



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS  
DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES GENERADOS EN EL MERCADO SAN JOSÉ, PARA  
LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAERÓBICA**

**Jeniffer Marivi Santizo Alvarez**

Asesorado por el MSc. Ing. José Antonio Rosal Chicas

Guatemala, septiembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS  
DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES GENERADOS EN EL MERCADO SAN JOSÉ, PARA  
LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAERÓBICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JENIFFER MARIVI SANTIZO ALVAREZ**

ASESORADO POR EL MSC. ING. JOSÉ ANTONIO ROSAL CHICAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl De León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Jose Manuel Tay Oroxom
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## 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:

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES GENERADOS EN EL MERCADO SAN JOSÉ, PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAERÓBICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 02 de agosto de 2013.

**Jeniffer Marivi Santizo Alvarez**



0 0 0 0 3 0 1

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Teléfono 2418-9142

ADSE-MEAPP-0026-2013

Guatemala, 02 de agosto de 2013.

Director:  
Víctor Manuel Monzón Valdez  
Escuela de Ingeniería Química  
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación de la estudiante **Jeniffer Marivi Santizo Álvarez** con carné número **2002-13195**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría de Energía y Ambiente.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y enseñad a todos"

MSc. Ing. José Antonio Rosal Chicas  
Asesor (a)

Ing. Juan C. Fuentes M.  
M.Sc. Hidrología  
Colegiado No. 2504

MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montesque.  
Coordinador de Área  
Desarrollo social y energético

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes  
Directora  
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo/la

Doctorada: Sostenibilidad y Cambio Climático. Programas de Maestrías: Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. Especializaciones: Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.271.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la estudiante, **JENIFFER MARIVI SANTIZO ALVAREZ**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el **Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en ENERGÍA Y AMBIENTE** titulado **"DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES GENERADOS EN EL MERCADO SAN JOSÉ, PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAERÓBICA** Proceda a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, septiembre 2013

Cc: Archivo  
Copia: Colegio de Ingenieros Químicos de Guatemala  
VMMV/ale

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

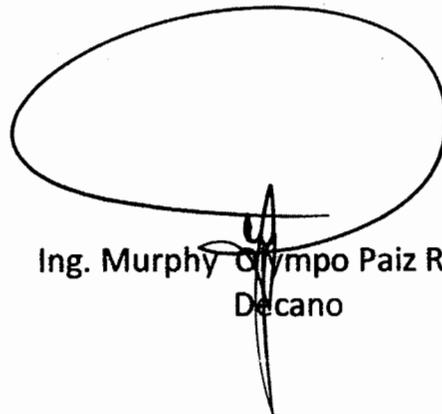


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 705.2013

El Decano 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 Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES GENERADOS EN EL MERCADO SAN JOSÉ, PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAERÓBICA**, presentado por la estudiante universitaria: **Jeniffer Marivi Santizo Alvarez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 10 de octubre de 2013

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser mi principal guía en el sendero de la vida.
<b>Mi padre</b>	Marco Antonio Santizo, por su cariño y apoyo incondicional y por ser mi fuente de inspiración.
<b>Mi madre</b>	Olympia Alvarez, por su cariño y apoyo.
<b>Mi novio</b>	Luis Fernando Noriega, por su amor y apoyo en todo momento.
<b>Mis hermanas</b>	Katherin y Maria Fernanda Santizo. Por ser mis mejores amigas y estar a mi lado siempre.
<b>Mi familia</b>	Por su confianza y apoyo.
<b>Facultad de Ingeniería, USAC</b>	Por abrirme las puertas y ser guía en mi crecimiento intelectual y personal.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Gracias por guiarme en el sendero de la vida y darme fortaleza para seguirlo.
- Mi padre** Marco Antonio Santizo, gracias por apoyarme e incentivarme a concluir este objetivo, el logro es tuyo. Te quiero mucho
- Mi madre** Olimpia Alvarez, gracias por tu cariño y apoyo.
- Mis hermanas** Katherin y Maria Fernanda Santizo, gracias por su apoyo, cariño y por siempre estar a mi lado. Las quiero mucho.
- Mi novio** Luis Fernando Noriega, mi amor gracias por ser mi apoyo y siempre darme ánimos para continuar. Te amo.
- Mis amigos** Por su valiosa amistad y apoyo. Han sido parte importante para concluir mi carrera.
- Mi asesor** Ing. José Rosal Chicas, gracias por su apoyo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	01
2. ANTECEDENTES .....	03
3. OBJETIVOS .....	05
4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	07
5. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	09
6. ALCANCES DEL TEMA .....	11
7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	13
7.1. Residuos sólidos municipales .....	13
7.1.1. Propiedades fisicoquímicas de los residuos sólidos urbanos .....	14
7.2. Impacto ambiental de los RSU .....	16
7.3. Manejo de los residuos sólidos urbanos .....	17
7.4. Problemática e implicaciones técnicas de la gestión de los RSU en Guatemala .....	19

7.5.	Técnicas para el tratamiento de RSU .....	20
7.5.1.	Vertederos .....	20
7.5.2.	Incineración .....	21
7.5.3.	Compostaje y digestión anaeróbica .....	21
7.5.4.	Tratamiento mecánico biológico .....	22
7.5.5.	Pirolisis y gasificación .....	23
7.6.	Digestión anaeróbica .....	24
7.6.1.	Partes que conforman el proceso de digestión .....	25
7.6.1.1.	Cámara de carga .....	25
7.6.1.2.	Digestor o cámara de digestión .....	26
7.6.1.3.	Almacenamiento del biogás .....	27
7.6.1.4.	Gasómetros .....	27
7.6.1.5.	Cámara de descarga .....	27
7.6.2.	Proceso microbiológico y bioquímico de la digestión anaeróbica .....	28
7.6.2.1.	Hidrólisis .....	30
7.6.2.2.	Acidogénesis .....	33
7.6.2.3.	Acetogénesis .....	34
7.6.2.4.	Metanogénesis .....	35
7.6.3.	Condiciones experimentales para la digestión anaeróbica .....	36
7.6.4.	Productos finales de la digestión anaeróbica .....	40
7.7.	Generación de biogás .....	41
7.7.1.	Condiciones controladas .....	41
7.7.2.	Proceso para la obtención de biogás .....	41
7.8.	Tipos de tecnología en digestores .....	42
7.8.1.	Tipos de biodigestores según su frecuencia de carga .....	43
7.8.2.	Biodigestor semicontinuo tipo hindú .....	44

8.	HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN .....	47
8.1.	Definición de las variables .....	47
9.	CONTENIDO.....	49
10.	MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	53
10.1	Fase 1: investigación preliminar .....	53
10.2	Fase 2: diseño de investigación .....	53
10.3	Fase 3: parte experimental .....	57
11.	RESULTADOS ESPERADOS.....	63
12.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES .....	65
13.	RECURSOS NECESARIOS.....	67
14.	BIBLIOGRAFÍA .....	69



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Partes que conforman el proceso de biodigestión .....	28
2.	Proceso de biodigestión en base a humedad relativa .....	29
3.	Procesos microbiológicos del metano .....	30
4.	Clasificación de biodigestores de acuerdo a la carga .....	44
5.	Flujograma del proceso de compostaje .....	56

## TABLAS

I.	Porcentaje de humedad en los residuos sólidos municipales .....	15
II.	Técnicas para el tratamiento de RSM .....	24
III.	Variación del tiempo de retención en función de la temperatura .....	32
IV.	Características de las fases microbiológicas de la biomasa .....	36
V.	Concentración de nutrientes para el crecimiento de bacterias .....	39
VI.	Componentes del biogás en función del sustrato utilizado .....	40
VII.	Información para la validación del método .....	55
VIII.	Cronograma de actividades .....	65
IX.	Recurso humano (financiado por el estudiante investigador) .....	67
X.	Materiales e insumos (financiado por el estudiante investigador) .....	67
XI.	Infraestructura (financiado por el estudiante investigador) .....	68



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Ácido sulfhídrico
<b>NH<sub>3</sub></b>	Amoníaco
<b>H<sub>2</sub></b>	Dihidrógeno
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>kg/m<sup>3</sup></b>	Kilogramos por metro cúbico
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>%</b>	Porcentaje
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno



## GLOSARIO

<b>Biodigestor</b>	Es un digestor de desechos orgánicos, en su forma más simple, un contenedor hermético e impermeable llamado reactor, dentro del cual se deposita el material orgánico a degradar o digerir.
<b>Biogás</b>	Es un gas combustible que se genera en medios naturales por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismo y otros factores.
<b>Biomasa</b>	Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.
<b>Capacidad calorífica</b>	Es el cociente entre la cantidad de energía calorífica transferida a un cuerpo o sistema en un proceso cualquiera y el cambio de temperatura que experimenta.
<b>Digestión anaeróbica</b>	Es el proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno.

<b>Energía</b>	Capacidad de realizar un trabajo. Capacidad de obrar, transformar y poner en movimiento.
<b>Lixiviado</b>	Es el líquido resultante de un proceso de percolación de un fluido a través de un sólido.
<b>Materia orgánica</b>	Materia que se forma a partir de residuos de procedencia animal o vegetal.
<b>RSU</b>	Los Residuos Sólidos Urbanos, son aquellos que se generan en las actividades desarrolladas en los núcleos urbanos o en sus zonas de influencia, como son los domicilios particulares, los comercios, las oficinas y los servicios.
<b>TBM</b>	El Tratamiento Mecánico Biológico, es una tecnología de pretratamiento de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial. TMB combina la clasificación, tratamiento mecánico y biológico de la parte orgánica de los residuos.

## RESUMEN

Los residuos sólidos han ocasionado impactos ambientales negativos a nivel mundial por la disposición inadecuada y por el acelerado incremento, asunto asociado al aumento de la población humana, a los procesos de transformación industrial y a los hábitos de consumo. La necesidad de contribuir con un método para el tratamiento adecuado de los mismos, lleva a la búsqueda de alternativas para el aprovechamiento que estos puedan tener.

El presente diseño de investigación se fundamenta ante la falta de un programa integral a nivel municipal, para el manejo y aprovechamiento de los desechos sólidos municipales generados principalmente en los mercados. Por lo que se enfoca en el tratamiento de los desechos generados en el mercado municipal San José, ubicado en la zona siete del municipio de Guatemala.

La composición física de los residuos sólidos municipales en Guatemala está constituida en más del 85 % por residuos orgánicos; por lo que con el aprovechamiento de los mismos se disminuiría en gran medida la presión sobre el medio ambiente como soporte de actividades comerciales.

Se llevará a cabo el tratamiento de desechos sólidos municipales mediante digestión anaeróbica para la obtención de biogás, se evaluará si esta representa una solución viable a la problemática y si el biogás obtenido se puede utilizar como fuente energética para otro proceso productivo. Con esto se busca determinar las características fisicoquímicas del biogás obtenido y el potencial energético.



# 1. INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos han ocasionado impactos ambientales negativos a nivel mundial por la disposición inadecuada y por el acelerado incremento, asunto asociado al aumento de la población humana, a los procesos de transformación industrial y a los hábitos de consumo.

De acuerdo al censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el 2010, el proceso de urbanización ha concentrado al 21 % de la población en el departamento de Guatemala el cual cuenta con una extensión territorial de 2 126 kilómetros cuadrados. Los patrones de consumo de dicha población inciden en una composición más heterogénea de los residuos y en un incremento de la tasa de generación en que estos se producen. El país enfrenta retos ambientales y administrativos con respecto al manejo y disposición de los desechos sólidos municipales, ya que al igual que en otros países en vías de desarrollo, las entidades encargadas del aseo público carecen de una planificación adecuada e integral para el manejo de los mismos.

A partir de esto, se analiza la situación en el 2013 del manejo de los residuos sólidos municipales en Guatemala y se plantea el presente proyecto, con el fin de proponer una solución viable que aporte una alternativa a la problemática. El objetivo que se plantea en este proyecto es el tratamiento de los desechos sólidos municipales mediante digestión anaeróbica para la obtención de biogás, el cual se puede utilizar como fuente energética para otro proceso productivo.

El marco teórico y conceptual consta de cinco incisos principales. La primera parte da una breve definición y detalla las propiedades fisicoquímicas de los residuos sólidos municipales. Esta sección es básicamente el desglose de los conceptos iniciales que debe tener como base el lector para la comprensión de la problemática del tema.

El segundo inciso describe el impacto ambiental que tienen los residuos sólidos municipales cuando se depositan en vertederos, como estos generan los más importantes niveles de contaminación cuando tienen contacto con los recursos hídricos, con la atmósfera, en el suelo y como amenazan la flora y fauna.

El tercer inciso describe el manejo adecuado de los desechos sólidos urbanos con base en el origen y la descripción de las técnicas existentes para el tratamiento de desechos dependiendo del tipo de residuo y del área disponible para el proceso.

En el cuarto y quinto inciso se describe el concepto de digestión anaeróbica y los productos que se obtienen del proceso, así como el tipo de biodigestores que son comúnmente utilizados y la descripción del biodigestor que se diseñará a escala para efectos de la investigación.

En métodos y técnicas, se describe detalladamente el tipo de variables que se evaluarán y/o mediran. Se da una breve explicación del procedimiento a utilizar en los experimentos y las pruebas que se harán a los productos obtenidos de la digestión. Por último en el análisis de datos se menciona el análisis estadístico que se le aplicarán a los resultados de las pruebas.

## 2. ANTECEDENTES

Durante el 2013, a pesar del cambio en los hábitos de consumo y comercialización entre la población latinoamericana, los mercados continúan ocupando un lugar predominante en la comercialización de bienes y por ende en la generación de residuos sólidos. Es evidente la problemática que representan los residuos sólidos municipales (RSM) para Guatemala y el resto de Latinoamérica, la falta de un sistema de tratamiento y el mal manejo de los mismos.

En 1984, la Escuela Nacional Superior de Industrias Químicas por sus siglas en inglés ENSIC, realizó un estudio comparativo sobre el proceso de compostaje de materia orgánica en presencia de oxígeno (aerobio) y en ausencia de este (anaerobio). El enfoque del estudio fue determinar el proceso de digestión a utilizar para muestras de distinto origen, en este caso animal y vegetal.

En 1995, Bernache publicó el artículo titulado Ecología y sociedad en Guadalajara, donde indica que en varios países latinoamericanos se han desarrollado proyectos en busca de opciones para el tratamiento de desechos sólidos orgánicos. Y que a partir de 1995 la oxidación, la hidrogenación y la compactación son alternativas de tratamiento que se encuentran en etapa experimental en Guadalajara, México.

En el 2003, Baere publicó en la revista científica *Water Science and Technology*, un documento sobre el compostaje como proceso de fermentación en medio sólido. Este consistió en la utilización del sustrato húmedo, sólido e insoluble en condiciones aerobias controladas de pH, humedad, relación C/N, y temperatura que combina las fases mesófilas (15 a 45°C) y termófilas (45 a 70°C) para transformar un residuo sólido orgánico en un producto estable, higienizado y aplicable para mejorar la condición de los suelos ya que contiene materia orgánica y nutrientes.

De la Torre en el 2008, realizó un estudio de investigación para evaluar el potencial de la digestión anaeróbica en el tratamiento de desechos sólidos de comunidades rurales. Basó la elección del proceso de fermentación en el hecho de que predomina una característica importante en los residuos municipales, y es que son predominantes los de origen vegetal. Los residuos sólidos de este tipo que se generan en los mercados municipales tienen proporciones de hasta 85 % orgánicos.

### **3. OBJETIVOS**

#### **General**

Evaluar el potencial de los desechos sólidos municipales generados en el mercado San José, para la obtención de biogás mediante la digestión anaeróbica.

#### **Específicos**

1. Caracterizar los residuos sólidos orgánicos generados en la operación diaria del mercado municipal.
2. Determinar la eficiencia del método de digestión anaeróbica para el tratamiento de desechos sólidos orgánicos.
3. Determinar si el porcentaje de materia orgánica presente en los desechos sólidos generados en el mercado municipal San José, afecta el potencial energético del biogás obtenido en el proceso de biodigestión.
4. Determinar el diseño de biodigestor semicontinuo tipo hindú, es el óptimo para el tratamiento de desechos sólidos municipales.



## **4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente investigación se realiza por la falta de un programa integral a nivel municipal para el manejo y aprovechamiento de los desechos sólidos municipales generados principalmente en los mercados. Este se realiza dentro de las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, dentro de los requerimientos básicos de la gestión ambiental y específicamente dentro de la evacuación final del impacto del manejo y tratamiento de los residuos sólidos municipales.

La composición física de los residuos sólidos municipales en Guatemala está constituida en más del 85 % por residuos orgánicos; por lo que con el aprovechamiento de los mismos se disminuiría en gran medida la presión sobre el medio ambiente como soporte de actividades comerciales. Solo apuntando a una eficiente gestión integral de residuos sólidos municipales se logrará el aprovechamiento basado en principios de eficiencia, eficacia y efectividad que generen una sostenibilidad ambiental a partir de una relación costo-beneficio óptimo.

Por consiguiente, el desarrollo de programas para el aprovechamiento de los residuos sólidos municipales generados en los mercados, constituye un beneficio de alto valor para el desarrollo del país, la población guatemalteca y la disminución de la contaminación ambiental generada por la falta de ellos. Otro beneficio evidente es el ambiental, ya que actualmente los rellenos

sanitarios que fungen como depósito final de los residuos sólidos municipales se encuentran en su máxima capacidad y utilizan el método de compostaje al aire libre, lo que emite al ambiente gases tóxicos y lixiviado.

El desarrollo de este proyecto sentará un precedente sobre la factibilidad técnica y funcional del procedimiento a utilizar para el tratamiento y aprovechamiento de los residuos sólidos generados en los mercados municipales, utilizando como técnica para el tratamiento de los desechos sólidos la digestión anaeróbica.

Lo detallado anteriormente justifica el desarrollo del presente proyecto con el fin de beneficiar varios sectores del país, entre ellos la gestión municipal ya que de aprovechar los residuos municipales puede generar una fuente de energía limpia y disminuir el impacto que ocasionan los mismos en el ambiente.

## 5. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Por lo general los residuos sólidos generados en el mercado municipal San José se desechan mezclados con el resto de residuos urbanos, lo cual aumenta el problema de contaminación ambiental debido al metano liberado por el proceso de descomposición de la materia orgánica y el lixiviado que se genera como subproducto de la misma. Esto complica la disposición de los residuos sólidos que son una fuente potencial rica en materia orgánica.

Esta problemática afecta a la sociedad guatemalteca en general ya que representa un reto importante para las autoridades municipales y para las comunidades. Lo que pretende este trabajo de graduación es proponer una nueva alternativa de tratamiento de desechos en función de las necesidades de cada comunidad.

A raíz de esto surgen las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Los desechos sólidos generados en el mercado municipal San José, tienen potencial para la generación de biogás, utilizando como método de tratamiento la digestión anaeróbica?
- ¿Las características fisicoquímicas de los desechos sólidos generados en el mercado municipal San José, se pueden clasificar en su mayoría de origen orgánico?

- ¿La digestión anaeróbica constituye una alternativa para tratar los residuos sólidos orgánicos generados en mercados municipales?
- ¿La cantidad de materia orgánica presente en los residuos sólidos municipales, influye en el potencial energético del biogás obtenido como producto en el proceso de digestión anaeróbica?
- ¿Las características del biodigestor semicontinuo tipo hindú son las óptimas, para tratar los desechos sólidos municipales generados en el mercado San José?

## **6. ALCANCES DEL TEMA**

Los alcances del presente trabajo de investigación se enfocan principalmente en el manejo y gestión de los residuos sólidos municipales generados en el mercado municipal San José y en la evaluación del potencial para utilizarlos como materia prima en el proceso de generación de biogás por medio de digestión anaeróbica, con el fin de disminuir los impactos sobre las aguas, el aire, el suelo, la flora y la fauna, ocasionados por la falta de un programa integral para el manejo y tratamiento de los mismos. De esta forma se beneficia al ambiente, a la población guatemalteca, y paralelamente a la economía del país.

El presente es un estudio de carácter descriptivo y experimental, ya que se llevará a cabo el proceso de descomposición de los desechos para obtener como producto final biogás, al cual se le realizarán una serie de pruebas, con el fin de evaluar la factibilidad del uso de este tipo de desechos como materia prima, para la obtención de biogás y que sea ambientalmente aceptable.

Los desechos sólidos municipales están conformados por los desechos generados por la industria, el sector vivienda y comercial. Para efectos de este estudio el enfoque será sobre el potencial de los desechos sólidos generados en el mercado municipal San José, los cuales entran en la clasificación de desechos sólidos municipales comerciales, evaluando el uso en el proceso de digestión anaeróbica como técnica de tratamiento y para la generación de biogás.

Los alcances que pretende esta investigación se dirigen específicamente a la población a nivel nacional, a empresas privadas, varias áreas y entidades del estado, siendo estas:

- Empresas y laboratorios que se dedican al desarrollo e investigación de energías renovables y tratamiento de desechos sólidos.
- A las municipalidades de los distintos departamentos de Guatemala, como referencia para la reutilización y disposición de los desechos sólidos urbanos.
- Las empresas y otras instituciones que cuenten con el equipo necesario y utilicen como materia prima los desechos sólidos orgánicos.
- Proyectos de investigación tanto de la Escuela de Postgrado como de la Escuela de Ingeniería Química o Ambiental de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- A los inquilinos del mercado, para el aprovechamiento de estos desechos sólidos
- A la población guatemalteca en general, en especial a los ciudadanos que residen en áreas colindantes a mercados municipales

## 7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 7.1 Residuos sólidos municipales

“Los residuos sólidos municipales son aquellos que se originan en los núcleos de población como consecuencia de la actividad habitual y diaria del ser humano. Se clasifican en dos grandes grupos: Residuos Sólidos Urbanos, RSU, y Aguas Residuales Urbanas, ARU.” (De la Torre Caritas, 2008)

De acuerdo al estudio realizado por el BID (1997), se determina la siguiente clasificación de los residuos sólidos municipales:

- Materia orgánica: son los restos procedentes de la limpieza o la preparación de los alimentos junto la comida que sobra.
- Papel y cartón: periódicos, revistas, publicidad, cajas y embalajes, etc.
- Plásticos: botellas, bolsas, embalajes, platos desechables, etc.
- Vidrio: botellas, frascos diversos, vajilla rota, etc.
- Metales: latas, botes, etc.
- Otros

En el caso de Guatemala, la cantidad de materia orgánica constituye hasta las tres cuartas partes del total de desechos sólidos municipales, y mucho menor es la cantidad de papeles, plásticos, vidrio y metales.

#### **7.1.1. Propiedades fisicoquímicas de los residuos sólidos urbanos**

Dentro de las propiedades físicas de los residuos sólidos urbanos, destacan las siguientes: humedad, peso específico y granulometría.

Humedad: la humedad presente en los desechos sólidos municipales oscila alrededor del 40 % en peso, con un margen que puede situarse entre el 25 y el 60 %, (De la Torre Caritas, 2008).

Usualmente, por las circunstancias en las cuales se disponen los residuos municipales, no existe una separación según el origen, estos tienden a formar una masa donde se unifica la humedad ya que algunos elementos absorben la humedad de otros.

Tabla I. **Porcentaje de humedad en los residuos sólidos municipales o urbanos**

HUMEDAD RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS		
Componentes	Humedad en %	
	Sin mezclar	Mezclados
Orgánicos	68	65
Papel y cartón	12	24
Plásticos	1	2
Madera	20	24
Téxtiles	12	19
Vidrio	2	3
Metales	2	2
Valores muy variables si existen restos de líquidos en el interior de los recipientes.		
Fuente: La Enciclopedia del Medio Ambiente Urbano		

Fuente: Martínez Roberto, Enciclopedia del medio ambiente urbano, p. 110.

**Peso específico:** el peso específico unitario de cada desecho no indica que la mezcla tenga un valor global proporcional al de los componentes. Sin embargo según Arias (1978), conforme se vayan homogenizando los desechos estos se acercarán más al cálculo matemático, que da unos valores medios teóricos para residuos sin compactar de  $80 \text{ kg/m}^3$ . Esto sin tomar en cuenta las variaciones de acuerdo a la composición de los residuos en cada localidad.

**Granulometría:** el grado de segregación de los materiales y el tamaño de los residuos urbanos, constituyen un valor de suma importancia para determinar las dimensiones del biodigestor y los componentes.

## **7.2. Impacto ambiental de los RSU**

Además de ser un recurso valioso para los suelos pobres en nutrientes, los residuos sólidos municipales generan los más importantes niveles de contaminación cuando se depositan en vertederos. Algunas formas de desechos orgánicos pueden causar problemas de salud pública, tales como enfermedades, malos olores y las plagas.

Desde el punto de vista del impacto medioambiental, la mejor estrategia de gestión y eliminación de residuos consiste en combinar procesos de recolección selectiva con reciclaje y compostaje, disminuyendo las opciones de vertido e incineración de los desechos.

En la guía realizada por el Banco Interamericano de Desarrollo en 1997 para la Evaluación de Impacto Ambiental de los desechos sólidos municipales, se determinó que el manejo inadecuado de los residuos sólidos pueden producir impactos sobre las aguas, el aire, el suelo, la flora y la fauna y ecosistemas tales como:

Contaminación de los recursos hídricos: el vertimiento de residuos sólidos sin tratamiento puede contaminar las aguas superficiales o subterráneas usadas para el abastecimiento público, además de ocasionar inundaciones por obstrucción de los drenajes.

Contaminación atmosférica: los principales impactos asociados a la contaminación atmosférica son los malos olores en las proximidades de los

sitios de disposición final y la generación de gases asociados a la digestión bacteriana de la materia orgánica.

Contaminación del suelo: la descarga y acumulación de residuos en localidades urbanas o rurales producen impactos estéticos y polvos irritantes. El suelo en el que subyacen los desechos sólidos depositados en un vertedero a cielo abierto o en un relleno sanitario se contamina con microorganismos patógenos, metales pesados y otro tipo de sustancias tóxicas que se encuentran en el lixiviado producto de la descomposición de los desechos.

Amenazas a flora y fauna: los impactos ambientales directos sobre la flora y fauna se encuentran asociados, a la remoción de especímenes de la flora y a la perturbación de la fauna nativa durante la construcción y operación inadecuada de un sistema de disposición final de residuos.

### **7.3. Manejo de los residuos sólidos urbanos**

El manejo adecuado de residuos es el conjunto de operaciones que mejoran la efectividad financiera y la adecuación social y ambiental del almacenamiento, barrido y limpieza de áreas públicas, recolección, transferencia, transporte, tratamiento, disposición final u otra operación necesaria además de contribuir para minimizar las cantidades de residuos generados a nivel domiciliario, agrícola, comercial, industrial y de las instituciones públicas, (De la Torre Caritas, 2008). Es necesario que como país se promuevan políticas y programas nacionales que incentiven la reducción de la generación de residuos sólidos, el reciclaje y estimulen la adopción de tecnologías limpias para la producción de energía.

El manejo de los residuos sólidos debe incluir una adecuada planificación, diseño y utilización de tecnologías y prácticas apropiadas para ser fuente de beneficio social y económico a través de la creación de nuevas oportunidades de empleo local y de generación de ingreso por la venta de materiales usados, ahorro de energía por el reprocesamiento de materiales reutilizables que se desechan y la prevención de costos generados por la degradación ambiental, la seguridad y la asistencia médica de personas que se encuentren expuestas a los mismos.

El manejo adecuado de residuos sólidos debe considerar los siguientes aspectos (Arias J., 1978):

- Las características físicas y el volumen de basura a ser manejado
- Características urbanísticas: uso del suelo, tendencias, proyección de la población, del volumen y de las características de la basura considerados en un mediano plazo, disponibilidad de terreno apropiado para instalaciones de tratamiento y disposición final de los residuos, aspectos culturales y de comportamiento locales en relación al manejo de la basura, grado de organización comunitaria.
- Planificación apropiada que refleje la vida útil de los equipos mecánicos y del sistema de disposición final de residuos.
- Características operacionales del sistema actual de manejo de residuos, efectividad y conveniencia.
- Organización institucional, arreglos financieros y fuentes de ingresos

- Actividades industriales presentes y futuras
- Estado actual de las calles y avenidas, planes de mejoramiento y extensión de las mismas.
- Recursos hídricos que deben ser protegidos de la posible contaminación originada por los sitios de disposición de residuos.
- Mercado potencial para materiales de rehuso o reciclables

#### **7.4. Problemática e implicaciones técnicas de la gestión de los RSU en Guatemala**

Con respecto a la disposición final de los residuos sólidos municipales en Guatemala, el 100 % de estos continúa depositándose en el suelo, bajo diferentes modalidades; en tiraderos a cielo abierto y rellenos de tierra no controlados. No obstante el hecho es que los tiraderos a cielo abierto en el país no cumplen en la mayoría con la legislación ambiental en cuanto a el funcionamiento, ya que no existe un control estricto debido básicamente a la presencia de personas que recogen desechos en la zona.

Otra limitante sería a la que se enfrentan los municipios del país para querer modernizar la gestión de los residuos sólidos municipales, es que la mayor parte de éstos carecen dentro de sus organigramas administrativos de una dependencia que coordine la gestión de los mismos.

Esto último tiene serias implicaciones negativas en la gestión de los residuos sólidos en los municipios del país, ya que ninguno realiza un

tratamiento previo a la disposición final, como puede ser la compactación para optimizar los sistemas de recolección y transporte; en el mejor de los casos la separación de materiales de los residuos se lleva a cabo por los clasificadores que trabajan en los tiraderos, estos realizan esta actividad posterior al período de recolección, lo cual implica un serio riesgo de salud pública, ya que estas personas se ven sometidas a la exposición directa de los patógenos contenidos en los residuos.

## **7.5. Técnicas para el tratamiento de RSU**

La gestión de los residuos urbanos, industriales y comerciales tradicionalmente han consistido en la recolección seguido por la disposición. Dependiendo del tipo de residuo y el área, el proceso puede continuar con un tratamiento específico. Este tratamiento puede consistir en reducir la peligrosidad, recuperar material para el reciclaje, producir energía, o reducir el volumen de los residuos para una disposición más eficiente. Las técnicas más utilizadas para el tratamiento de residuos sólidos municipales se describen a continuación.

### **7.5.1. Vertederos**

La disposición en los vertederos es el método más tradicional de recogida de basura, y se mantiene como una práctica común en la mayor parte de países. Históricamente, los vertederos se establecían en canteras en desuso, minas abandonadas, etc.

Un vertedero correctamente diseñado y bien gestionado puede ser un método higiénico y relativamente barato de eliminar materiales de desecho de

una forma que reduce al mínimo el impacto sobre el entorno local. Vertederos más viejos, mal diseñados pueden generar un impacto ambiental negativo. Otro subproducto de los vertederos es el gas de vertedero, compuesto sobre todo de gas metano y dióxido de carbono, que se produce al descomponerse los restos orgánicos de la basura. Este gas puede crear problemas de olor, mata a la vegetación de superficie, y es un gas de efecto invernadero, (ENSIC, 1984).

### **7.5.2. Incineración**

La incineración es un método de recogida de basuras que implica la combustión de la basura a altas temperaturas. La incineración de materiales de desecho convierte la basura en calor, emisiones gaseosas y ceniza residual sólida. Otros tipos de tratamiento térmico incluyen pirolisis y gasificación. (ENSIC, 1984)

### **7.5.3. Compostaje y digestión anaeróbica**

La materia orgánica se descompone por vía aeróbica (compostaje), con alta presencia de oxígeno o por vía anaeróbica (metanización), con nula o muy poca presencia de oxígeno.

El compostaje consiste en la descomposición aeróbica (con oxígeno) de residuos orgánicos como restos vegetales, animales, excrementos y purines, por medio de la reproducción masiva de bacterias aerobias termófilas que están presentes en forma natural en cualquier lugar. El material orgánico resultante se puede reciclar como abono para agricultura (De la Torre Caritas, 2008). Hay

una gran variedad de métodos de compostaje y metanización y métodos híbridos con fases aerobia y anaerobia.

#### **7.5.4. Tratamiento mecánico biológico**

El Tratamiento Mecánico Biológico (TMB) es un tipo de tecnología que combina la clasificación mecánica y el tratamiento mecánico biológico de los residuos. TMB también es llamado a veces Tratamiento Biológico Mecánico (TBM), aunque esto simplemente se refiere al orden del tratamiento.

En él se separan los residuos peligrosos como aceites, elementos reciclables de la cadena de residuos que pueden ser variados como metales, plásticos y cristal o los procesa para producir un combustible de alto poder calorífico, denominado Combustible Sólido Recuperado (CSR) que puede ser usado en hornos de cemento o centrales eléctricas. Los sistemas que son configurados para producir CSR incluyen Herhofand Ecodeco. También existe la forma de usar los residuos con alto valor calorífico directo como sustitución de combustible. El tratamiento mecánico se refiere a la homogeneización de los desechos para el tratamiento biológico, (H. A. R., 1979).

El elemento biológico se refiere a la digestión anaerobia o aerobia. En caso de desechos orgánicos se habla de compostaje. La digestión anaerobia degrada los componentes biodegradables de la basura para producir biogás. El biogás puede ser usado para generar energía renovable. Por la carencia total de biogás este proceso es muy recomendable para un mecanismo de desarrollo limpio. Con la combustión de la fracción con alto valor calorífico se puede producir energía verde en incineradoras especiales.

### **7.5.5. Pirolisis y gasificación**

La pirolisis y la gasificación son formas de tratamiento térmico en las que los residuos se calientan a altas temperaturas con una cantidad de oxígeno limitada. El proceso se lleva a cabo en un contenedor sellado a alta presión. Convertir el material en energía es más eficiente que la incineración directa, se genera energía que puede recuperarse y usarse, más que en la combustión simple.

La pirolisis de los residuos sólidos convierte el material en productos sólidos, líquidos y gaseosos. El aceite líquido y el gas pueden ser quemados para producir energía o refinado en otros productos. El residuo sólido puede ser refinado en otros productos como el carbón activado, (ENSIC, 1984).

La gasificación es usada para convertir materiales orgánicos directamente en un gas sintético formado por monóxido de carbono e hidrógeno. El gas se puede quemar directamente para producir vapor o en un motor térmico para producir electricidad. La gasificación se emplea en centrales eléctricas de biomasa para producir la energía renovable y calor.

Las técnicas de recuperación de suelo varían ampliamente dependiendo del origen del residuo, volumen de desechos, entre otros. Las técnicas más utilizadas son el relleno sanitario o vertederos, compostaje, incineración y reciclaje. En la tabla II se muestran las ventajas y problemas que se enfrentan con algunos de los métodos.

Tabla II. **Técnicas para el tratamiento de residuos sólidos municipales**

TÉCNICA	VENTAJAS	PROBLEMAS
Relleno sanitario	Recuperación de zonas degradadas. Aprovechamiento de gases.	Exige extensas áreas aisladas. Características geológicas especiales.
Compostaje	Reducción de volumen. Producción de acondicionadores de suelo.	Contaminación de los suelos y vegetación por la presencia de metales pesados. Bajos valores de nitrógeno, fósforo y potasio.
Incineración	Reducción de pesos y de volúmenes. Descontaminación biológica.	Contaminación atmosférica. Elevados costos de operación y mantenimiento.
Reciclaje	Aprovechamiento de los materiales. Ahorro de energía. Reducción de residuos. Sustentabilidad ambiental.	Riesgos ocupacionales inherentes a la recuperación informal de materiales reciclables (alto potencial de contaminación).

Fuente: BID. Informe Banco Interamericano de Desarrollo. p. 87.

## 7.6. Digestión anaeróbica

“La digestión anaerobia es un proceso biológico degradativo en ausencia de oxígeno en el cual, parte de la materia orgánica contenida en un sustrato es convertida en una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono, mediante la acción de un conjunto de microorganismos en ausencia de aceptores de electrones de carácter inorgánico”, (Harrison, 1994). Utilizando biodigestores para el proceso se aprovecha esta liberación de gases para luego ser usados como combustible. La intensidad y duración del proceso anaeróbico

varían dependiendo de diversos factores, entre los que se destacan la temperatura y el pH del material biodegradado.

### **7.6.1. Partes que conforman el proceso de digestión**

La digestión anaeróbica es el proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno. Este proceso genera diversos gases, entre los cuales el dióxido de carbono y el metano son los más abundantes. En biodigestores se aprovecha esta liberación de gases para luego ser usados como combustible. A continuación se detallan las etapas que conforman el proceso de biodigestión utilizando un biodigestor.

#### **7.6.1.1 Cámara de carga**

En esta área se prepara la alimentación del digestor, es decir lugar donde se mezclan los residuos sólidos, previamente triturados, con agua. Dependiendo del tipo de digestor, puede estar conectado directamente o puede ser una simple cubeta.

La cámara de carga debe encontrarse aislada térmicamente, para poder luego llevar la mezcla a temperatura del material que está en fermentación dentro del digestor, (De la Torre Caritas, 2008).

### **7.6.1.2 Digestor o cámara de digestión**

El digestor es el lugar donde se produce la fermentación, de manera simple se podría decir que es un contenedor, el cual está cerrado herméticamente, en el cual se depositan los desechos.

No importa cuál sea el sistema a utilizar, la cámara de digestión deberá cumplir los siguientes requisitos, (De la Torre Caritas, 2008):

- Impermeable al agua y al gas, para evitar las pérdidas de líquido en el proceso de digestión, con el consecuente peligro de contaminación; y la pérdida de gas que disminuirá la eficacia y provocaría el riesgo de explosiones en las cercanías del digestor.
- Aislante, las pérdidas de calor deben ser evitadas, ya que al mantener la temperatura de digestión se logra el aporte de calor externo y por lo tanto un ahorro en la cantidad de energía neta disponible. Este aspecto es particularmente importante para los digestores que trabajan a temperaturas mesofílicas y termofílicas.
- Mínima relación superficie/volumen, a fin de ahorrar material y mano de obra, como así también reducir la superficie de intercambio de calor.
- Estabilidad estructural, capaz de soportar cargas estáticas y dinámicas; incluyendo un estudio del suelo, especialmente en los que serán construidos bajo tierra, donde se pueda afectar alguna capa freática.

### **7.6.1.3 Almacenamiento del biogás**

Los digestores de biogás necesitan un almacén de gas para guardar el gas producido en las horas que no son utilizadas, puesto que normalmente la producción de biogás es mayor al consumo. Es por ello que las dimensiones de este almacenamiento dependerán del consumo de biogás.

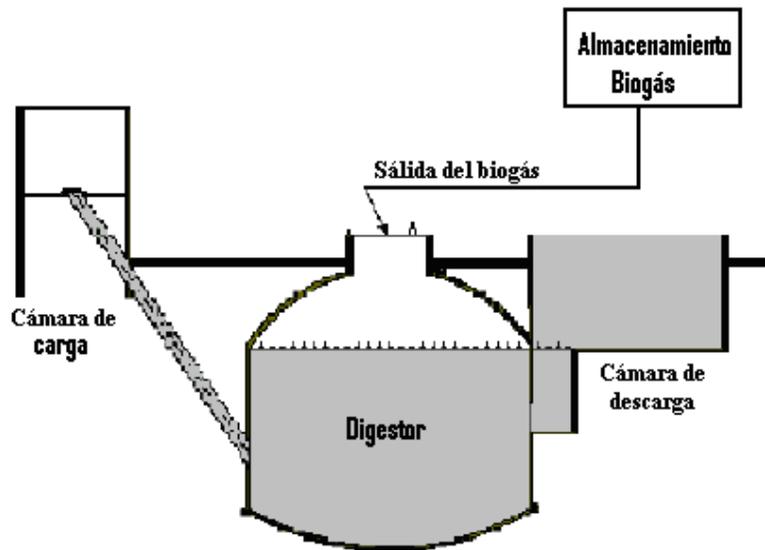
### **7.6.1.4 Gasómetros**

Para que el biogás se mantenga a bajas presiones en el almacén de biogás es necesario que se cuente con dispositivos como gasómetros o válvulas de seguridad.

### **7.6.1.5 Cámara de descarga**

Lugar donde se depositan los lodos o fertilizantes, el diseño y dimensionamiento depende fundamentalmente del uso que se le da al efluente. Como mínimo se deberá tener un volumen 2 a 3 veces superior al de descarga diaria, (De la Torre Caritas, 2008).

Figura 1. Partes que conforman el proceso de biodigestión

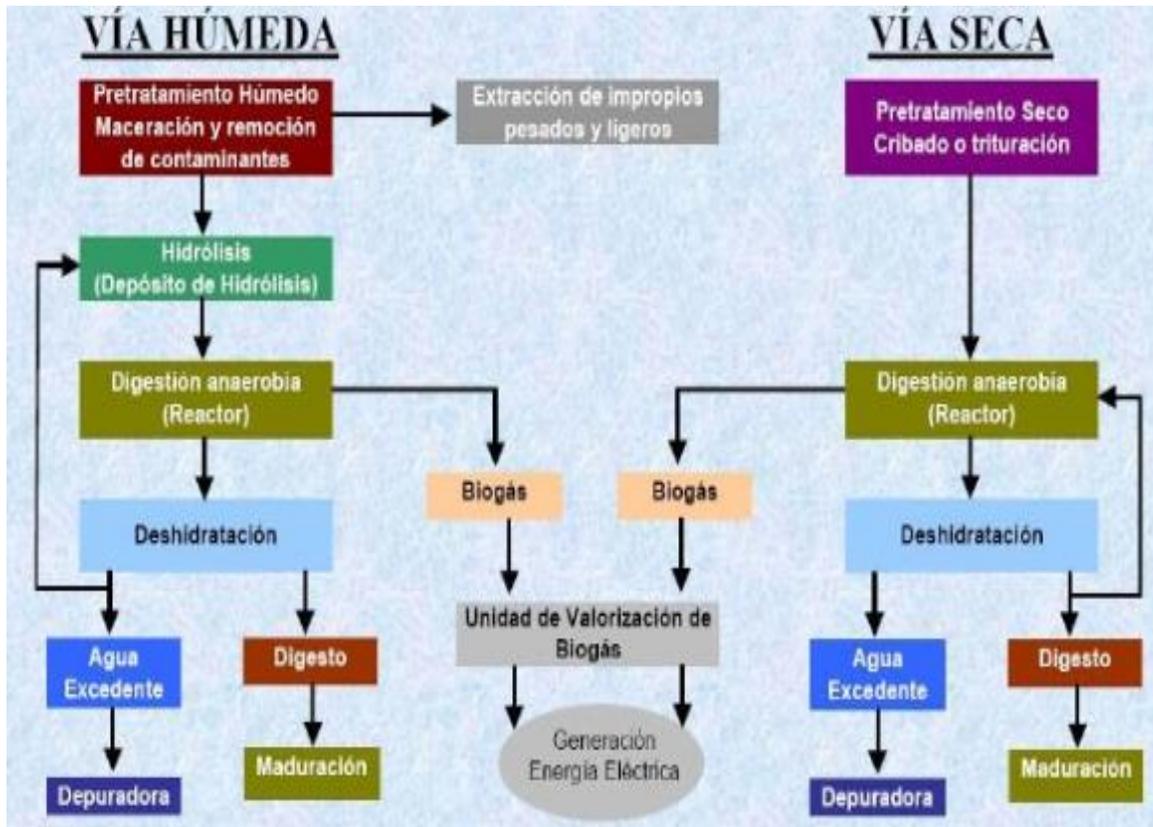


Fuente: De la Torre Caritas. Digestión anaerobia en comunidades rurales. p. 33.

### 7.6.2. Proceso microbiológico y bioquímico de la digestión anaeróbica

Dependiendo del porcentaje de humedad de la fracción de desechos alimentados al proceso, se considera la vía húmeda o la vía seca.

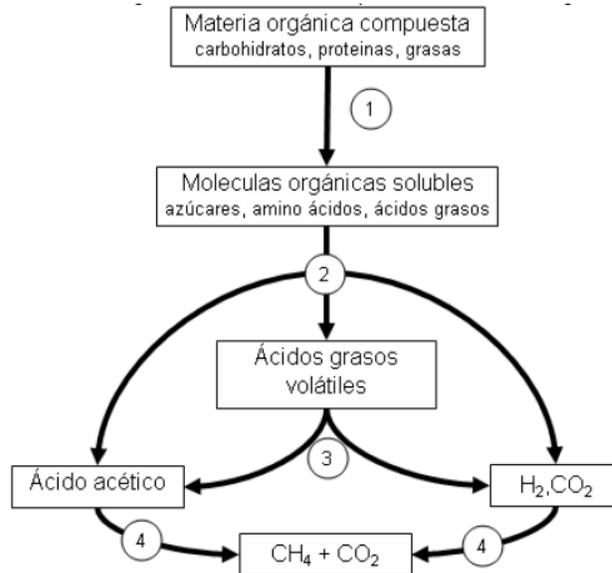
Figura 2. **Proceso de biodigestión con base en humedad relativa**



Fuente: Harrison. Recycling organic wastes. p. 178.

El proceso microbiológico del metano está descrito desde diversas perspectivas, sin embargo, los autores coinciden en 4 fases importantes en la evolución de las bacterias; 1) Hidrólisis; 2) Acidogénesis; 3) Acetogénesis; y 4) Metanogénesis, (Harrison, 1994).

Figura 3. **Procesos microbiológicos del metano**



Fuente: De la Torre Caritas. Digestión anaerobia en comunidades rurales. p. 34.

### 7.6.2.1 **Hidrólisis**

Denominada también la fase de licuefacción, es el primer paso necesario para la degradación de los biopolímeros microbianos complejos que constituyen la biomasa en forma de moléculas más simples. Es decir, la materia orgánica formada por polímeros es hidrolizada por la acción de enzimas producidas por bacterias excretadas por las bacterias fermentativas, transformándose en compuestos simples y solubles tales como: aminoácidos, glicéridos, péptidos (compuesto polímero o proteína formada por la unión de dos o más moléculas de aminoácidos) y azúcares.

La hidrólisis es importante ya que de ella dependen los alimentos para los grupos posteriores de bacterias; además elimina cualquier traza de oxígeno disuelto que pueda quedar en la materia orgánica. Suele ser difícil la distinción entre esta fase y la de acidogénica (acidogénesis), puesto que algunas moléculas son absorbidas directamente por los microorganismos sin ser descompuestas, es decir, se forman directamente los ácidos volátiles simples.

La etapa hidrolítica puede ser la etapa limitante de la velocidad del proceso global, sobretodo tratando residuos con alto contenido en sólidos. Incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar el conjunto del proceso, (Otoniel Buen Rostro, 2008).

De acuerdo a De la torre Caritas (2008), no todas las partículas del sustrato tienen la misma facilidad para degradarse, existen factores que afectan la hidrólisis tales como:

- Los factores principales que afectan a los procesos de degradación de las partículas son el pH (solubilización de las partículas) y las variaciones de temperatura.
- Las partículas grandes que tienen bajo ratio de área por volumen son más lentas en la degradación que las partículas pequeñas. La dependencia del tamaño de las partículas ha motivado a desarrollar diversos modelos que se basan en éste parámetro para simular la velocidad del proceso hidrolítico.

- Con certeza, los almidones, proteínas y la celulosa se degradan a diferentes ritmos para un rango de 15°C-35°C, (Harrison, 1994).
- Tanto la lignina como las ceras retardan la hidrólisis de las partículas de las que están relacionadas o asociadas.
- La presencia de algún compuesto inhibidor de la población bacteriana es responsable de la producción de enzimas extracelulares. Por ejemplo, la concentración de amonio influye negativamente en la generación de peptonas, (Padilla E. y Guzmán A., 1995); la concentración total de ácidos grasos volátiles limitan la tasa de hidrólisis de carbohidratos y proteínas; además, Harrison (1994) considera que la tasa de hidrólisis es inhibida por la concentración de oxígeno y nitrógeno.

Tabla III. **Variación del tiempo de retención en función de la temperatura en diversos componentes de la biomasa**

Componente	Temperatura (°C)	Tiempo de retención de sólidos (días)				
		5	10	15	30	60
Lípidos	35	0,01	0,17	0,11	0,06	0,04
	25	0	0,01	0,09	0,07	0,03
	20	0	0	0,02	0,05	0,03
	15	-	0	0	0	0
Celulosa	35	1,95	1,21	0,62	0,38	0,21
	25	0,29	0,27	0,27	0,34	0,16
	20	0,09	0,14	0,13	0,14	0,10
	15	-	0,05	0,03	0,10	0,08
Proteínas	35	0,10	0,05	0,03	0,02	0,01
	25	0,09	0,04	0,03	0,02	0,01
	20	0,08	0,04	0,03	0,02	0,01
	15	-	0,03	0,02	0,01	0,01

Fuente: De la Torre Caritas. Digestión anaerobia en comunidades rurales. p. 78.

### 7.6.2.2 Acidogénesis

En esta fase las bacterias formadoras de ácidos, llamadas acidogénicas que viven tanto en presencia como ausencia de oxígeno, producen varios compuestos simples o de cadena corta causados por la fermentación ácido - bacteriana, que serán los productos finales para el metabolismo anaerobio.

Además del ácido acético que será consumido por las bacterias metanogénicas, se forman otros ácidos volátiles como hidrógeno y dióxido de carbono así como los compuestos propiónico y butírico, que tendrán que ser oxidados por bacterias acetogénicas a sustratos que puedan utilizar las metanogénicas, (De la Torre Caritas, 2008).

Brinton y Droffner (1994) describen las acciones que se dan en esta etapa de fermentación como:

- Fermentación de carbohidratos solubles
- Fermentación de aminoácidos
- Y la fermentación de hidratos de carbono y aminoácidos

Los factores que afectan en esta etapa son la concentración de hidrógeno y la influencia del pH, son los principales inhibidores de la oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga. En la unión de las fases de hidrólisis y acidogénesis, las bacterias toman la materia orgánica virgen en las cadenas de estructuras carbonadas y las van rompiendo y transformando en

cadenas más cortas y simples liberando hidrógeno y dióxido de carbono. Este trabajo es llevado a cabo por un complejo de microorganismos de distinto tipo que son en su gran mayoría anaerobios facultativos, (Brinton W. y Droffner M., 1994).

### **7.6.2.3 Acetogénesis**

La acetogénesis es el proceso a través del cual bacterias anaerobias producen acetato a partir de diversas fuentes de hidrógeno y de carbono. Las diferentes especies bacterianas que son capaces de realizar la acetogénesis se denominan colectivamente acetógenos. Algunos de los productos formados por la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, sin embargo existen otros productos que necesitan ser transformados en productos más sencillos como los acetatos o hidrógeno a través de las bacterias acetogénicas, (Baere, 2003).

Los procesos acetogénicos necesitan de energía, por lo que necesitan ser ayudados por los organismos metanogénicos u otros organismos consumidores de hidrógeno y la energía libre de reacción depende de la presión parcial de hidrógeno del medio, (De la Torre Caritas, 2008).

De acuerdo a Baere (2003) los inhibidores en la etapa de la acetogénesis son los siguientes:

- La acumulación de hidrógeno molecular es el principal inhibidor de la acetogénesis.

- La oxidación del propiónico sólo será posible si la presión parcial del H<sub>2</sub> está por debajo de  $5,8 \cdot 10^{-5}$  atmósferas.
- Otras sustancias consideradas inhibidoras de ésta fase son, el propio ácido acético (producto de la acetogénesis) o los ácidos grasos de cadena larga.
- Es afectado por el valor del pH

#### **7.6.2.4 Metanogénesis**

La acción de las bacterias productoras de metano en esta fase, es el factor determinante para el desarrollo de la fermentación anaerobia, debido a que estos microorganismos son muy sensibles a los cambios bruscos de temperatura y de acidez, además varían de acuerdo a la toxicidad de ciertos materiales presentes en el medio, ocasionando la reducción inclusive la paralización de la digestión, (De la Torre Caritas, 2008).

Tabla IV. **Características de las fases microbiológicas de la biomasa**

Característica	Fase Hidrólisis	Fase Acidogénica	Fase Acetogénica	Fase Metanogénica
Tipo de Bacteria	Bacterias hidrolíticas	Bacterias facultativas (pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno)	Bacterias facultativas (pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno)	Bacterias anaeróbicas estrictas (no pueden vivir en presencia de oxígeno)
Velocidad de reproducción	Depende del contenido del sustrato	Reproducción muy rápida (alta tasa reproductiva)		Reproducción lenta (baja tasa reproductiva)
Elementos inhibidores	pH, tamaño de partículas, metales pesados dentro del sustrato	Poco sensibles a los cambios de acidez y temperatura	Sensibles a la concentración del hidrógeno, la acidez y AGCL	Muy sensibles a los cambios de acidez y temperatura
Productos	Aminoácidos, azúcares, ácidos grasos, alcoholes	Propionato, butirato, acetato, dióxido de carbono e hidrógeno	Principal producto acetatos.	Principales productos finales, metano y CO <sub>2</sub>

Fuente: De la Torre Caritas. Digestión anaerobia en comunidades rurales. p. 41

### 7.6.3. Condiciones experimentales para la digestión anaeróbica

Los cambios o variaciones en determinados parámetros pueden modificar la conducta de las bacterias y por ende la calidad de los productos obtenidos en la biodigestión. Es por eso de suma importancia determinar las condiciones experimentales a monitorear durante el desarrollo del proyecto, De la torre Caritas (2008) describe los siguientes parámetros:

- Valor de acidez (pH)

El pH proviene de Potencial Hidrógeno, y se dice que un medio es ácido cuando los valores del pH varían de 0-7 y será alcalino si 7-14. Para garantizar un correcto desarrollo microbiológico habría que trabajar en torno a pH neutro, debido a que la acidez o alcalinidad afecta la actividad enzimática de los microorganismos. Para medir el pH se utilizará un aparato electrónico llamado potenciómetro.

El objetivo del balance de acidez, es crear una relación de trabajo estable entre la población microbiana en el digestor. Para conseguirlo es necesario que se mantengan constantes las temperaturas de funcionamiento así como las características de los sustratos; ya que cualquier variación rápida de las condiciones puede romper este equilibrio en el digestor y hará que la población microbiana cambie drásticamente, (Baere, 2003).

- Temperatura de funcionamiento:

La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos responsables, que a su vez dependen de la temperatura, (Baere, 2003).

La temperatura es un factor que afecta de forma directa la eficiencia del digestor, se puede operar en tres rangos de temperaturas:

- ✓ Baja temperatura: temperaturas menores a 35 °C, denominado rango psicrófilico, el máximo rendimiento para este rango de temperaturas se logra entre 15-18 °C.
  - ✓ Media temperatura: temperaturas situadas entre 29-40 °C con óptimo entre 35-40 °C, se le denomina rango Mesófilico; la producción de gas aumenta un 1 % por cada grado que se eleve la temperatura.
  - ✓ Alta temperatura: Trabajo con temperaturas entre 40-65 °C con óptimo entre 55-60 °C, denominado rango termófilico. A temperaturas superiores a 65 °C, el balance energético se vuelve desfavorable, ya que el sistema de digestión es más sensible a pequeñas variaciones de temperaturas y el proceso de control del biodigestor es complejo.
- Contenido de sólidos

Es un factor importante en el proceso anaerobio ya que si la alimentación es muy diluida, los microorganismos no tienen alimento suficiente para sobrevivir, por el contrario, una alimentación muy concentrada reduce la movilidad de las bacterias.

Los sólidos totales están formados por los sólidos fijos y los sólidos volátiles; y es una medida que se hace en materia seca, primero se quita la humedad calentando la carga de alimentación o los purines a aproximadamente 105°C, (Baere, 2003).

$$\text{Sólidos totales (\%)} = \frac{\text{peso}_{105^{\circ}\text{C}} - \text{tara}}{\text{peso muestra}} * 100$$

Ecuación No.1

- **Nutrientes**

La variación de los nutrientes afecta las velocidades del proceso de digestión anaerobia. La biomasa necesita para el desarrollo, del suministro de una serie de nutrientes minerales, además de una fuente de carbono y de energía. Para que se produzca el crecimiento y la actividad microbiana, estos elementos deben estar presentes y disponibles en el medio y su ausencia o escasez pueden reducir la velocidad del proceso de digestión anaerobia. Los principales nutrientes que presenta el sistema anaerobio son nitrógeno, sulfuro, fósforo, hierro, cobalto, níquel, molibdeno, selenio, y pequeñas cantidades de otros componentes, (Arias J., 1978).

Tabla V. **Concentración de nutrientes necesarios para el crecimiento de las bacterias**

	<b>g/kg SSV</b>	<b>g/kg DQO</b>
<b>Nitrógeno</b>	80-120	55-85
<b>Fósforo</b>	10-25	7-18
<b>Azufre</b>	10-25	7-18
<b>Hierro</b>	5-15	4-11

Fuente: Arias J. Digestión anaerobia de desechos orgánicos. p. 93

#### 7.6.4. Productos finales de la digestión anaeróbica

Los principales productos del proceso de digestión anaerobia, trabajando en sistemas de alta carga y en mezcla completa, son el biogás y un efluente estabilizado;

Biogás: es una mezcla gaseosa formada principalmente por metano y dióxido de carbono y pequeñas proporciones de otros gases como H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, etc. La composición del biogás depende del material digerido y del proceso de biodigestión, (Harrison, 1994).

Efluente: es el otro producto resultante de la degradación anaeróbica, es la mezcla del lixiviado estabilizado y la biomasa microbiana producida.

Tabla VI. **Componentes del biogás en función del sustrato utilizado**

Gases	Desechos agrícolas	Lodos Cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios	Características
Metano CH <sub>4</sub>	30-80%	50-80%	40-80%	45-65%	Inflamable, Inodoro
CO <sub>2</sub>	30-50%	20-50%	30-50%	30-55%	Forma ácido, inodoro, asfixiante
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo
H <sub>2</sub> S	100-7000 Ppm	0-1000 ppm 0-1%	0-1000 ppm 0-1%	0-500 ppm	Corrosivo, inflamable, tóxico, olor
Hidrógeno H <sub>2</sub>	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%	Inflamable, Inodoro
Amoniaco NH <sub>3</sub>	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	Corrosivo, Irritante
Nitrógeno N <sub>2</sub>	0-15%	0-3%	0-1%	0-30%	Inerte, inodoro, Asfixiante
Oxígeno O <sub>2</sub>	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%	Corrosivo
Orgánicos	Trazas	Trazas	0-5 ppm	10 ppm	Corrosivos, Olores

Fuente: Brinton W. y Droffner M. Microbial approaches to caracterizatio of composting process. p. 132.

## **7.7. Generación de biogás**

“Se le llama biogás a la mezcla constituida por metano (CH<sub>4</sub>) en una proporción que oscila entre un 50 % a un 70 % y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S).”, (Enciclopedia del medio ambiente urbano, Martínez. 2006).

### **7.7.1. Condiciones controladas**

Los factores que influyen en el proceso de biogás y deben para efectos del desarrollo de este proyecto, ser controladas son las siguientes:

- Temperatura
- Acidez
- Contenido en sólidos
- Nutrientes

### **7.7.2. Proceso para la obtención de biogás**

Según Harrison (1994), el proceso de obtención de biogás se clasifica según la forma de alimentación al biodigestor, según la temperatura de producción y las etapas de fermentación. A continuación el desglose;

- Según la forma de alimentación: Fermentación continua, semicontinua y por lotes.
- Según la temperatura para la producción de biogás: Fermentación termofílica, mesofílica o a temperatura ambiente.
- Según las etapas de fermentación: Fermentación en una sola etapa, en dos etapas o más.

### **7.8. Tipos de tecnología en digestores**

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, etcétera) en determinada dilución de agua para que a través de la fermentación anaerobia se produzca gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, y además, se disminuya el potencial contaminante de los excrementos, (De la Torre Caritas, 2008).

Este sistema también puede incluir una cámara de carga y nivelación del agua residual antes del reactor, un dispositivo para captar y almacenar el biogás y cámaras de hidrogenación y postratamiento a la salida del reactor.

El fenómeno de indigestible ocurre porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos presentes en los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, estos producen biogás que es utilizado como

combustible. Como resultado de este proceso se generan residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas.

### **7.8.1. Tipos de biodigestores según su frecuencia de carga**

Los biodigestores se clasifican según su forma de operación y frecuencia de carga, o sea la frecuencia con la que se le introduce materia a descomponer.

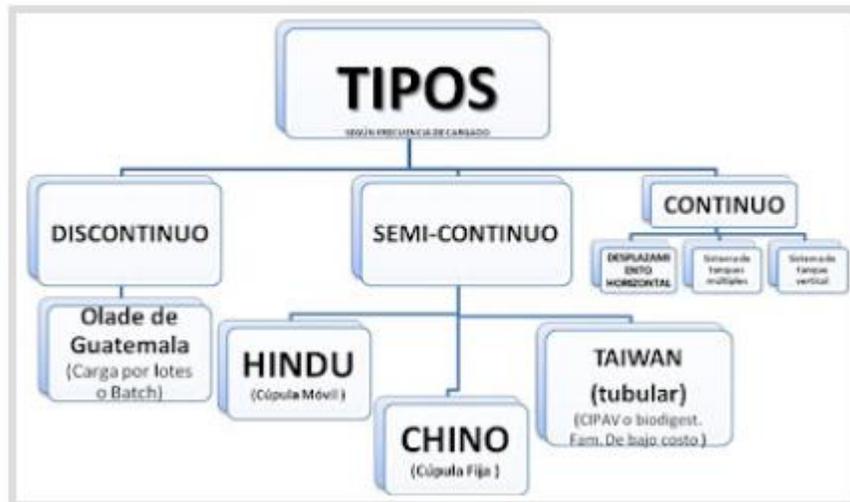
**Discontinuo:** se cargan una sola vez y se retira cuando ya se ha dejado de producir gas, solo entonces se renueva de materia orgánica. Se usa cuando la disponibilidad de materia orgánica es limitada o intermitente.

**Semicontinuo:** se cargan en lapsos cortos como de 12 horas, 1 vez al día, o cada dos días, se utiliza cuando la disponibilidad de materia orgánica es constante en los días. Los principales, son el hindú, el chino y el taiwanés, cada uno con ventajas y desventajas, como si se quiere aprovechar más el gas, o el biol, si se quiere usarlo para fines sanitarios o de producción, diversas ventajas que se observarán más adelante.

**Continuo:** se cargan continuamente y principalmente tienen la finalidad de tratamiento de aguas negras, así como de producción a gran escala y como el uso de alta tecnología para el control, es sobre todo de corte industrial.

Para efectos de este proyecto se diseñará un digestor semicontinuo tipo hindú a nivel escala, por sus características operativas y fácil operación.

Figura 4. **Clasificación del tipo de biodigestores de acuerdo a la carga**



Fuente: De la Torre Caritas. Digestión anaerobia en comunidades rurales. p. 113.

### 7.8.2. Biodigestor semicontinuo tipo hindú

Conocido también como biodigestor de campana, cúpula o domo flotante. De acuerdo a De la Torre este diseño consiste en una estructura vertical que dispone de:

- Reactor, cuya estructura puede ser de ladrillo tanto paredes como fondo, aunque a veces se usa refuerzo en hormigón.
- Una campana o cúpula flotante flotando en el líquido debido al biogás que retienen en su interior, de metal o material resistente a la corrosión como plásticos reforzados, esta campana sube y baja dependiendo del

volumen de gas que se está produciendo y se almacena en esta interface, por ello requiere de una varilla, guía central o rieles laterales que eviten el rozamiento contra las paredes del reactor.

- Dos zonas definidas conectadas al reactor: una para la carga de materia orgánica y otra para la descarga de bio abono.
- Una cámara hermética en la cual se genera en condiciones de degradación anaeróbicas de la materia orgánica formando bio-gás y bio-abono (biol). Para permitir el ingreso de la materia orgánica y la salida del bioabono, se dispone de dos tubos PVC conectados al tanque de almacenamiento (reactor) con la zona de carga y descarga funcionales gracias al principio de vasos comunicantes.

Un punto a favor es, que no necesita un contenedor externo (gasómetro) para almacenar el gas generado, y el gas se mantiene a una presión relativamente constante gracias al movimiento vertical del domo conforme la presión aumenta o disminuye, lo que le da estabilidad de presión entre 4 a 8 cm de agua, (Arias J., 1978).

Otro punto a favor sería una modificación del modelo en la cual se sustituye la campana flotante por una película de polietileno flexible y resistente, haciendo con esto que el costo baje y por ende sean más accesibles a la sociedad, (Brinton W. y Droffner M., 1994).



## **8. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN**

### **Hipótesis nula**

Las propiedades fisicoquímicas de los desechos sólidos generados en el mercado municipal San José no cumplen con las características, de acuerdo a los parámetros establecidos en la literatura, para generar biogás utilizando el proceso de digestión anaeróbica.

### **Hipótesis de investigación**

Las propiedades fisicoquímicas de los desechos sólidos generados en el mercado municipal San José cumplen con las características, de acuerdo a los parámetros establecidos en la literatura, para generar biogás utilizando el proceso de digestión anaeróbica.

#### **8.1 Definición de las variables**

Con base en los objetivos de la investigación a continuación se presentan las variables a medir y monitorear durante el análisis.

##### Variables controladas

- Porcentaje de humedad de la muestra: cantidad de vapor de agua por unidad de volumen de aire ambiente ( $\text{g}/\text{m}^3$ ).

- PH de la muestra: el pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio  $[H_3O^+]$  presentes en determinadas sustancias.

#### VARIABLES A ANALIZAR

- Porcentaje de materia orgánica en la muestra de desechos sólidos: porcentaje de compuestos de origen vegetal y animal presentes en la muestra.
- Porcentaje en peso fresco de nitrógeno, fósforo y potasio: micronutrientes presentes en la muestra tomada del depósito de basura del mercado.
- Porcentaje en peso seco (composta) de nitrógeno, fósforo y potasio: micronutrientes presentes en el compost obtenido como producto del proceso de biodigestión.
- Potencial energético del biogás obtenido: cantidad total de energía presente en el biogás, posible de ser aprovechada mediante el uso de tecnología.

## **9. CONTENIDO**

El contenido general del presente trabajo, se basa en el análisis de las propiedades fisicoquímicas de los residuos sólidos municipales del mercado municipal San José con el fin de tratarlos utilizando el método de digestión anaeróbica para la obtención de biogás, constituyendo así el tema central del trabajo de investigación.

1. ÍNDICE DE ILUSTRACIONES
2. GLOSARIO
3. RESUMEN
4. OBJETIVOS
5. INTRODUCCIÓN
6. ANTECEDENTES
7. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
  
8. MARCO TEÓRICO
  - 8.1. Residuos sólidos municipales
    - 8.1.1. Propiedades fisicoquímicas de los residuos sólidos urbanos
  - 8.2. Impacto ambiental de los RSU
  - 8.3. Manejo de los residuos sólidos urbanos
  - 8.4. Técnicas para el tratamiento de RSU
    - 8.4.1. Vertederos
    - 8.4.2. Incineración

- 8.4.3. Compostaje y digestión anaeróbica
- 8.4.4. Tratamiento mecánico biológico
- 8.4.5. Pirólisis y gasificación
- 8.5. Digestión anaeróbica
  - 8.5.1. Partes que conforman en proceso de digestión
    - 8.5.1.1. Cámara de carga
    - 8.5.1.2. Digestor o camará de digestión
    - 8.5.1.3. Almacenamiento de biogás
    - 8.5.1.4. Gasómetros
    - 8.5.1.5. Cámara de descarga
  - 8.5.2. Proceso microbiológico y bioquímico de la digestión anaeróbica
    - 8.5.2.1. Hidrólisis
    - 8.5.2.2. Acidogénesis
    - 8.5.2.3. Acetogénesis
    - 8.5.2.4. Metanogénesis
  - 8.5.3. Condiciones experimentales para la digestión anaeróbica
  - 8.5.4. Productos finales de la digestión anaeróbica
- 8.6. Generación de biogás
  - 8.6.1. Condiciones controladas
  - 8.6.2. Proceso de la obtención de biogás
- 8.7. Tipo de tecnología en digestores
  - 8.7.1. Tipos de biodigestores según su frecuencia de carga
  - 8.7.2. Biodigestor semicontinuo tipo hindú

9. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN
10. MÉTODOS Y TÉCNICAS
11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS
12. CONCLUSIONES
13. RECOMENDACIONES
14. BIBLIOGRAFÍA
15. ANEXOS



## **10. MÉTODOS Y TÉCNICAS**

### **10.1. Fase 1: investigación preliminar**

Durante esta fase, se procederá a la obtención de permisos con las entidades municipales competentes, departamento de limpieza de la municipalidad y con el administrador del mercado. Así como también se recopilará información relacionada con el tema de investigación para la elaboración del anteproyecto.

En paralelo a la recopilación de información, se realizará la toma de muestras para posteriormente proceder con la caracterización de los desechos sólidos que le conforman.

### **10.2. Fase 2: diseño de investigación**

En base al objetivo específico de correlación entre el porcentaje de materia orgánica presente en los desechos sólidos generados en el mercado municipal San José y la influencia que estos puedan tener en el potencial energético obtenido del biogás por su tratamiento, se seleccionará una serie de variables y se medirán independientemente para luego encontrar la relación entre las mismas. Con esto se busca recolectar las propiedades resultantes del proceso y correlacionar los resultados para evaluar si este cumple con las propiedades establecidas en la literatura.

Tomando en cuenta lo anterior se determina que el tipo de investigación a realizar es por objetivo, del tipo correlacional. El método a utilizar es deductivo ya que parte de una premisa general para obtener conclusiones de un caso particular.

- Tipo de investigación

El presente estudio es del tipo correlacional, ya que se pretende determinar la relación del uso de desechos sólidos municipales tratados mediante digestión anaeróbica para la obtención de biogás, para esto se realizarán pruebas evaluando el potencial energético del biogás obtenido en base al porcentaje de materia orgánica contenido en la muestra de desechos sólidos, con el fin de encontrar la fracción mínima de desechos orgánicos que deben contener los desechos sólidos municipales para que sea factible la obtención de biogás con alto potencial energético. Además se plantea este método ambientalmente amigable como una opción para el aprovechamiento de este tipo de residuos.

- Variables a medir y recolección de datos

La muestra de residuos sólidos para efectuar los análisis físicos y químicos, se obtendrá de los desechos generados en la operación del mercado municipal San José ubicado en la zona 7 de la ciudad de Guatemala. La caracterización y la cuantificación de subproductos se efectuarán durante una semana continua, bajo condiciones controladas, esto quiere decir a presión y temperatura constantes.

Tabla VII. **Información para la validación del método**

<b>Nutriente</b>	<b>Residuo sólido (%)</b>	<b>Composta (%)</b>
Nitrógeno		
Fósforo		
Potasio		
Alcalinidad parcial y total		
Demanda de Oxígeno (DQO)		

Fuente: datos experimentales

- **Métodos e Instrumentos**

La preparación de la muestra a nivel laboratorio se realizará con base en la Norma NOM-AA-52-1985. Se determinará los siguientes parámetros: humedad, pH, nitrógeno, fósforo y potasio para conocer las características físicas y químicas de los residuos y sobre esta base evaluar la viabilidad de la utilización del proceso de digestión anaeróbica para el tratamiento de desechos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales.

Figura 5. **Flujograma del proceso de compostaje**



Fuente: De la torre Carita. Digestión anaerobia en comunidades rurales. p.14.

Los instrumentos a utilizar para el análisis fisicoquímico de la composta serán un potenciómetro para medir el potencial de hidrógeno, higrómetro para medir la humedad relativa y un fotómetro para el análisis de nutrientes.

Se diseñará y construirá un biodigestor anaerobio a nivel laboratorio de tipo vertical semicontinuo, con volumen máximo de reacción de 10 litros. La velocidad de carga se realizará en base a la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de velocidad de carga del reactor} = \frac{\text{Porcentaje de sólidos (SV)}}{\text{Tiempo de residencia (TR)}}$$

Ecuación No.2

Donde:

Porcentaje de velocidad de carga = velocidad de carga de la muestra al reactor.

Porcentaje de sólidos (SV)= porcentaje de sólidos en suspensión de la muestra.

Tiempo de residencia (TR) = tiempo que permanece la muestra en el reactor.

### **10.3. Fase 3: parte experimental**

Se utilizará el método de análisis de medias y correlacional como herramienta primaria para el análisis estadístico en el diseño experimental. La aplicación de los métodos implica recopilación, presentación y caracterización de un conjunto de datos con el objeto de describir en forma apropiada la correlación de las características de dichos datos.

- Manipulación de variables

Un experimento se lleva a cabo para analizar si una o más variables independientes afectan a una o más variables dependientes y por qué las afectan, (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio).

Cada una de las variables independientes se manipulará y se evaluará el efecto que esta tendrá sobre las variables dependientes. En relación al estudio a realizar, se variará el porcentaje de materia orgánica presente en la caracterización de la muestra para evaluar el efecto que este tipo de desechos tiene sobre el potencial energético del biogás obtenido.

- Validez

Todo proyecto experimental debe cumplir con el control o validez interna de la situación, es decir, si se observa que la manipulación de las variables independientes provoca una variación en las variables dependientes, la variación de estas últimas se debe a la manipulación de las independientes y no a otros factores. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio).

- Validez interna: para validar el experimento, se realizarán tres repeticiones para cada una de las muestras de desechos sólidos, y para cada una de estas repeticiones, se realizarán tres pruebas de potencial energético del biogás obtenido.
- Validez externa: para validar externamente el experimento, se realizará un análisis mediante cromatografía de gases para conocer la composición del biogás obtenido como producto de la digestión anaeróbica que se llevará a cabo en un reactor tipo hindú a escala.

- Toma de muestra

Las muestras de residuos orgánicos se obtendrán del depósito de desechos sólidos del mercado municipal San José, ubicado en la zona 7 del municipio de Guatemala. Cada uno de los elementos de la muestra se seleccionará aleatoriamente uno por uno, los puntos de recolección serán seleccionados mediante un muestreo aleatorio simple.

La caracterización y cuantificación de subproductos se efectuará durante una semana continua en el mercado establecido, siguiendo los pasos metodológicos del proceso de compostaje detallado en el inciso de métodos e instrumentos. Para este proyecto el diseño de la muestra se determinó en base a una tabla de número aleatorios que permite iniciar la elección de la misma sin hacer ninguna preferencia en particular. Tomando esto en cuenta, se obtuvo que el tamaño de la muestra será igual a 5, el muestreo será sin reemplazo y se realizarán 3 tomas en distintas fechas en el mismo horario de 8:00 a 10:00 am. Esto se traduce en 15 repeticiones del proceso de carga al biodigestor.

- Construcción del reactor

Se construirá un reactor anaerobio a nivel laboratorio de tipo vertical semicontinuo conocido como tipo hindú. La construcción se efectuara con lámina galvanizada en forma cilíndrica de 10 cm de diámetro por 40 cm de altura. La parte superior se cubrirá con una tapadera que incluye la instalación de dos válvulas de paso, una para medir la temperatura y otra para regular la salida de gases. También se instalarán dos válvulas de globo, la primera se situará en la pared superior del reactor para la entrada del material y la segunda en la parte posterior para la salida del afluente.

- Análisis en el proceso de biodigestión

El reactor se cargará con 5 litros de residuos sólidos tratados y preparados previamente de acuerdo con los parámetros establecidos en la Norma NOM-AA-52-1985, la cual sugiere un valor alrededor del 10 % de materia seca en la muestra a evaluar. Las pruebas a realizar en el biodigestor

son el tiempo de residencia de los residuos y la cantidad de sólidos volátiles degradados.

En el caso de los productos obtenidos de la biodigestión, biogás y efluente (composta residual), se realizarán pruebas específicas para determinar el uso potencial. De las muestras extraídas del digestor como composta residual se calculará el porcentaje de sólidos volátiles degradados por diferencia de peso entre la cantidad de sólidos introducidos al digestor y la cantidad de sólidos extraídos.

Las muestras de biogás obtenidas del proceso de digestión, se analizarán mediante cromatografía de gases para determinar el porcentaje de metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). El valor energético del biogás se medirá por el poder calorífico inferior (PCI), el cual varía en función del porcentaje de metano que contenga. Para medir el poder calorífico se quemará en idénticas condiciones de temperatura y presión un volumen determinado de biogás y el mismo volumen de un gas cuyo poder calorífico se conoce. Conociendo las masas de ambos gases y el poder calorífico del gas conocido, se puede calcular el poder calorífico del biogás.

- Métodos y modelos de los datos según tipos de variables

Para tratar estadísticamente los datos se utilizarán los siguientes métodos paralelos:

- ✓ Método de análisis de Media: utiliza tabla de medias para determinar el error estándar entre estas (el resultado de dividir la

desviación típica agrupada por la raíz cuadrada del número de observaciones a cada nivel) y conocer los límites más bajos y más altos alrededor de la media de cada tratamiento.

- ✓ Método de correlación: una correlación es una medida del grado en que dos variables se encuentran relacionadas. Un estudio correlacional puede intentar determinar: si individuos con una puntuación alta en una variable también tiene puntuación alta en una segunda variable y si individuos con una baja puntuación en una variable también tienen baja puntuación en la segunda. Estos resultados indican una relación positiva.
  
- ✓ Diagrama de dispersión: tipo de diagrama matemático que utiliza las coordenadas cartesianas para mostrar los valores de dos variables para un conjunto de datos. El objetivo de utilizar este método es analizar la forma en que dos variables numéricas están relacionadas, con un intervalo de confianza determinado.



## 11. RESULTADOS ESPERADOS

De acuerdo a la bibliografía, se espera obtener como producto de la digestión anaeróbica de los desechos sólidos municipales del mercado San José varios productos, sin embargo los de interés para este estudio serán el metano y la composta residual:

- Contenido de humedad y pH en las muestras
- Composición fisicoquímica de la composta residual
- Determinar tiempo de residencia óptimo en el biodigestor
- Determinar el máximo de sólidos degradados en el TR
- Composición fisicoquímica del biogás
- Potencial energético del biogás
- Valores promedio de nitrógeno, fósforo y potasio en muestras y productos.



## 12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

El siguiente cronograma de actividades detalla por fases la secuencia de los pasos a seguir para la elaboración del presente trabajo de investigación.

Tabla VIII. **Cronograma de actividades**

Fase	Actividad por semana	Julio 2013				Agosto 2013				Septiembre 2013				Octubre 2013				Noviembre 2013				Diciembre 2013			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Permisos y recolección de muestras	■	■	■	■																				
2	Caracterización de las muestras					■	■	■	■																
3	Preparación de composta									■	■														
4	Construcción de biodigestor									■	■	■	■												
5	Carga de biodigestor y captación de productos													■	■	■	■								
6	Análisis fisicoquímicos de los																	■	■	■	■				
7	Elaboración de informe final																					■	■	■	■

Fuente: elaboración propia



### 13. RECURSOS NECESARIOS

Para la elaboración del presente trabajo de investigación, se emplearán una serie de recursos financiados por el estudiante investigador, los cuales se detallan a continuación:

Tabla IX. **Recurso humano (financiado por el estudiante investigador)**

Recurso Humano	Costo por hora	Total
Asesor	Q150.00	Q2,500.00
Estudiante	Q100.00	Q16,000.00
	<b>Total RRHH</b>	<b>Q18,500.00</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Materiales e insumos (financiado por el estudiante investigador)**

Materiales e Insumos	Costo unitario	Total
2 Láminas galvanizadas	Q75.00	Q150.00
2 Válvulas de paso acero inox	Q285.00	Q570.00
2 Válvulas de globo	Q68.00	Q136.00
1 Plancha de fibra de vidrio	Q630.00	Q630.00
1 Termómetro	Q120.00	Q120.00
Imprevistos	5% más	Q80.30
	<b>Total materiales e insumos</b>	<b>Q1,686.30</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Infraestructura (financiado por el estudiante investigador)**

<b>Infraestructura</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Total</b>
Alquiler laboratorio de investigación (Piloto biodigestor)	Q1800.00	Q1,800.00
Análisis fisicoquímicos	Q250.00	Q3,000.00
Imprevistos	5% más	Q240.00
	<b>Total RRHH</b>	<b>Q5,040.00</b>

Fuente: elaboración propia.

## 14. BIBLIOGRAFÍA

1. Arias J. (1978). Digestión anaerobia de desechos orgánicos: Prioridad estratégica para el codesarrollo. Palamaria, Morelos: Reunion Nacional sobre Energía no Convencional.
2. Baere, D. (2003). Anaerobic Digestion of solid Waste: State of art. Water Science and Tecnology , 15-29.
3. Bernache G. (1995). Ecología y sociedad en Guadalajara. CIESAS de occidente , 16p.
4. Brinton W. y Droffner M. (1994). Microbial aproches to caracterization of composting proccess. Comp. Sci. Utiliz. , 12-17.
5. De la Torre Caritas, N. (2008). Digestión anaerobia en comunidades rurales. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
6. ENSIC. (1984). Recycling of solid wastes. (A. I. Tecnology, Ed.) Sanitation enviromental reviews (No. 13/14), 103.
7. H., A. R. (1979). Un ensayo sobre como producir combustible de los desperdicios agrícolas. México: UMSNH.

8. H., W. (1982). Experiences in boiling of compost plants in developing countries. Berlín: E. Freitag-Verlag.
9. Harrison, H. (1994). Recycling organic wastes: research, engineering and outreach. *Cornell Engine* , 18-23.
10. Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (s.f.). *Metodología de la Investigación*. Monterrey: McGraw Hill.
11. Martínez, Roberto (2006). *Enciclopedia Virtual ambientum*. Recuperado el 20 de Marzo de 2013.
12. Pavlostathis, G. G. (1991). *Kinetics of anaerobic Treatment*. Massachusetts, USA: IWA Publishing.