquier otro momento que no sea la medición, al momento de que la manguera ingresa en la probeta se procede a abrir la llave de paso lo que provoca que el gas entre en la probeta y desplaza el agua en un volumen igual al volumen del gas, al momento de que el gas deje de salir y desplazar el agua se cierra la llave y se procede a medir el volumen de gas que se encuentra dentro de la probeta, la medida se toma desde el punto donde se puede apreciar que alcanza el agua dentro de la probeta, al incrementar la producción de gas se procese a usar 2 probetas para incrementar el volumen de agua que debe desplazar el gas y se toman las mediciones de las dos probetas para sumar el total de la producción, al momento de terminar la toma de datos volumétricos se evalúa que la llave esté completamente cerrada y se vacía la

probeta para dejarla libre de agua y gas y se procede a limpiarlo para utilizarlo al siguiente día.

Posteriormente a las mediciones realizadas en la etapa experimental, se procede a calcular la producción estimada de metano y su máxima generación en el período de experimentación. La producción de metano es un parámetro que nos permite establecer la cantidad de metano generado de una muestra orgánica respecto al tiempo de retención a partir del proceso de fermentación (Alvarado, 2017).

Se determina de la siguiente manera:

$$PCH_4 = \frac{VCH_4}{PM*TRH} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$PCH_4$  = Producción de metano ( $\text{cm}^3/\text{Kg} \cdot \text{día}$ )

$VCH_4$  = Volumen de gas generado ( $\text{cm}^3$ )

$PM$  = Peso de materia disuelta en el reactor (Kg)

$TRH$  = Tiempo de retención hidráulica (días)

Con la producción de metano establecida se puede estimar la máxima producción de metano en la mezcla orgánica disuelta. Se calcula según la siguiente fórmula:

$$PCH_{MAX} = \frac{VCH_4}{SV} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

SV = Sólidos volátiles totales usados en el reactor (Kg)

PCH<sub>MAX</sub> = Máxima producción de metano (cm<sup>3</sup>/Kg)

Estos parámetros me permitirán conocer que a partir de la cantidad de materia orgánica que genero de forma diaria, mensual o anual, puedo obtener un estimado de todo el volumen de biogás que generan dichos residuos, factor que junto con el poder calorífico del gas puede establecer la energía que produce en un período de tiempo.

## 4. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL GAS

Todo el proceso de experimentación nos lleva a la etapa final del proceso donde se evalúan las características propias del biogás generado, estableciendo las propiedades energéticas que posee, así como los subproductos que genera y las propiedades de dichos subproductos.

### 4.1. Determinación del potencial energético del biogás

El gas se produce de forma constante en el biodigestor y una parte se almacena en un recipiente sellado para su posterior análisis, previo a ello se puede evaluar de forma experimental si se genera gas, conectando un filtro que reduzca el contenido de humedad y permita que el gas sea quemado con mayor facilidad.

El gas almacenado es llevado a realizar análisis para determinar su composición, la humedad y su poder calorífico, cabe destacar que la humedad debe de reducirse antes de utilizar el gas, esto permitirá que el porcentaje de metano presente aumente, también debe de mantener una presión interna dentro del tanque que permita que el gas fluya con mayor facilidad por las mangueras.

Tabla VI. **Composición de biogás**

<b>Parámetros</b>	<b>%</b>
CH <sub>4</sub>	51
CO <sub>2</sub>	44

Continuación tabla VI.

CO	0.1
N <sub>2</sub>	3.0
O <sub>2</sub>	0.6

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El poder calorífico del biogás se encuentra entre 3,500 Kcal/m<sup>3</sup> y 5,250 Kcal/m<sup>3</sup> según el porcentaje de metano presente en el gas, para estimar el poder calorífico se utiliza la medición porcentual del metano, al conocer el porcentaje de metano presente puede interpolarse con los valores conocidos para obtener un aproximado del poder calorífico del gas, el cual puede utilizarse para estimar la energía que puede producir en Kwh por cada metro cúbico.

Por lo que se utilizará la siguiente expresión:

$$Q = 3500 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3} + \frac{5250 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3} - 3500 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3}}{0.6 - 0.45} * (X - 0.45) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

Q = Poder calorífico en  $\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3}$

X = Porcentaje de metano presente

Esta medida se encuentra relacionada con el volumen, por lo que se puede expresar la energía total que se encuentra presente en el volumen generado.

## 4.2. Usos potenciales del biogás generado

El biogás generado puede tener diversas aplicaciones en función del volumen generado y del poder calorífico que este posea, si los volúmenes de gas no son suficientes como para ser una fuente de combustible estable y posee un porcentaje de metano por debajo del 45 %, el gas no podría ser usado como fuente de calor, por lo que debería de ser desechado, si el poder calorífico es aceptable pero los volúmenes no permiten utilizarlo en otras aplicaciones como hornos o equipos de generación de electricidad, el gas deberá de ser quemado en una chimenea para evitar desecharlo al ambiente y reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

De la misma forma si los volúmenes son lo suficientemente altos como para representar una fuente estable, puede aplicarse en sistemas de generación de energía eléctrica de forma local o como fuente de calor, no debe de descartarse la idea de quemar el gas para reducir las emisiones de GEI. En caso de utilizarse como fuente energética debe de considerarse la humedad presente por el proceso de digestión y el sulfuro de hidrógeno que puede corroer piezas metálicas o causar daños a motores a gas, por lo que en un sistema de producción de biogás debe de controlarse el filtrado para garantizar un correcto manejo del biogás.

Al ser utilizado en sistemas de generación eléctrica debe de considerarse la eficiencia del generador y el volumen de gas, la energía generada puede expresarse de la siguiente manera:

$$\text{Energía eléctrica} = Q * V * f \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

Q = Poder calorífico en  $\frac{Kwh}{m^3}$

V = Volumen de biogás  $m^3$

f = Factor de eficiencia propia del generador eléctrico, entre 70 % y 90 % según el tipo de máquina eléctrica (por chispa, cogeneración)

El término de Kwh nos permitirá dimensionar de mejor manera debido que la energía eléctrica se consume en dichas dimensionales, por lo que al término de un mes de producción de gas puede expresarse de forma visible con una comparación, en este caso comparándolo con el consumo promedio de un domicilio de una familia el cual es de 354 Kwh al mes, este dato nos permitirá visualizar la cantidad de energía producida en un mes de generación.

Al igual que el gas debe de plantearse los posibles usos que tienen los lodos resultantes del proceso de digestión, deben de analizarse para conocer su composición, y verificar según reglamentos nacionales si son aptos para utilizarse como fertilizante orgánico, fertirriego o si deben de sufrir un tratamiento previo a ser desechados.

Tabla VII. **Características de los lodos resultantes**

<b>Volumen de lodos experimental (Lt)</b>	<b>Peso del Lodo experimental (Kg)</b>
47.32	41.5

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

**Figura 17. Medición de lodos**



Fuente: [Fotografía de Carlos Eduardo García]. (Mercado La Parroquia, Guatemala. 2021).  
Colección particular. Guatemala.

**Figura 18. Extracción de lodos del reactor**



Fuente: [Fotografía de Carlos Eduardo García]. (Mercado La Parroquia, Guatemala. 2021).  
Colección particular. Guatemala.

Tabla VIII. **Características químicas de los lodos**

<b>Parámetros</b>	<b>Datos</b>
pH	6.4
N	0.29 %
P	3.42 %
K	9.24 %
Ca	6.54 %
Mg	1.14 %
Na	0.074 %
S	1.182 ppm
Fe	180 ppm
Cu	17 ppm
Mn	53 ppm
Zn	85 ppm
B	13 ppm

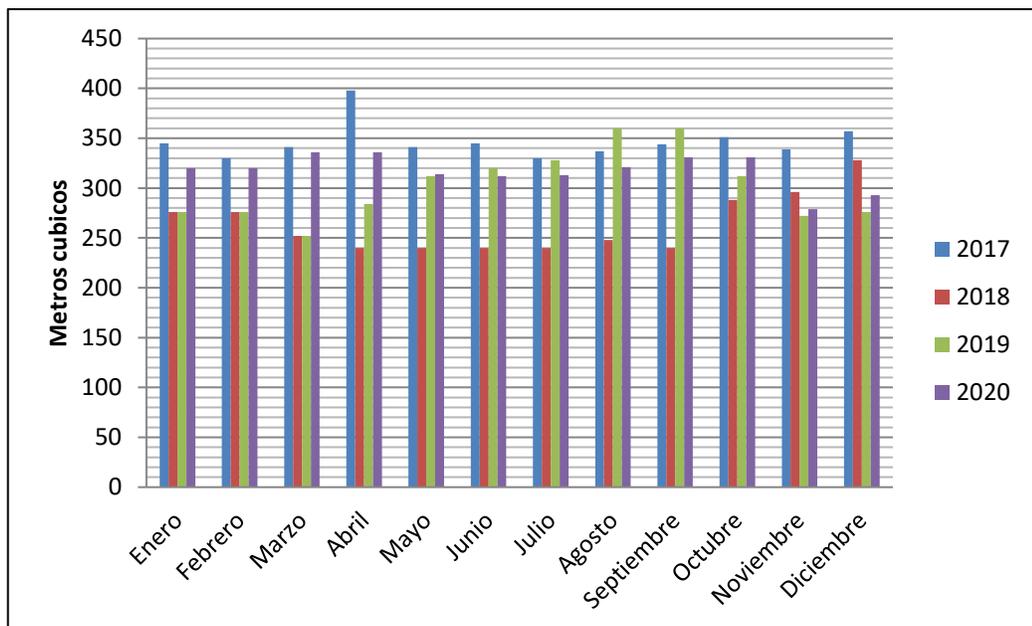
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Historial de producción de residuos

Luego de una investigación del historial de recolección en los informes anuales del departamento de limpieza de la Municipalidad de Guatemala, se obtuvieron los resultados en un periodo de 4 años, junto a su representación gráfica.

Figura 19. **Histórico de producción de residuos**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

## 5.2. Caracterización de los residuos

Luego de la etapa de recolección de muestras de residuos y al ser caracterizados para separar de mejor manera cada tipo de residuo, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla IX. **Porcentaje de composición de residuos**

<b>Descripción</b>	<b>Muestra 1 [%]</b>	<b>Muestra 2 [%]</b>	<b>Muestra 3 [%]</b>	<b>Muestra 4 [%]</b>	<b>Muestra 5 [%]</b>
Orgánicos	82.6	82.5	83.4	85	83.2
Vidrio	16.3	16.8	17.3	17.5	15.4
Metal	11.7	12.3	10.5	15.1	9.1
Papel/Cartón	4.1	4.6	3.8	5	2.3
Plástico	0.9	1	1.2	0.8	0.9
Otros	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla X. **Peso de materia orgánica generada**

<b>Toneladas de materia orgánica de manera mensual</b>						
<b>Años</b>	<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>	<b>Junio</b>
2017	171.08	163.64	169.09	197.36	169.09	171.08
2018	136.86	136.86	124.96	119.01	119.01	119.01
2019	136.86	136.86	124.96	140.83	154.71	158.68
2020	158.68	158.68	166.61	166.61	155.70	154.71
<b>Años</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Octubre</b>	<b>Noviembre</b>	<b>Diciembre</b>
2017	163.64	167.11	170.58	174.05	168.10	177.03
2018	119.01	122.98	119.01	142.81	146.78	162.65
2019	162.65	178.51	178.51	154.71	134.88	136.86
2020	155.21	159.17	164.13	164.13	138.35	145.29

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XI. **Composición química de la materia orgánica**

<b>Símbolos</b>	<b>Composición</b>	<b>Datos</b>
<b>pH</b>	pH	7.60
<b>C/N</b>	Carbono-nitrógeno	21.50
<b>N</b>	Nitrógeno [%]	2.18
<b>SV</b>	Sólidos Volátiles [%]	9.56
<b>ST</b>	Sólidos totales [%]	12.78
<b>H</b>	Humedad [%]	81.52
<b><math>\rho</math></b>	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	595.07

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### 5.3. **Total de biogás producir**

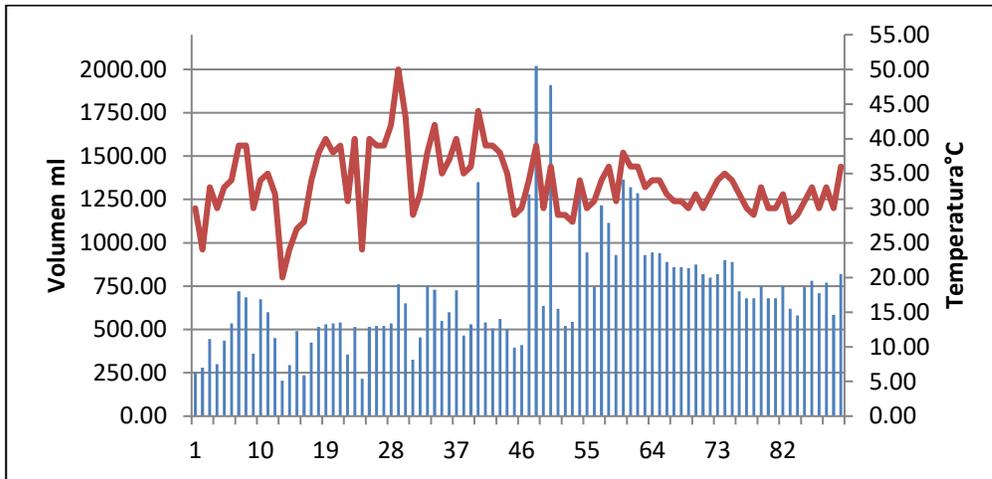
Posterior al muestreo de residuos orgánicos se realizó el experimento de producción de biogás en el cual se obtuvieron los siguientes resultados a lo largo de todo el proceso.

Tabla XII. **Total de producción de biogás**

<b>Volumen Biogás generado [ml]</b>	<b>Temperatura promedio [°C]</b>	<b>pH promedio</b>
63180.00	33.62	6.43

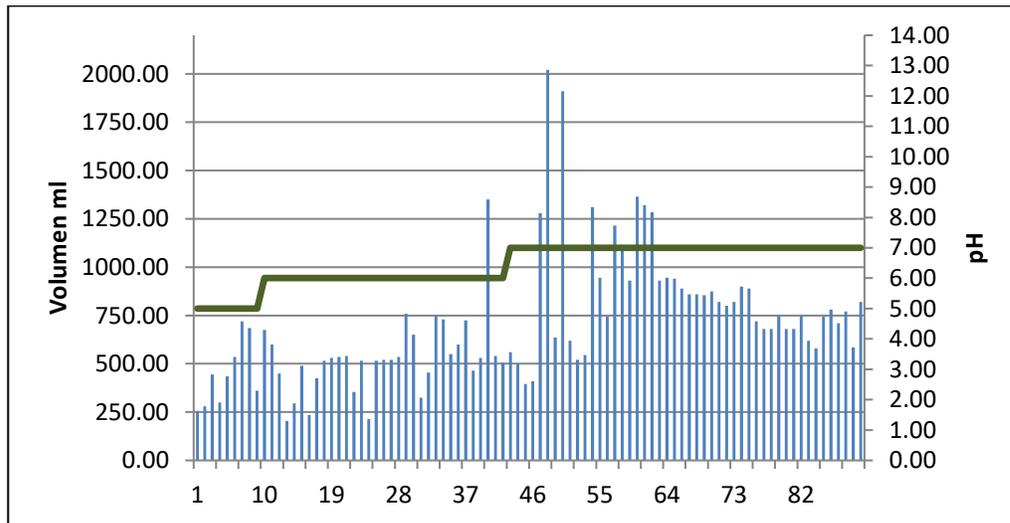
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 20. **Relación de producción y temperatura**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 21. **Relación de producción y pH**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Luego de conocer los datos de la etapa de experimentación, el digester presentó los siguientes datos de producción.

Tabla XIII. **Producción de metano**

<b>Volumen biogás generado [Lt]</b>	<b>PCH4 [cm<sup>3</sup>/g*día]</b>	<b>Máxima producción de metano [cm<sup>3</sup>/g]</b>	<b>Poder calorífico del biogás [Kcal/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Poder calorífico del biogás [Kwh/m<sup>3</sup>]</b>
63.18	0.02	152.26	4,200	4.88

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Al mismo tiempo de concluida la producción de biogás se realizó un análisis en los subproductos de la digestión, los resultados se pueden apreciar a continuación.

Tabla XIV. **Características del lodo producido**

<b>Estimación volumen de lodos mensual (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Estimación peso del lodo mensual (ton)</b>
213	187.2

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

#### **5.4. Producción energética**

Posteriormente del muestreo y la finalización del experimento se realizaron análisis de laboratorio en el biogás para determinar el porcentaje de metano y por ende el poder calorífico presente, por lo que a continuación se presentará los resultados energéticos y de producción de biogás del mercado La Parroquia tomando los datos promedio y la energía producida por el gas.

Tabla XV. **Producción mensual**

<b>Volumen de residuos orgánicos promedio (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso de residuos (Ton)</b>	<b>Volumen de gas generado (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Sólidos totales (%)</b>	<b>Sólidos volátiles (%)</b>	<b>Energía mensual estimada (Kwh)</b>
256.20	152.44	284.94	12.78	9.56	1,390.82

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XVI. **Producción anual**

<b>Volumen de residuos (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso de residuos (Ton)</b>	<b>Volumen de gas generado (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Sólidos totales (%)</b>	<b>Sólidos volátiles (%)</b>	<b>Energía anual estimada (Kwh)</b>
3,074.41	1,829.27	3,419.28	12.78	9.56	16,689.51

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XVII. **Ejemplificación mensual de producción energética**

<b>Consumo domiciliar promedio mensual (Kwh)</b>	<b>Energía de biogás en un mes(Kwh)</b>	<b>Energía del generador en un mes(Kwh)</b>	<b>Relación entre energía de generador y consumo domiciliar</b>	<b>Consumo de leña equivalente (Kg)</b>
314.00	1,390.82	1,112.66	3.54	299

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

## 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo de investigación propone el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados diariamente por las actividades comerciales en el mercado La Parroquia como una fuente de generación de biogás para fines energéticos y de generación de electricidad en futuros proyectos de aprovechamiento energético.

El mercado La Parroquia produce en promedio 152.44 toneladas de materia orgánica de forma mensual que equivalen a 307.42 metros cúbicos de materia desechada. La producción diaria ronda las 5 toneladas, esta producción representa el 83.34 % del total de materia producida en las instalaciones, esto nos permite demostrar que existe una importante fuente de materia que en la actualidad no se aprovecha debido a que solo es transportada a los vertederos autorizados por la municipalidad.

La materia orgánica utilizada en el muestreo presenta una relación de carbono/nitrógeno de 21.5, el cual se encuentra dentro de los parámetros aceptables para la óptima generación de biogás, debido que no es demasiado alto para ralentizar el crecimiento de bacterias, por lo que puede iniciar la formación de metano dentro del periodo de retención hidráulica. La mezcla de materia orgánica presenta un contenido de sólidos totales del 12.78 %, los cuales pueden asegurar un buen funcionamiento dentro de digestores semi continuos y discontinuos.

En el proceso de digestión se puede apreciar que la temperatura es uno de los parámetros decisivos para la formación de biogás, se puede observar en la figura 20 que en la primera mitad la producción de metano es baja y la temperatura dentro del reactor es elevada, cuando la temperatura se estabiliza entre los 30 °C y 35 °C la producción de biogás aumenta y luego decae al finalizar el proceso debido a la reducción de nutrientes que permiten el crecimiento de las bacterias.

La producción de biogás en sistemas anaerobios con materia vegetal es más lenta debido a degradación y formación de bacterias que no se encuentran presentes a diferencia de un sistema similar que aprovecha materia fecal o con pre digestión, a pesar de las limitaciones se estimó una producción 1.87 m<sup>3</sup> de biogás por cada tonelada de residuos vegetales generados dentro de las instalaciones, lo que equivale a una producción mensual de 284.94 m<sup>3</sup> de biogás y 3,419.28 m<sup>3</sup> de biogás de forma anual.

En base a la producción mensual y anual estimada de biogás y a la capacidad calorífica que presentó el gas generado de 4.88 Kwh/m<sup>3</sup> se estima que con la producción de materia orgánica que presenta el mercado La Parroquia, la energía generada es de 1,390.8 Kwh de manera mensual y 16,689.5 Kwh de manera anual, luego de la conversión eléctrica por medio de un cogenerador, la energía generada es de 1,112.66 Kwh, lo cual equivale a 3.54 veces el consumo promedio de energía eléctrica en un domicilio, mensualmente se genera la suficiente energía para abastecer durante un mes 3 hogares con un consumo energético promedio de 314 Kwh. En términos de poder calorífico el biogás producido es suficiente para reemplazar 299 Kg de leña al mes y su utilización evita la liberación a la atmósfera de 145.3 m<sup>3</sup> de metano en un mes o 1,743.8 m<sup>3</sup> de metano al año.

Los subproductos de la digestión como lo son los lodos resultantes representan una gran parte del proceso, según las estimaciones en un mes se producirán cerca de 213 m<sup>3</sup> con un peso de 187 ton debido a su contenido de agua que incrementa el peso, los lodos presentan un contenido de potasio, nitrógeno y fósforo de 9.24 %, 0.29 % y 3.42 % respectivamente como se indica en la tabla VIII, esto nos indica que pueden ser utilizados como fertilizantes orgánicos debido a sus nutrientes y a los volúmenes que pueden producirse de manera mensual dentro de las instalaciones.



## CONCLUSIONES

1. Se presentó un proyecto para el aprovechamiento de los residuos orgánicos para generación de biogás con fines energéticos en el mercado La Parroquia ubicado en la Ciudad de Guatemala, esto demostró que es una fuente potencial debido a la generación constante de materia por las actividades comerciales que se llevan a cabo en dichas instalaciones.
2. Se estimó que en promedio se generan 5.08 toneladas de residuos orgánicos diariamente debido a las actividades comerciales, lo que equivale a 152.4 toneladas mensuales de materia orgánica, representando el 83 % del total de residuos generados.
3. Se estimó una producción de biogás por tonelada de materia orgánica en el mercado de 1.87 m<sup>3</sup>/Ton, equivalente a una producción de 284.94 m<sup>3</sup> de manera mensual, dicha producción es aceptable y representa una fuente de gas por la generación constante de materia en las instalaciones.
4. El poder calorífico del biogás es de 4.88 Kwh/m<sup>3</sup>, lo que representa una producción energética de 1,390.82 Kwh de forma mensual y 16,689.51 Kwh de forma anual luego de la transformación a energía eléctrica. Los residuos orgánicos cuentan con las características necesarias para ser aprovechados en la generación de biogás, por lo que las características energéticas del biogás son aceptables para su utilización en equipos de generación.

5. La producción de biogás es la suficiente para abastecer en promedio 3 hogares durante un mes con un consumo de 314 Kwh, lo que representa una fuente a considerar, así mismo los lodos son una buena parte del proceso de digestión pudiendo ser reutilizados como fertilizante o tierra abonada en jardinería o recuperación de suelos según su volumen de producción, esto debido a su contenido de potasio, nitrógeno y fósforo que son necesarios para el crecimiento de la vegetación.

## RECOMENDACIONES

1. Utilizar los residuos generados en mercados cantonales de dimensiones similares o mayores para así aumentar la producción de biogás, gestionando la recolección en conjunto con la Municipalidad de Guatemala tomando en consideración el espacio necesario para almacenar los residuos antes de su uso.
2. Ubicar el sistema de producción de gas en un área controlada, que permita obtener la mayor cantidad de calor durante el día y no sufra alteraciones drásticas durante épocas frías o de lluvias.
3. Realizar un secado en los lodos del proceso de digestión en sistemas discontinuos previo a ser utilizados como fertilizante debido al contenido de agua que dificulta su transporte y almacenamiento.



## REFERENCIAS

1. Acosta, Y. y Abreu, M. (marzo, 2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos parte I. *Sobre los derivados de la caña de azúcar*, 39(1), 35-48.
2. Acuerdo Gubernativo 281-2015. Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos. Diario de Centroamérica. Guatemala. 15 de diciembre de 2015.
3. Alvarado, C. (2017). *Potencial de producción de biogás de los residuos orgánicos biodegradables de la Terminal zona 4* (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
4. Barillas, S. (2017). *Diseño de un prototipo bioenergético, empleando residuos sólidos orgánicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala* (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
5. Bautista, A. (2010). *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos:(Estelí, Nicaragua)* (Tesis de Licenciatura). Universidad Carlos III de Madrid, España.
6. Botta, N. (25 de mayo, 2018). Poder Calorífico [Mensaje en un blog]. Recuperado de [www.redproteger.com.ar/poder\\_calorifico.htm](http://www.redproteger.com.ar/poder_calorifico.htm).

7. Carrasco, J. (2015). *Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: Una estrategia para diferentes contextos* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Chile, Chile.
8. Corrales, L., Romero, D., Macías, J. y Vargas, A. (febrero, 2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(24), 55-82.
9. Departamento de limpieza pública (2020). *Memoria de labores*. Guatemala: Autor.
10. Dirección de Gestión y Manejo de Residuos y Desechos Sólidos de la Municipalidad de Guatemala (2018). *Memoria de Labores 2018*. Guatemala: Autor.
11. Ecocosas (14 de marzo, 2019). Qué es y cómo se hace un biodigestor. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://ecocosas.com/energias-renovables/biodigestor/>.
12. Ecoinventos (12 de enero, 2020). Cómo hacer un biodigestor casero. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://ecoinventos.com/biodigestor-casero/>.
13. EMISON. (14 de noviembre, 2014). La función de la antorcha quemadora de biogás en la estación depuradora de aguas residuales [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/>.

14. Forget, A. (16 de junio, 2011). Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares. Lima, Perú. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://www.astridforget.com/wp-content/uploads/2015/>.
15. Franco, A. (2019). *Caracterización de los residuos sólidos domiciliarios, en la cabecera municipal de San Pedro Sacatepéquez, del departamento de Guatemala* (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
16. García, G. (marzo, 2016). Situación actual de la gestión integrada de los residuos sólidos en el municipio de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala, CA. *Revista Naturaleza, Sociedad y Ambiente*, 3(1), 59-75.
17. Garra, A., Pequeño, M. y de la Cruz, S. (enero, 2011). El uso de biofertilizantes en el cultivo del frijol: una alternativa para la agricultura sostenible en Sagua la Grande. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, (159), 1-25.
18. Gonzáles, B. (01 de junio, 2019). Los desechos sólidos en la Ciudad de Guatemala [mensaje de un blog]. Recuperado de <http://investigacionparatodos.usac.edu.gt/art%C3%ADculos-principales/item/25-desechos-s%C3%B3lidos>.
19. Gutiérrez, M., y Droguet, M. (julio, 2002). La cromatografía de gases y la espectrometría de masas: identificación de compuestos causantes de mal olor. *Boletín Intexter*, 1(122), 35-41.

20. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017). *Política nacional para la gestión de residuos y desechos sólidos*. Guatemala: Autor.
21. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2019). *Normativa*. Guatemala: Autor.
22. Montenegro, K., Rojas, A., Cabeza, I. y Hernández, M. (julio, 2016). Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca. *Revista Ion*, 29(2), 23-37. Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-100X2016000200023&script=sci\\_abstract&lng=pt](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-100X2016000200023&script=sci_abstract&lng=pt).
23. Ortiz, N. (2017). *Potencial técnico para la producción de biogás, generado a partir de residuos orgánicos producidos en la comuna de Independencia* (Tesis de Maestría). Universidad de Chile, Chile.
24. Prensa Libre (17 de junio, 2016). Alarmante contaminación de ríos y lagos de Guatemala. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/la-alarmante-contaminacion-en-los-rios-y-lagos-de-guatemala/>.
25. Recytrans (2013). *Gestión de residuos*. Valencia: Autor. Recuperado de <https://www.recytrans.com/gestion-de-residuos/>.
26. Rondón, E., Szantó, M., Pacheco, J., Contreras, E. y Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*. Santiago de Chile, Chile: CEPAL. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40407>.

27. Rosa, R. (2015). *Producción de biogás en sustrato sólido mediante la digestión anaerobia de pulpa de café* (Tesis de maestría). Universidad Veracruzana, México. Recuperado de <https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/41980>.
28. Sanabria, O., Sánchez, A. y Rodas, Y. (2018). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia a partir de aprovechamiento de sustratos orgánicos (pasto y aserrín), en la ciudad de Estelí en el año 2017* (Tesis de Maestría), Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.
29. Sánchez, A., y García, V. (diciembre, 2014). Evaluación de la prefactibilidad de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás con estiércol de ganado vacuno o porcino en Cundinamarca. *Tekhnê*, 11(2), 37-50.
30. Varnero, M. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile, Chile: MINENERGIA. Recuperado de [https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/manual\\_de\\_biogas.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/manual_de_biogas.pdf).



## APÉNDICES

### Apéndice 1. Mediciones del biodigestor

Día	Gas producido (ml)	Gas producido (m <sup>3</sup> )	Gas acumulado (ml)	pH	Temperatura (°C)
1	255.00	0.0002550	255.00	5.00	30.00
2	280.00	0.0002800	535.00	5.00	24.00
3	445.00	0.0004450	980.00	5.00	33.00
4	300.00	0.0003000	1280.00	5.00	30.00
5	435.00	0.0004350	1715.00	5.00	33.00
6	535.00	0.0005350	2250.00	5.00	34.00
7	720.00	0.0007200	2970.00	5.00	39.00
8	685.00	0.0006850	3655.00	5.00	39.00
9	360.00	0.0003600	4015.00	5.00	30.00
10	675.00	0.0006750	4690.00	6.00	34.00
11	600.00	0.0006000	5290.00	6.00	35.00
12	450.00	0.0004500	5740.00	6.00	32.00
13	205.00	0.0002050	5945.00	6.00	20.00
14	295.00	0.0002950	6240.00	6.00	24.00
15	490.00	0.0004900	6730.00	6.00	27.00
16	235.00	0.0002350	6965.00	6.00	28.00
17	425.00	0.0004250	7390.00	6.00	34.00
18	515.00	0.0005150	7905.00	6.00	38.00
19	530.00	0.0005300	8435.00	6.00	40.00
20	535.00	0.0005350	8970.00	6.00	38.00
21	540.00	0.0005400	9510.00	6.00	39.00
22	355.00	0.0003550	9865.00	6.00	31.00
23	515.00	0.0005150	10380.00	6.00	40.00
24	215.00	0.0002150	10595.00	6.00	24.00
25	515.00	0.0005150	11110.00	6.00	40.00
26	520.00	0.0005200	11630.00	6.00	39.00
27	520.00	0.0005200	12150.00	6.00	39.00

Continuación apéndice 1.

28	535.00	0.0005350	12685.00	6.00	42.00
29	760.00	0.0007600	13445.00	6.00	50.00
30	650.00	0.0006500	14095.00	6.00	43.00
31	325.00	0.0003250	14420.00	6.00	29.00
32	455.00	0.0004550	14875.00	6.00	32.00
33	750.00	0.0007500	15625.00	6.00	38.00
34	730.00	0.0007300	16355.00	6.00	42.00
35	550.00	0.0005500	16905.00	6.00	35.00
36	600.00	0.0006000	17505.00	6.00	37.00
37	725.00	0.0007250	18230.00	6.00	40.00
38	465.00	0.0004650	18695.00	6.00	35.00
39	530.00	0.0005300	19225.00	6.00	36.00
40	1350.00	0.0013500	20575.00	6.00	44.00
41	540.00	0.0005400	21115.00	6.00	39.00
42	505.00	0.0005050	21620.00	6.00	39.00
43	560.00	0.0005600	22180.00	7.00	38.00
44	500.00	0.0005000	22680.00	7.00	35.00
45	395.00	0.0003950	23075.00	7.00	29.00
46	410.00	0.0004100	23485.00	7.00	30.00
47	1280.00	0.0012800	24765.00	7.00	34.00
48	2020.00	0.0020200	26785.00	7.00	39.00
49	635.00	0.0006350	27420.00	7.00	30.00
50	1910.00	0.0019100	29330.00	7.00	36.00
51	620.00	0.0006200	29950.00	7.00	29.00
52	520.00	0.0005200	30470.00	7.00	29.00
53	545.00	0.0005450	31015.00	7.00	28.00
54	1310.00	0.0013100	32325.00	7.00	34.00
55	945.00	0.0009450	33270.00	7.00	30.00
56	745.00	0.0007450	34015.00	7.00	31.00
57	1215.00	0.0012150	35230.00	7.00	34.00
58	1115.00	0.0011150	36345.00	7.00	36.00
59	930.00	0.0009300	37275.00	7.00	31.00
60	1365.00	0.0013650	38640.00	7.00	38.00

Continuación apéndice 1.

61	1320.00	0.0013200	39960.00	7.00	36.00
62	1285.00	0.0012850	41245.00	7.00	36.00
63	930.00	0.0009300	42175.00	7.00	33.00
64	945.00	0.0009450	43120.00	7.00	34.00
65	940.00	0.0009400	44060.00	7.00	34.00
66	890.00	0.0008900	44950.00	7.00	32.00
67	860.00	0.0008600	45810.00	7.00	31.00
68	860.00	0.0008600	46670.00	7.00	31.00
69	855.00	0.0008550	47525.00	7.00	30.00
70	875.00	0.0008750	48400.00	7.00	32.00
71	820.00	0.0008200	49220.00	7.00	30.00
72	800.00	0.0008000	50020.00	7.00	32.00
73	820.00	0.0008200	50840.00	7.00	34.00
74	900.00	0.0009000	51740.00	7.00	35.00
75	890.00	0.0008900	52630.00	7.00	34.00
76	720.00	0.0007200	53350.00	7.00	32.00
77	680.00	0.0006800	54030.00	7.00	30.00
78	680.00	0.0006800	54710.00	7.00	29.00
79	750.00	0.0007500	55460.00	7.00	33.00
80	680.00	0.0006800	56140.00	7.00	30.00
81	680.00	0.0006800	56820.00	7.00	30.00
82	750.00	0.0007500	57570.00	7.00	32.00
83	620.00	0.0006200	58190.00	7.00	28.00
84	580.00	0.0005800	58770.00	7.00	29.00
85	745.00	0.0007450	59515.00	7.00	31.00
86	780.00	0.0007800	60295.00	7.00	33.00
87	710.00	0.0007100	61005.00	7.00	30.00
88	770.00	0.0007700	61775.00	7.00	33.00
89	585.00	0.0005850	62360.00	7.00	30.00
90	820.00	0.0008200	63180.00	7.00	36.00
<b>Prom</b>	<b>702.00</b>	<b>0.000702</b>	<b>Promedio</b>	<b>6.43</b>	<b>33.62</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.