

**ESTUDIO PRELIMINAR DE FACTIBILIDAD Y DIMENSIONAMIENTO DE UNA
PLANTA DE TRATAMIENTO ANAEROBIO DE RESIDUOS ORGÁNICOS A
NIVEL URBANO**

PRESENTADO POR

GABRIEL FELIPE MARTINEZ ROMERO

MARIA ALEJANDRA CRUZ HERNÁNDEZ

TESIS DE GRADO

DIRECTOR

RAFAEL GABRIEL BARRAGÁN GONZALEZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
INGENIERÍA AMBIENTAL, DIVISIÓN DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C. 2015**

JURADOS:

IVAN ORLANDO CABEZA ROJAS

JUAN JOSE VARGAS OSORIO

BOGOTÁ D.C

21 DE OCTUBRE 2015

CONTENIDO

GLOSARIO	7
RESUMEN.....	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS	11
2.1. OBJETIVO GENERAL	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. MARCO DE REFERENCIA.....	12
3.1. MARCO CONTEXTUAL.....	12
3.1.1. LOCALIZACIÓN	12
3.2. MARCO TEORICO	13
3.2.1. TÉCNICAS DE MUESTREO DE RESIDUOS SÓLIDOS:.....	14
3.2.2. POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS.....	15
3.2.3. DIGESTORES ANAEROBIOS.....	16
3.2.4. SISTEMAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE UNA Y DOS FASES.....	19
3.2.5. FACTORES INFLUYENTES EN EL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR.....	20
3.2.6. ELEMENTOS QUE COMPONEN EL DISEÑO DE UN BIODIGESTOR...21	
3.2.7. DIFERENTES MANERAS DE APROVECHAMIENTO PARA EL BIOGÁS PRODUCIDO.....	22
4. METODOLOGÍA.....	27
4.1. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO MUESTRAL Y CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS	27
4.2. MUESTREO: RECOLECCIÓN, SEPARACIÓN Y PESAJE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.....	28
4.3. PREPARACIÓN DEL SUSTRATO Y CARACTERISTICAS DEL DIGESTOR ANAERIBIO PDAN	29
4.4. SELECCIÓN DEL INOCULO	30

4.5. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL LODO (INÓCULO) Y DEL SUSTRATO (ALIMENTO).....	31
4.6. CALCULO DE LA PROPORCIÓN C/N	31
4.7. CALCULO DE POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE LOS RESIDUOS RECOLECTADOS	31
4.8. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO (ALIMENTO).....	32
4.8.1. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST):	32
4.8.2. PRUEBA DE CENIZAS.....	32
4.9. ESTABLECECIMIENTO DE PARÁMETROS DE CONTROL DE METANOGENÉISIS.....	32
4.9.1. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE METANO, REPETICIONES Y TIEMPOS EN LA MEDICIÓN DEL BIOGÁS GENERADO	32
4.9.2. ESTIMAR EL RENDIMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DEL METANO (EFICIENCIA).	33
4.10. PARÁMETROS DE DISEÑO PARA UN REACTOR ANAEROBIO ADECUADO PARA EL CASO DE ESTUDIO A NIVEL URBANO.....	34
4.10.1. PARÁMETROS DE DISEÑO PARA UN BIODIGESTOR	34
4.11. ANALISIS ECONOMICO	36
5. DESARROLLO CENTRAL	37
5.1. DATOS Y RESULTADOS	37
5.1.1. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO MUESTRAL	37
5.1.2. RESULTADOS DEL MUESTREO Y PESAJE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL RESTAURANTE	37
5.1.3. VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS DEL INÓCULO Y EL ALIMENTO	38
5.1.4. ESTIMACIÓN DE LA PROPORCIÓN C/N.....	38
5.1.5. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DEL METANO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.....	41
5.1.6. RENDIMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DEL METANO (EFICIENCIA)	41
5.1.7. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA	43
5.1.8. CÁLCULO DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL DIGESTOR	45
5.2. ESTUDIO DE VALORACIÓN ECONÓMICA.....	46

5.2.1. DATOS DEL MODELO.....	46
5.2.2. RESULTADOS DEL MODELO	50
6. CONCLUSIONES.....	51
7. BIBLIOGRAFÍA	52
8. ANEXOS	58

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Distrito Capital en Colombia	12
Ilustración 2 Residuos recolectados durante muestreo	29
Ilustración 3 Digestor Anaerobio PDAN Marca Edibon	30
Ilustración 4 Comportamiento producción de metano y TRH	43
Ilustración 5 Producción específica de biogás del lodo durante maduración Vs tiempo ...	44
Ilustración 6 Retorno de la inversión escenario 1 y escenario 2.....	49

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Potencial en la producción de biogás de los residuos sólidos dado su origen y contenido orgánico	15
Tabla 2 Nivel de contaminantes en un Digestor anaerobio	16
Tabla 3 Composición aproximada del biogás.....	22
Tabla 4 Propiedades fisicoquímicas del biogás	22
Tabla 5 Problemas y soluciones para el uso del biogás en quemadores	24
Tabla 6 RESULTADOS DEL MUESTREO Y PESAJE (gr/día).....	37
Tabla 7 Variables evaluadas y resultados en caracterización de inóculo y alimento	38
Tabla 8 Relación C/N teórico de residuos.....	39
Tabla 9 Proporción C/N teórico de algunos residuos similares a los caracterizados	39
Tabla 10 Cálculo de la composición de carbono y nitrógeno de proteínas, carbohidratos y lípidos	40
Tabla 11 Cálculo de la proporción C/N de los residuos caracterizados.....	40
Tabla 12 Cálculo de la producción de metano (estimación con datos obtenidos de estudios previos).....	41
Tabla 13 Resultados del rendimiento de la producción de metano	42
Tabla 14 Eficiencia del proceso en la producción del metano.....	42
Tabla 15 Cálculo de los parámetros para el diseño del biodigestor	45
Tabla 16 Variables incluidas en el modelo de evaluación económica escenario 1	47
Tabla 17 Valor presente neto en Escenario 1	47
Tabla 18 Valor presente neto Escenario 2	48
Tabla 19 Resultados encuesta de caracterización preliminar.....	60

GLOSARIO

BHP (Brake Horse Power): medida de pérdida de potencia o potencia de freno en motores, turbinas, calderas, etc [1].

DIGESTIÓN ANAEROBIA: Es un proceso biológico natural en el que una comunidad entrelazada de bacterias cooperan para formar una fermentación estable, autorregulada, que convierte la materia orgánica residual en una mezcla de gases compuesta por metano y dióxido de carbono y un biosólido [2].

m.m. C.A.: milímetros de columna de agua, unidad de presión del sistema técnico de unidades y equivale a la presión ejercida por una columna de agua pura de un milímetro de altura [3].

PSIA: Esta unidad es usada cuando se toma en cuenta la presión ambiente, lo cual significa que cuyo cero está realmente a presión cero y las primeras 14,7 libras corresponden a la presión atmosférica.

RESUMEN

El crecimiento de la población mundial causa efectos directos sobre los recursos disponibles principalmente por el aumento en la demanda de bienes y servicios generados a partir de los recursos naturales, y por la enorme cantidad de residuos agrícolas, industriales, y urbanos que diariamente se generan.

En Colombia la presencia de técnicas y tecnologías destinadas a hacer frente a la problemática de los residuos es incipiente, y Bogotá su capital afronta un rápido agotamiento del espacio destinado a la disposición de residuos sólidos en el relleno sanitario Doña Juana.

Por medio del presente estudio se propone una alternativa eficiente para afrontar el reto de la generación de residuos sólidos urbanos. Durante el desarrollo del estudio se determinó un tiempo de retención hidráulica de 15 días en los que se obtuvo biogás; con base en las características fisicoquímicas del lodo y sustrato se determinó el potencial de generación de metano, dato que fue fundamental para el diseño del biodigestor y de la planta de tratamiento anaerobio de residuos orgánicos. Se calculó la proporción C/N de los residuos caracterizados y se evidenció que el residuo que más aportó carbono a la mezcla fue el de las hojas de plátano. Con base a los resultados obtenidos de los parámetros de diseño del biodigestor se propuso construir un digestor de $1,8 m^3$ para dar tratamiento a los residuos orgánicos de un restaurante en la localidad de Usaquén que tiene una producción diaria de 40 kg de residuos sólidos orgánicos.

1. INTRODUCCIÓN

Cada año Bogotá genera en promedio 1'387.000 toneladas de residuos que son dispuestos, en su mayoría, en el relleno sanitario Doña Juana [4]. El 63% de los residuos generados en Bogotá son orgánicos y tienen un alto potencial de aprovechamiento como insumos para producción de abonos, generación de biogás, electricidad y biopolímeros [4].

El objetivo de este documento es estudiar la factibilidad y dimensionamiento de una planta de tratamiento anaerobio de residuos orgánicos a nivel urbano.

Bogotá fue la ciudad en la que se desarrolló el ejercicio y los residuos sólidos usados en el tratamiento anaerobio se produjeron en un restaurante de la localidad de Usaquén.

El restaurante se escogió a través de la aplicación de una encuesta diseñada por los autores que permitió hacer una caracterización preliminar del tipo de residuos generados por los restaurantes, y seleccionar el que mejor representaba al total de restaurantes encuestados.

La alternativa escogida para dar tratamiento a los residuos sólidos fue la digestión anaerobia y se enfocó hacia la generación de biogás buscando promover la cantidad de metano presente en el biogás.

Dada la necesidad de los restaurantes de dar tratamiento a todos los residuos que son generados, se decidió hacer una única mezcla con todos los residuos recolectados.

El proceso de digestión anaerobia se desarrolló en un Biodigestor marca Edibon que permitió llevar registro y control de la temperatura dentro del reactor, y medir el volumen de biogás producido; fue facilitado por la Universidad Santo Tomás Sede Bogotá. El biodigestor Edibon se alimentó con una mezcla de lodos y con los residuos sólidos obtenidos del restaurante que fueron sometidos a un tratamiento antes del proceso de digestión anaerobia. Se adecuaron trampas de KOH y óxido de hierro buscando eliminar gases contaminantes en el biogás y así permitir el paso de metano hacia los tanques de almacenamiento del biodigestor.

Muestras del lodo (inóculo) y el alimento (sustrato) se llevaron a un laboratorio certificado por el IDEAM para encontrar su DBO₅ y DQO; se realizaron pruebas de sólidos suspendidos totales (SST), cenizas y se midió el potencial de hidrógeno (pH) en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás como parte de la caracterización físico-química.

El tiempo de retención hidráulica (TRH) fue de 15 días y se escogió revisando diferentes recomendaciones de autores y teniendo en cuenta el comportamiento en la producción de metano durante el primer ensayo en el biodigestor.

El rendimiento en la producción de metano se calculó usando los resultados del análisis de DBO_5 del alimento o sustrato, y el metano obtenido luego del proceso de digestión anaerobia.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la factibilidad y dimensionamiento de una planta de tratamiento anaerobio de residuos orgánicos a nivel urbano.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los residuos generados en restaurantes de la localidad de Usaquén en Bogotá.
- Estimar el rendimiento en la producción de metano.
- Establecer parámetros de diseño de un reactor anaerobio adecuado para el caso de estudio.
- Evaluar alternativas de aprovechamiento para el biogás producido.
- Realizar estudio de factibilidad para implementar una planta de tratamiento anaerobio de residuos orgánicos a nivel urbano.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. MARCO CONTEXTUAL

3.1.1. LOCALIZACIÓN

El proyecto “ESTUDIO PRELIMINAR DE FACTIBILIDAD Y DIMENSIONAMIENTO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO ANAEROBIO DE RESIDUOS ORGÁNICOS A NIVEL URBANO” se desarrolló en la ciudad de Bogotá, en restaurantes de la localidad de Usaquén (ver Ilustración 1) ubicada al nororiente de la ciudad. Se escogió la zona comprendida entre las calles 116 y 120; y entre las carreras 6^{ta} y 7^{ma}, que concentra una gran cantidad de restaurantes.

Ilustración 1 DISTRITO CAPITAL EN COLOMBIA



Fuente: Observatorio Ambiental Bogotá 2014, Localidad de Usaquén identificada con el número 1

3.2. MARCO TEORICO

La biomasa es la materia que tiene un origen orgánico, proviene de árboles, plantas, y desechos de animales que se pueden convertir en energía; también está la proveniente de aserraderos, cultivos agrícolas y residuos sólidos urbanos (RSU) [5].

La tendencia a nivel mundial apunta a cerrar ciclos, reducir emisiones de gases efecto invernadero (GEI), y transformar las fuentes de energía tradicional (combustibles de origen fósil) por fuentes renovables de energía. China está promoviendo el desarrollo de tecnologías de aprovechamiento de RSU a través de incentivos a inversionistas por parte del gobierno [6]. En Europa, países como Alemania, Dinamarca, Países Bajos e Italia están desarrollando plantas de alta eficiencia para la transformación de RSU en energía [7]; en Latinoamérica, México empieza a evaluar el uso de plantas de valorización de RSU y su transformación en energía [8], mientras que estudios en Brasil encuentran algunas limitantes por falta de incentivos gubernamentales que hagan viable la instalación de plantas de generación de energía a partir de los RSU [9].

Diferentes avances tecnológicos han permitido el desarrollo y uso de nuevas formas de aprovechamiento de la biomasa; transformándola en combustibles líquidos y gaseosos que son más limpios y eficientes. Además de la combustión directa se distinguen dos procesos de conversión de biomasa: el bio-químico y el termo-químico [5].

Las grandes fuentes de biomasa son los complejos agrícolas y forestales que producen residuos (rastros) que son aprovechados en un porcentaje muy bajo. A nivel agroindustrial, el secado de granos genera subproductos que son usados a través de combustión directa para generación de calor. Los centros urbanos generan grandes cantidades de desechos compuestos en su gran mayoría de residuos orgánicos que pueden ser convertidos en energía por medio de un adecuado tratamiento. [10]

Las tecnologías que usan fuentes renovables de energía se presentan como una alternativa factible a nivel económico y ambiental en todo el mundo. Para países con alta actividad agrícola y generación de biomasa como los que integran Suramérica, existe un gran potencial energético en el uso de la biomasa [5]. El uso de la biomasa disminuye de diferentes maneras la contaminación del ambiente, al reemplazar por ejemplo, los sistemas convencionales que hacen uso de combustibles de origen fósil, como el carbón y productos derivados del petróleo [5].

Aunque existe un gran potencial para el uso de tecnologías con fuentes de energía renovable también hay un vacío respecto al conocimiento de estas tecnologías, incapacidad de las instituciones gubernamentales y técnica existente aún incipiente [5].

En Colombia se han utilizado diferentes procesos para el aprovechamiento de la materia orgánica. Algunos de ellos son el compostaje, la alimentación de animales, la lombricultura, la producción de biocombustibles y los biofertilizantes [10]. En las zonas rurales, algunos pobladores separan la fracción orgánica generada para la alimentación de animales, en su mayoría ganado y cerdos [10].

La planta de tratamiento de RSU ofrece una alternativa para la generación de energía eléctrica de acuerdo a la ley 1715 de 2014 la cual habla sobre la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional y tiene como objetivo promover el desarrollo y utilización de fuentes no convencionales de energía, principalmente las de carácter renovable con el fin de aportar el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de efecto invernadero y la seguridad de abastecimiento energético [11].

La digestión anaerobia es una de las alternativas de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados no solo a nivel rural sino también urbano.

3.2.1. TÉCNICAS DE MUESTREO DE RESIDUOS SÓLIDOS:

Establecer una técnica de muestreo de residuos es importante para lograr que la muestra colectada sea lo más aproximado posible a la realidad del total de los residuos sólidos. A continuación se presentan algunas técnicas para el muestreo de residuos sólidos.

Recolección de residuos en lechos de secado, lagunas de evaporación secas y suelos contaminados: El área donde se acumulan los residuos se debe dividir en cuadrados imaginarios; para la extracción de una muestra de profundidad de hasta 8 cm, se debe utilizar una pala, en muestras de más de 8 cm de profundidad, debe ser utilizada una barrena [12].

Si se desconoce el espesor de la capa de residuos y la basura es muy viscosa, paneles de construcción o tablados son necesarios para permitir la extracción de muestras de la zona más central de secado. En tales casos, los colectores deben estar equipados con botas y una varilla rígida para sondear la profundidad de la anterior ubicación [12].

Recolección de polvos o residuos granulares en recipientes cerrados: Retirar las muestras de al menos tres puntos (superior, medio e inferior) desde la parte superior e igualmente espaciados entre sí. Al tomar las muestras se debe penetrar oblicuamente en las pilas de basura, además, recoger una muestra compuesta utilizando montones o pilas variadas, ya que la composición de los residuos puede ser extremadamente variable de un punto a otro [12].

3.2.2.POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS

Los residuos sólidos orgánicos que se generan en una urbe tienen potencial para la generación de biogás [13] (como se muestra en la Tabla 1). Bajo condiciones específicas de temperatura, humedad, tiempos de retención, pH y alcalinidad, se puede maximizar la producción de biogás y del metano que este contiene, presentándose como una alternativa al problema de saturación de los diferentes rellenos sanitarios del país [14].

Tabla 1 Potencial en la producción de biogás de los residuos sólidos dado su origen y contenido orgánico

TIPO	CONTENIDO ORGÁNICO	SV (%)	PRODUCCIÓN BIOGÁS (m ³ /t residuo)
Intestinos + contenidos	Hidratos de carbono, proteínas, lípidos	15-20	50-70
Fangos de flotación	65-70% proteínas, 30-35% lípidos	13-18	90-130
Aceites de pescado	30-50% lípidos	80-85	350-600
Suero	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	7-10	40-55
Suero concentrado	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	18-22	100-130
Hidrolizados de carne y huesos	70% proteínas, 30% lípidos	10-15	70-100
Mermeladas	90% azúcares, ácidos orgánicos	50	300
Aceite soja/margarinas	90% aceites vegetales	90	800-1.000
Bebidas alcohólicas	40% alcohol	40	240
Fangos residuales	Hidratos de carbono, proteínas, lípidos	3-4	17-22

3.2.3. DIGESTORES ANAEROBIOS

Un digestor anaerobio es un reactor en el que se dan reacciones de tipo biológico y que involucran una interacción de enzimas y microorganismos. Se usan principalmente para reducir niveles de concentración de contaminantes presentes en aguas residuales y en el tratamiento de residuos sólidos, buscando alcanzar niveles aceptables [14]. En el funcionamiento de un digestor anaerobio se controlan variables como DQO, DBO, la relación carbono/fósforo y carbono/nitrógeno, y sólidos suspendidos (ver Tabla 2), para promover la producción del biogás y reducir tiempos de retención hidráulica [14].

Tabla 2 Nivel de contaminantes en un Digestor anaerobio

Indicador	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)
DBO	100-250	5-15
DQO	200-700	15-75
P	6-10	0,2-0,6
N	20-30	2-5
SS	100-400	10-25

Fuente: Digestión Anaerobia, 2007 [14]

a) DIGESTOR TANQUE CONTINUAMENTE AGITADO (CSTR)

En ellos el líquido o corriente de lodo se introduce continuamente y el contenido de líquidos es continuamente eliminado del reactor. La característica básica del CSTR ideal es que las concentraciones de sustrato y microorganismos sean las mismas en todo el reactor y en el efluente del digestor. Los digestores de tanque agitado son tanques cilíndricos con fondo levemente curvo donde el agitador promueve la homogenización del medio (contiene los biocatalizadores, sustratos y demás nutrientes) y la dispersión del gas en éste incrementa la velocidad de transferencia de calor. La relación entre la altura y el diámetro del tanque (H_T/D_T) generalmente está dentro del intervalo (1-3) [2].

b) REACTOR DE CONTACTO ANAEROBIO

Es considerado un proceso muy sensible y de difícil control, no apropiado para tratar afluentes de concentración muy variable. Es recomendable mantenerlo con carga hidráulica y carga orgánica relativamente constante para evitar problemas operacionales. El contenido del reactor se mezcla completamente por medio de agitadores mecánicos o por inyección del biogás y el efluente es separado en un

tanque de sedimentación o de flotación. Este reactor también puede ser utilizado para mejorar la biodegradación de sólidos en suspensión, aumentando el tiempo de contacto entre el sustrato y los microorganismos [2].

Ventajas:

- Arranque rápido con inóculo adecuado
- Soporta afluentes con sólidos suspendidos (estabiliza la fracción degradable)
- Soporta sobrecargas orgánicas (mejor que otros reactores) [2].

Desventajas:

- Mayores costos energéticos asociados al mezclado y recirculación
- Operación relativamente delicada
- Límite para recibir cargas orgánicas (6 kg DQO/m³ d)
- Requiere grandes TRH, por lo tanto, grandes volúmenes de reactor [2].

c) PROCESO ANAEROBIO DE MANTO DE LODOS DE FLUJO ASCENDENTE UASB (UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET)

Se basa en la actividad autorregulada de diferentes grupos de bacterias que degradan la materia orgánica y se desarrollan en forma interactiva, formando un lodo biológicamente activo en el reactor. La biomasa permanece en el reactor sin necesidad de soporte adicional. El efluente pasa a través de un manto de lodo que logra que los microorganismos floculen o granulen, de manera que permanezcan en el reactor. Realizar la extracción del lodo periódicamente y este debe ser seleccionado para evitar pérdidas de la parte más activa [2].

Ventajas:

- Soporta altas cargas (20 Kg DQO/m³ d)
- Bajo requerimiento de energía
- Construcción relativamente simple, con el inóculo apropiado puede arrancar de forma inmediata
- Aplicable a pequeña y gran escala
- Operación simple [14].

Desventajas:

- Requerimientos de inóculo de determinadas características
- Sensible a sólidos suspendidos (aumenta concentración de SS en reactores distintos de biomasa), grasas y aceites en el influente

- Sensible a afluentes que forman precipitados (llenan el fondo del reactor y el lecho sube)
- Riesgo de flotación de los granos durante el re arranque (gránulos varían de densidad) [14].

d) FILTRO ANAEROBIO DE LECHO FIJO

Está constituido por un tanque o columna de relleno con un medio sólido para soporte del crecimiento biológico anaerobio. La biomasa se encuentra dispuesta dentro del filtro formando una biopelícula sobre las partículas del relleno, y flocos que se encuentran atrapados entre sus intersticios. El afluente es puesto en contacto con el crecimiento bacteriano anaerobio adherido al medio y las bacterias son retenidas lo cual evita que salgan por el efluente, es posible un tiempo de retención celular de 100 días con tiempos de retención cortos [2].

Ventajas:

- Soporta altas cargas orgánicas (15 kg DQO/m³ d)
- Con recirculación es resistente a sobrecargas orgánicas o tóxicos
- Construcción simple y aplicable a pequeña y mediana escala
- Rápidos re arranques
- Operación simple con flujo descendente o ascendente [2].

Desventajas

- Arranque lento
- Contando con un lodo adecuado forma biopelícula
- Riesgo de taponamiento sobre todo con soportes de piedra
- Sensible a sólidos suspendidos y afluentes que formen precipitados
- Alto costo de material de soporte [2].

e) SISTEMAS DE LECHO MOVIL (LECHO EXPANDIDO Y FLUIDIZADO)

Tienen el mismo fundamento que los reactores de lecho fijo, las bacterias son inmovilizadas sobre pequeñas partículas de soporte sólidas, varía el grado de expansión del lecho. Con este sistema se consigue que la totalidad de la película bacteriana este en contacto con el efluente a tratar, aumentando la eficiencia del sistema. El efluente del reactor se recircula para mantener el lecho en la expansión adecuada, con concentraciones de biomasa altas, lo cual permite tratar con tiempo de retención cortos [2].

Ventajas:

- Soporta altas cargas orgánicas (40kg DQO/m³ d)
- Tiempos de retención hidráulica muy cortos
- Soporta afluentes con sólidos suspendidos aunque no los remueve [2].

Desventajas:

- Arranque lento y difícil
- Control complejo del proceso
- Requerimientos energéticos importantes
- No soporta grandes periodos de tiempo sin alimentación [2].

3.2.4. SISTEMAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE UNA Y DOS FASES

a. SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE UNA FASE

El biodigestor anaerobio de una fase y la composición del sustrato caracterizado por compuestos de alta biodegradabilidad reflejan el efecto que tiene el incremento del contenido de la carga orgánica alimentada en el sistema y su forma de adición. Si el sistema es alimentado una vez al día, los microorganismos reciben un alto contenido de compuestos acidificables lo que conlleva un periodo de acidificación que afecta la actividad de los organismos metanogénicos. Por la lenta respuesta de la flora metanogénica a los cambios del pH con respecto a la fijación del carbono como metano, puede causar una desestabilización [14].

Si se realiza la alimentación dos veces al día, el sistema encuentra el sustrato en menor proporción produciendo una menor cantidad de ácidos y por ende un menor efecto en el pH, lo cual permite un buen desarrollo y estabilidad de los microorganismos metanogénicos. El porcentaje de fijación de carbono en el biogás durante la operación del sistema en una fase es de 81% lo cual contrasta con el contenido de materia biodegradable en el sustrato que es de 81,2%, lo que permite observar que el sistema de una fase consume cerca del 60% del carbono fácilmente disponible [14].

b. SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DOS FASES

En el sistema de dos fases la operación es más compleja por la acción de composición del nitrato; la mejor configuración operacional se presenta cuando éste se encuentra operando a 35°C, con un TRH de 21 días para un sustrato con un 18% de sólidos totales [14].

La evaluación de ambas fases a 45°C genera ineficiencia e inestabilidad, mientras que la temperatura de 35°C promueve mejores tasas de conversión y mayor estabilidad [2].

La diferencia de las dos fases es que el digestor de una fase realiza todas las operaciones unitarias de digestión anaerobia en un solo reactor; mientras que el digestor de dos fases divide las operaciones unitarias en dos reactores, generalmente usa el primero para la fase de hidrólisis y el segundo para la metanogénesis.

3.2.5. FACTORES INFLUYENTES EN EL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR

Los principales factores que influyen en el funcionamiento del biodigestor son la composición del sustrato o residuo y parámetros ambientales u operacionales [15].

- 1. pH y alcalinidad:** El pH influye de forma importante en el proceso ya que cada grupo de bacterias presenta un pH óptimo para su crecimiento. El pH óptimo está en torno a la neutralidad; los pH extremos como ácidos o básicos pueden reducir en gran medida la actividad bacteriana, además que puede influir en otros procesos de toxicidad.
También es considerado un parámetro de diagnóstico ya que algunos problemas más habituales como la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGVs) producen que baje el pH [15].
- 2. Nutrientes:** Son varias las sustancias orgánicas e inorgánicas necesarias para que sea llevado a cabo el proceso, entre ellas se destacan el carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, vitaminas y trazas minerales. La relación carbono nitrógeno C/N (relación entre carbono y nitrógeno) debe estar entre 15/1 y 30/1, y la relación carbono fósforo C/P (carbono y fósforo) debe estar sobre 75/1 y 113/1 [15]. Una relación promedio deseada, que es de 20-30 partes de carbono por una de nitrógeno [16].
- 3. Estabilidad, toxicidad e inhibición:** Diversos compuestos pueden resultar tóxicos para los microorganismos responsables del proceso anaerobio. Los residuos ganaderos pueden ser de gran importancia por la presencia de antibióticos y desinfectantes. El nitrógeno amoniacal al ser un importante nutriente puede provocar toxicidad si se encuentra en elevada concentración [15].
Otros tóxicos pueden ser compuestos orgánicos, sulfuros, ácidos grasos de cadena larga, metales pesados, metales alcalinotérreos y etc. La mayoría de los compuestos tóxicos son nutrientes en bajas concentraciones y estos al superar el umbral comienzan a inhibir el crecimiento bacteriano. También influyen otros factores como el pH potenciando la toxicidad [15].
- 4. Temperatura:** Hay tres rangos de temperaturas para clasificar los sistemas: psicrófilico el cual está por debajo de 20°C, o a temperatura ambiente; mesófilico que oscila entre 30 y 40°C, y termófilico que se encuentra entre

50 y 65°C. El rango mesofílico es el más utilizado, pese a que el termofílico presenta ciertas ventajas, como la mayor rapidez, la higienización del residuo, eliminación de larvas, semillas de malas hierbas, organismos patógenos. Sin embargo, el rango termofílico puede ser más inestable, sobre todo por la mayor incidencia de inhibición y toxicidad [15].

5. **Tiempo de retención:** Es el tiempo que el sustrato debe permanecer en el biodigestor sometido a la acción de los microorganismos. Hay un tiempo de retención mínimo en el cual no es posible que se lleve a cabo el proceso [15]. Existe también un TRH óptimo en el cual se maximiza la producción de metano y depende de la madurez de la biomasa (lodo) y la disponibilidad de nutrientes [15].
6. **Carga orgánica:** Es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el biodigestor; la cual depende de la composición del sustrato y del tiempo de retención. Un aumento repentino de la carga orgánica puede provocar una sobrecarga [15].

3.2.6. ELEMENTOS QUE COMPONEN EL DISEÑO DE UN BIODIGESTOR

1. **Tanque de biodigestor:** Compuesto por la cámara de fermentación y la cúpula. En la cámara de fermentación anaeróbica la materia a descomponer permanece un tiempo determinado (tiempo de retención), en el cual ocurre la degradación de la materia orgánica y la liberación de biogás. La geometría de la cámara es cilíndrica y su capacidad está dada por el volumen del material a degradar [16].
La función de la cúpula es almacenar el gas en los momentos que existe consumo, pues la producción de gas es ininterrumpida a lo largo del día. La capacidad de almacenaje de la cúpula depende el volumen de la cámara de fermentación [16].
2. **Laguna de compensación:** El material digerido es acumulado en la laguna de compensación donde puede ser recogido. La capacidad de la laguna esta en dependencia del volumen del biodigestor (un tercio del mismo) y puede tener diferentes formas (cuadrada, circular, rectangular) y ser construida encima de la cúpula o al lado del tanque de fermentación [16].
3. **Registro de carga:** Puede tener varias formas y el tamaño dependerá de diseño del biodigestor. También en él se introducirá el material a fermentar, mezclándose con agua en las proporciones adecuadas y homogeneizándose [16].
4. **Conducto de carga:** Aquel que comunica el registro de carga con el tanque de fermentación [16].

3.2.7. DIFERENTES MANERAS DE APROVECHAMIENTO PARA EL BIOGÁS PRODUCIDO

De acuerdo a la composición del biogás que depende de las condiciones de la digestión anaerobia y las características que involucra la materia orgánica está compuesto principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), y de otros gases como nitrógeno (N_2), monóxido de carbono (CO), hidrogeno (H_2) y sulfuro de hidrogeno (H_2S), siendo un gas toxico y corrosivo al mezclase con agua debe ser removido para facilitar su aprovechamiento [17].

Tabla 3 Composición aproximada del biogás

Compuesto		% Volumen
Metano	CH_4	60-80
Dióxido de Carbono	CO_2	30-40
Hidrógeno	H_2	0-1
Nitrógeno	N_2	1-2
Monóxido de Carbono	CO	0-1,5
Oxígeno	O_2	0,1
Ácido Sulhídrico	H_2S	0-1
Vapor de Agua	H_2O	0,3

Fuente: Estudio de factibilidad técnico-económica y ambiental para el aprovechamiento del biogás producido en el tratamiento de efluentes e plantas extractoras de aceite de palma de Puerto Wilches [17].

El biogás al ser más liviano que el aire posee una temperatura de inflamación cercana a los 700°C y la temperatura de la llama alcanza los 870°C, se quema con una llama azul sin producir olor y el poder calorífico que posee oscila entre 20 y 25 MJ/m^3 lo cual corresponde a 6 KWh/m^3 y aproximadamente corresponde a medio litro de diesel. Al mezclar el biogás con el aire en una relación de 1 a 20 forman una mezcla gaseosa altamente explosiva [17].

Tabla 4 Propiedades fisicoquímicas del biogás

Propiedad	Unidades	Valor
Densidad	Kg/m^3	1.09
Solubilidad en el agua	-	Baja
Presión crítica	Psia	673.1
Temperatura crítica	°C	82.5
Poder calorífico	$Kcal/m^3$	De 4500 a 6500

Fuente: Estudio de factibilidad técnico-económica y ambiental para el aprovechamiento del biogás producido en el tratamiento de efluentes e plantas extractoras de aceite de palma de puerto Wilches [17].

a. USO DEL BIOGÁS EN LÁMPARAS DE ILUMINACIÓN

En la operación de una lámpara a base de biogás es necesario tener controlado el agua y gas sulfhídrico, esto debe ser realizado para cumplir con las necesidades y exigencias para lámparas de carácter doméstico o industrial. Para obtener más eficiencia de la lámpara del biogás hay que conocer que está en función de la presión de suministro que oscila entre 600 a 1500 mm C.A y de la potencia de iluminación. Según lo anterior para obtener un incremento en la intensidad de iluminación hay que aumentar la presión de suministro y el biogás deberá ser de mejor calidad [18].

Para producir la iluminación es utilizada una caperuza que es previamente impregnada con algún material radiactivo el cual incrementa la intensidad lumínica por incandescencia. Para la fabricación de esta caperuza se debe tener en cuenta la protección de las corrientes de aire, insectos y manipularla por medio de un globo de vidrio esférico [18].

La intensidad lumínica de una lámpara de biogás puede estar entre 100 a 200 bujías lo cual es dependiente de la calidad y del biogás utilizado. El consumo de gas en función de la intensidad lumínica y el número de bujías es de la siguiente forma [18]:

- ✓ Lámparas con potencia de 100 bujías y 1 caperuza es de 0.1 a 0.15 $m^3/hora$.
- ✓ Lámparas con potencia de 100 bujías y 2 caperuzas es de 0.12 a 0.16 $m^3/hora$.
- ✓ Lámparas con potencia de 100 bujías y 3 caperuzas es de 0.15 a 0.20 $m^3/hora$.

b. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS EN QUEMADORES

El biogás producido en el biodigestor también puede ser aprovechado por medio de quemadores en el que se debe tener un buen diseño de los sistemas de suministro y conducción de gases para que promueva una llama estable, bien estructurada por zonas y con una mínima producción de gases contaminantes. Las dimensiones de un quemador doméstico e industrial de gas dependen de los siguientes factores [18]:

- ✓ Características y propiedades del biogás.
- ✓ Consumo del quemador.
- ✓ Presión de entrada del gas.
- ✓ Propiedades del aire.

Se cuenta con varios tipos de quemadores pero los que han presentado mejor adaptabilidad al aprovechamiento energético del biogás son los quemadores domésticos de cabeza cilíndrica que se emplean generalmente con gases comerciales de propano-butano y los quemadores industriales que son de anillos concéntricos y tubulares (tipo flauta) [18].

Los quemadores de biogás domésticos trabajan con presiones entre 50 a 150 mm C.A en estufas de 1 a 4 puestos con quemadores circulares de 2 a 10 pulgadas de diámetro. Con un volumen del 55% de metano el consumo del biogás varía según el tamaño de la tubería de descarga del quemador [18].

Los quemadores comerciales domésticos se pueden adaptar al biogás ampliando el diámetro de la tubería de descarga del gas y la del flujo del aire primario todo en función de mayor densidad del biogás, ya que este puede llegar con más carga de impurezas como producto de una deficiente limpieza. Para los quemadores industriales de más de 2 Kw demandan mayores presiones de suministro de biogás de 500 a 2000 mm C.A [18].

En estos quemadores domésticos o industriales alimentados con biogás se puede presentar algunos problemas comunes que son presentados en la siguiente tabla [18].

Tabla 5 Problemas y soluciones para el uso del biogás en quemadores

Problemas	Causas posibles	Posibles soluciones
Llama larga y amarillenta	Déficit de aire primario, exceso de combustible	Aumentar entrada de aire, reducir paso del biogás
Llama despega del quemador	Alta presión y velocidad del gas	Reducir entrada aire primario
Llama débil y se extingue	Baja velocidad del gas en la tubería	Aumentar diámetro del inyector
Llama muy pequeña	Déficit de combustible	Limpiar orificio de inyección obstruido. Incrementar diámetro de orificio de descarga.
Manchas amarillas en la llama	Déficit de aire primario	Ampliar entrada de aire primario.

Fuente: Tecnologías para el aprovechamiento del gas producido por la digestión anaeróbica de la materia orgánica [18].

c. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS EN CALDERAS

Para el uso del biogás en calderas este debe estar muy bien purificado en cuanto al contenido de gas sulfhídrico y vapor de agua, además de ser eliminado la mayor cantidad de dióxido de carbono CO_2 . Las calderas que son acondicionadas para ser aprovechado el biogás son de tipo vertical, con volúmenes de cámara de combustión que varían entre 4 a 20 pies cúbicos y con potencias que oscilan comercialmente ente 5 a 50 BHp [18].

Para la selección del tamaño de la caldera se debe conocer que está en función de la disponibilidad y características del biogás producido, de la calidad y disponibilidad

de agua y de las necesidades térmicas de agua caliente o de vapor para cualquiera de sus usos [18].

d. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

El biogás puede ser utilizado como combustible en motores de combustión interna a gasolina o diesel para transporte, transmisión mecánica o en generación de energía. Las aplicaciones del biogás en motores diesel se da más a nivel industrial ya que por su resistencia y bajo costo de operación [17].

El motor diesel la ignición es llevada a cabo por compresión (auto ignición) de la siguiente forma: el aire ingresa a la cámara de combustión en la cual se inicia la compresión, poco antes de alcanzar la máxima compresión se atomiza el combustible dentro de la cámara, encendiéndose al entrar en contacto con el aire comprimido en el que se ha alcanzado una temperatura aproximadamente de 600 °C, al cual el ACPM hace combustión. En los motores a gasolina la ignición de la mezcla comprimida de combustible y aire produce una chispa eléctrica que producen las bujías [17].

En consecuencia a lo anterior los motores a gasolina pueden reemplazar la totalidad del combustible con biogás y funcionar perfectamente mientras que el motor a Diesel es posible reemplazar el 80% de ACPM, debido a la baja ignición del biogás que no permite suplir totalmente el combustible en estos tipos de motores [17].

La operación de motores Diesel con inyección de Biogás no se altera significativamente, siempre y cuando el poder calorífico del gas no sea muy bajo, es decir que el contenido de metano no sea inferior al 50% [17].

El biogás para ser introducido en la operación del diesel como combustible se requiere de un dispositivo externo donde se mezcla el biogás con el aire, el cual debe estar conectado a la succión del motor, la mezcla biogás-aire es succionada y comprimida en la cámara de combustión del motor y poco antes de alcanzar la máxima compresión el sistema de inyección atomiza dentro de la cámara la cantidad de ACPM requerida para producir la ignición, dicha cantidad varia con el diseño y operación del motor, pero puede restringirse hasta el 20% del total consumido cuando solo se alimenta ACPM [17].

Los parámetros de diseño, funcionamiento y elementos de operación del motor diesel permanecen inalterados. Para realizar la operación del motor con carga parcial se requiere controlar el suministro del gas. La relación aire-combustible dependerá de la cantidad de biogás, sin embargo con una mezcla muy pobre encenderá fácilmente con una adecuada atomización de diesel [17].

Las ventajas de utilizar el sistema dual de combustible Biogás-ACPM en un motor diesel son [17]:

- ✓ Cualquier cantidad de biogás inyectada al motor permite la sustitución de una parte del ACPM requerido entre el 0 y 80%.
- ✓ Las emisiones de azufre e hidrocarburos volátiles son menores debido al bajo contenido de azufre en el biogás y que la mezcla se quemara con mayor facilidad.
- ✓ Alta eficiencia térmica, prolonga la vida útil del motor, fácil manejo y bajo costo de adaptación.
- ✓ Versatilidad (el motor pasa fácil y rápidamente del sistema dual al sistema normal con ACPM).

4. METODOLOGÍA

4.1. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO MUESTRAL Y CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

a. TAMAÑO MUESTRAL

En el barrio Santa Bárbara, localidad de Usaquén existen 231 restaurantes [19].

Fernández 1996 propone la siguiente ecuación para determinar el tamaño de una muestra:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{(N - 1) \cdot e^2 + z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}$$

En donde:

n= El tamaño de la muestra que queremos calcular

N= Tamaño del universo (231 restaurantes registrados en la localidad de Usaquén)

Z= Es la desviación del valor medio que aceptamos para lograr el nivel de confianza deseado. En función del nivel de confianza que busquemos, usaremos un valor determinado que viene dado por la forma que tiene la distribución de Gauss. Los valores más frecuentes son:

Nivel de confianza 90% -> Z=1,645

Nivel de confianza 95% -> Z=1,96

Nivel de confianza 99% -> Z=2,575

e= Es el margen de error máximo que admitido, para este caso será de 5%

p= Es la proporción que se quiere encontrar, también conocida como heterogeneidad o la diversidad del universo; para este caso tomaremos 1% [20].

b. CARACTERIZACIÓN PREMILIMINAR

De acuerdo al tamaño muestral debían ser seleccionados los restaurantes para realizar la visita a la zona establecida, teniendo en cuenta que los siguientes criterios: 1) Estar dentro de la zona determinada para la realización del estudio, y 2) Permitir la caracterización de sus residuos orgánicos generados, en caso de ser elegidos como el restaurante idóneo para el muestreo. Se debía cumplir el segundo criterio ya que el restaurante elegido autorizaba realizar la caracterización de sus residuos y en caso que de que no lo permitiera debía ser elegido otro restaurante.

Para la caracterización preliminar, se diseñó una encuesta con preguntas que permitieran conocer (ver anexo 1):

- Clasificación de los residuos en grupos (aceites y grasas, cáscaras de plátano, cáscaras de papa, restos de frutas, restos de carnes, semillas, arroz, huesos, salsas, restos de hortalizas, restos de verduras, cáscaras de cítricos, lácteos, cáscaras de huevo y barrido).
- Información general de cada restaurante.
- Cantidad de residuos generados.
- Frecuencia de generación y recolección de los residuos.

4.2. MUESTREO: RECOLECCIÓN, SEPARACIÓN Y PESAJE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.

Para la selección del restaurante en el cual se llevaría a cabo el muestreo, se tuvo en cuenta la siguiente condición para su elección:

- Debía ser el mejor representante de las cantidades para cada uno de los tipos de residuos generados, de acuerdo al promedio calculado con los datos obtenidos en las encuestas (ver Anexo 2).

El restaurante que cumplió con estas dos condiciones fue Restaurante Bar Tienda de Café, ubicado en la Calle 119 # 6A-16. El muestreo se realizó el lunes 2 de marzo y se utilizó la técnica de Recolección de Residuos Sólidos Heterogéneos [21], que se ajustaba al tipo de residuos; la cantidad de residuos generados en el restaurante fueron medidos kilogramos por día.

- Recolección de residuos sólidos heterogéneos

Después de realizado el muestreo se realizó una separación y posterior pesaje los residuos generados en el restaurante (ver Ilustración 2) [21].

- a) Anotación sobre los diferentes tipos de materiales de desecho que comprende
- b) La clasificación y separación de materiales de mayor volumen, mayor masa o que se presentan como únicos
- c) Pesaje de los materiales clasificados [21].

Ilustración 2 Residuos recolectados durante muestreo



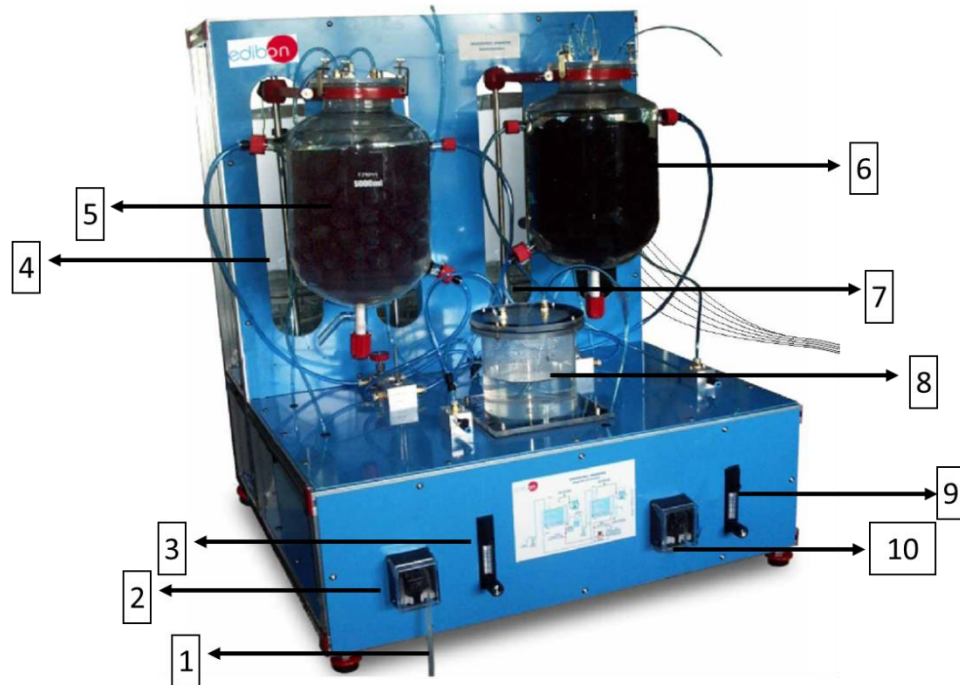
Fuente: Imagen propia en laboratorio de microbiología, Universidad Santo Tomás, Sede Bogotá

4.3. PREPARACIÓN DEL SUSTRATO Y CARACTERISTICAS DEL DIGESTOR ANAERIBIO PDAN

Una vez caracterizados y pesados, los residuos (sustrato) fueron licuados y colados para reducir su tamaño a menos de 6 milímetros, siguiendo la recomendación de Monroy en 2007 [2]. Luego de reducir el tamaño del sustrato, se procedió a realizar esterilización del mismo, con el fin de evitar la interferencia de cualquier microorganismo que pudiese afectar la producción de biogás, especialmente de metano [14].

El sustrato es bombeado en el digestor anaerobio PDAN marca Edibon (ver Ilustración 3) desde un tanque (que no hace parte del equipo) con una bomba peristáltica, a través de un flujómetro, y finalmente llega al reactor o digestor.

Ilustración 3 Digestor Anaerobio PDAN Marca Edibon



1. Alimento_1 2. Bomba izquierda 3. Control de bomba izquierda (Caudal) 4. Tanque de muestreo de gas izquierdo (atrás) 5. Reactor Izquierdo 6. Reactor Derecho 7. Termostato 8. Alimento_2 9. Control de bomba derecha (Caudal) 10. Bomba derecha

Fuente: EDIBON INTERNATIONAL

Una manguera desde los reactores trae el gas producido al tanque volumétrico donde se mide su volumen. La unidad puede trabajar con un solo digestor, o con ambos digestores en paralelo. Los digestores se calientan por medio de agua caliente procedente de un baño termostático, que pasa a través de la camisa. Cada digestor tiene un circuito cerrado de agua de la bañera con una válvula de regulación para controlar el flujo. Para medir el volumen de gas producido se utilizan dos tanques volumétricos. Estos tanques miden el gas producido por el digestor, por desplazamiento de agua. El tanque volumétrico tiene dos partes: la primera, el depósito superior, es donde se recoge el gas y se mide. El segundo, más pequeño que el anterior y por debajo de ella, recoge el agua desplazada [22].

4.4. SELECCIÓN DEL INOCULO

El inóculo utilizado se obtuvo del laboratorio de microbiología; los lodos provienen de un reactor de una planta de tratamiento de aguas residuales, y de un biodigestor anaerobio alimentado con estiércol de porcinos. Se estableció el uso de este inóculo siguiendo la recomendación de Monroy en 2007 [14].

Se usaron en total 750 ml de inóculo con un peso aproximado de 800 gramos, que fueron vertidos en el primer tanque del Biodigestor, cuyo volumen es de 5 litros.

El contenido de agua de la mezcla conlleva una razón de biomasa a agua de 1:1 [23]. La temperatura a usar es de 35 °C. El pH debe estar entre 5 y 7,7 [14].

4.5. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL LODO (INÓCULO) Y DEL SUSTRATO (ALIMENTO)

La caracterización del lodo y del alimento se llevó a cabo en Antek S.A. un laboratorio certificado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, en donde se midieron DBO⁵ y DQO. Las pruebas de sólidos suspendidos totales (SST) y cenizas se desarrollaron en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás sede Bogotá siguiendo las normas UNE 77030:02 y UNE 77034:02. El pH se midió al final del experimento por separado para el lodo y el alimento y la temperatura se registró con ayuda del equipo Edibon.

4.6. CALCULO DE LA PROPORCIÓN C/N

La proporción carbono/nitrógeno de los residuos caracterizados se calculó de dos formas diferentes; la primera fue realizada teóricamente, buscando artículos en donde se encuentre esta proporción C/N de residuos similares a los caracterizados. La segunda forma se realizó con el cálculo de la proporción C/N de los residuos caracterizados por medio del porcentaje de proteínas, carbohidratos y lípidos que contienen cada residuo. Se usaron las formulas empíricas de estos componentes químicos para conocer el peso molecular, la cantidad de carbono y nitrógeno que estas contienen.

4.7. CALCULO DE POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE LOS RESIDUOS RECOLECTADOS

Dada la necesidad de los restaurantes de dar tratamiento a todos los residuos que son generados, se decidió hacer una mezcla con todos los residuos recolectados y realizar el cálculo teórico de la proporción C/N de los residuos caracterizados durante el muestreo y por ultimo preparar una mezcla con una razón de biomasa a agua 1:3.

Con la información sobre la producción potencial de metano presentada en la tabla 1, se calculó el potencial de producción de metano en los residuos recogidos durante la muestra. El cálculo se llevó a cabo usando los coeficientes de producción de metano presentados por Tobias Marino [24], y multiplicándolos por los valores de peso de los residuos sólidos obtenidos luego de la caracterización en el restaurante escogido para el presente estudio (ver Tabla 12). El objetivo de este cálculo era comparar el potencial de producción de metano calculado contra la producción real de metano.

4.8. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO (ALIMENTO)

4.8.1. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST):

Este parámetro permitió medir la cantidad de sólidos no filtrables, es decir, aquellos cuyo diámetro es superior a los 0.45 μm . Esta medida se expresa en mg/L, y el procedimiento realizado de este parámetro es explicado en el anexo 3.

4.8.2. PRUEBA DE CENIZAS

Por medio de este parámetro se pudo conocer la cantidad de compuestos inorgánicos que quedan tras eliminar la materia orgánica presente en el sustrato medido en mg/L, el procedimiento de la prueba de ceniza se explica en el anexo 4.

4.9. ESTABLECECIMIENTO DE PARÁMETROS DE CONTROL DE METANOGENÉISIS

4.9.1. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE METANO, REPETICIONES Y TIEMPOS EN LA MEDICIÓN DEL BIOGÁS GENERADO

El Biogás que produce el proceso de digestión anaerobia tiene como principales componentes metano en un 65%, CO_2 en un 34%, y H_2S en un 0.2% [25].

Buscando separar el metano de los demás gases generados durante la digestión anaerobia se adecuaron trampas que obligaban al biogás a pasar a través de ellas.

Para este estudio se adecuaron trampas de KOH (500 ml a N=1) para atrapar el dióxido de carbono (CO_2), y de óxido de hierro (Fe_2O_3) para atrapar el ácido sulfhídrico (H_2S), componente con carácter corrosivo y que afecta motores, sistemas de transporte de biogás, hormigón y campanas de los digestores [26]. Las trampas

permitieron únicamente el paso del metano a las cámaras de almacenamiento del biodigestor y protegen el equipo.

Se hicieron mediciones en la producción de metano diariamente cada 24 horas durante 26 días, tiempo que tomo la producción de biogás en estabilizarse [13].

Luego de la fase de caracterización de todos los residuos se preparó una única mezcla con el total de residuos recolectados durante el muestreo, y a partir de esta mezcla se alimentó el biodigestor; finalmente se realizó una sola repetición en la medición del metano generado [14].

4.9.2. ESTIMAR EL RENDIMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DEL METANO (EFICIENCIA).

El rendimiento en la producción de metano se calculó usando los resultados del análisis de DBO₅ del alimento o sustrato, y el metano obtenido luego del proceso de digestión anaerobia.

A continuación se muestra la fórmula que fue usada en el cálculo de eficiencia del proceso:

1. Se usó la ley de los gases ideales para calcular el peso en moles del metano generado

$$n = \frac{PV}{RT}$$

n= peso del metano en moles

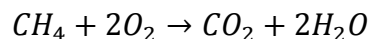
P= presión atmosférica

T= temperatura en grados Kelvin (°K)

R= constante de los gases ideales ($0.08206 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot ^\circ K}$)

V= Volumen del metano producido en litros (L)

2. Para calcular la cantidad de oxígeno necesario para oxidar el metano producido, se balancea estequiométricamente la siguiente ecuación:



- Cálculo del oxígeno en moles:

$$MOLES \text{ de } O_2 = \frac{(\# \text{ moles de } CH_4 \text{ producido} * 2O_2)}{1 \text{ mol } CH_4}$$

- Cálculo del oxígeno en mg:

$$mg \text{ de } O_2 = \frac{(15.999 \text{ mg } O_2 * \text{MOLES de } O_2)}{1 \text{ mol } O_2} = DQO \text{ CH}_4$$

3. Cálculo de la porción de materia orgánica que se convirtió en metano (eficiencia):

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{DQO \text{ CH}_4 [\text{mg } O_2]}{DBO_5 \text{ Sustrato} [\text{mg } O_2]} \times 100$$

4.10. PARÁMETROS DE DISEÑO PARA UN REACTOR ANAEROBIO ADECUADO PARA EL CASO DE ESTUDIO A NIVEL URBANO

4.10.1. PARÁMETROS DE DISEÑO PARA UN BIODIGESTOR

Los parámetros de diseño que deben ser tenidos en cuenta para un biodigestor anaerobio son [19]:

a. CALCULO DEL VOLUMEN DEL DIGESTOR (V_d)

Al conocer la cantidad de materia orgánica que se puede recoger diariamente para alimentar el biodigestor, el volumen del digestor V_d se calcula mediante la expresión [16]:

$$V_d = (Kg_{residuos} + Kg_{agua}) * T_r \quad (1)$$

Donde T_r es el tiempo de retención (tiempo que requieren las bacterias para degradar la materia orgánica).

b. CALCULO DEL VOLUMEN DE LA CAMARA DE FERMENTACIÓN (V_{cf})

El volumen de la cámara de fermentación V_{cf} constituye entre un 75% ~ 80% del volumen del digestor, por lo cual [16]:

$$V_{cf} = V_d * (0.75 \sim 0.80), m^3 \quad (2)$$

$$V_{cf} = \frac{\pi d_{cf}^2 h_{cf}}{4} \quad (3)$$

Nota: Se asume que la relación **d/h** es un valor conocido.

$$x = \frac{d_{cf}}{h_{cf}} \quad (4)$$

Despejando d_{cf} en la expresión (4) se tendrá $d_{cf} = x * h_{cf}$

Sustituyendo en la ecuación (3) y despejando h_{cf} el resultado es la ecuación de la altura cámara de fermentación [16].

c. ALTURA CÁMARA DE FERMENTACIÓN (h_{cf})

$$h_{cf} = \sqrt[3]{\frac{4V_{cf}}{\pi X^2}} \quad (5)$$

d. DIAMETRO CÁMARA DE FERMENTACIÓN (d_{cf})

$$d_{cf} = \sqrt[3]{\frac{4V_{cf}}{\pi h_{cf}}} \quad (6)$$

e. RADIO DE CÁMARA DE FERMENTACIÓN (r_{cf})

$$r_{cf} = \frac{d_{cf}}{2} \quad (7)$$

f. RADIO DE LA CÚPULA (r_c)

$$r_c = \sqrt[2]{h_{cf}^2 + r_{cf}^2} \quad (8)$$

g. VOLUMEN DE LA CUPULA (V_c)

$$V_c = V_d(0.2 \sim 0.25), m^3 \quad (9)$$

$$V_c = \pi h_c \left(\frac{d_{cf}^2}{8} + \frac{h_c^2}{6} \right) \quad (10)$$

h. VOLUMEN TOTAL DEL DIGESTOR

$$V_d = V_{cf} + V_c \quad (11)$$

Teniendo en cuenta estas expresiones, se le dan valores a X y así se determinan los parámetros constructivos del digestor. Para determinar cuáles son los valores óptimos de los parámetros para la construcción del digestor se busca la interrelación entre el digestor, la cámara de fermentación y la cúpula según las condiciones establecidas [16].

4.11. ANALISIS ECONOMICO

El análisis económico busca contrastar los costos totales contra los beneficios generados por concepto de ahorros, exenciones tributarias y producción de metano. Se propusieron dos escenarios que se diferenciaban por el material usado en la fabricación del Biodigestor; uno de aluminio y otro plástico. Además se tuvo en cuenta las variables que pueden afectar el comportamiento en el tiempo del proyecto y su factibilidad económica.

Estas variables incluyen: rendimiento del metano (se utilizó el valor teórico del potencial de metano porque el producido arroja tiempos de retorno de la inversión infinitos), costos de operación y mantenimiento, precio del metano en el mercado, costos de inversión y capacidad de producción de metano.

Variables:

- Rendimiento de CH₄
- Generación de residuos sólidos orgánicos
- Costos de operación y mantenimiento
- Precio del CH₄ en el mercado (AÑO 0)
- Inversión inicial
- Capacidad de producción de CH₄

5. DESARROLLO CENTRAL

5.1. DATOS Y RESULTADOS

5.1.1. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO MUESTRAL

Como resultado se obtuvo que el número ideal de encuestas a realizar es de 15, con un nivel de confianza del 95% y un error del 5% [27].

Se desarrolló y aplicó una encuesta al número de restaurantes calculado en la determinación del tamaño muestral. La encuesta se aplicó a los primeros 15 restaurantes que aceptaron participar en la actividad sin tener en cuenta el tipo de restaurante.

5.1.2. RESULTADOS DEL MUESTREO Y PESAJE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL RESTAURANTE

Luego de realizar el muestreo de los residuos sólidos, estos fueron llevados al laboratorio, separados y pesados. A continuación se presentan los resultados del pesaje de los residuos sólidos.

Tabla 6 RESULTADOS DEL MUESTREO Y PESAJE (gr/día)

RESIDUOS	PESO gr	PORCENTAJE%
HUESOS Y RESTOS DE CARNES:	241,5 gr	8,98 %
CASCARAS DE HUEVO	211,2 gr	7,86 %
YEMA DE HUEVO	227,2 gr	8,45 %
TOMATES	76,4 gr	2,84 %
LECHUGA	198,7 gr	7,39 %
TALLOS DE CILANTRO	73,8 gr	2,75 %
CEBOLLA	11,3 gr	0,42 %
PAPA	31 gr	1,15 %
CASCARA DE CITRICOS (NARANJA Y LIMON)	1020 gr	37,94 %
HOJAS DE PLATANO (TAMAL)	597,4 gr	22,22 %
TOTAL	2688,5 gr	100,00 %

5.1.3. VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS DEL INÓCULO Y EL ALIMENTO

El lodo y el alimento se sometieron a una caracterización físico-química. El control de variables como el DBO₅, DQO, SST, temperatura y pH permiten optimizar la producción de metano y reducir TRH [14]. La tabla 7 muestra los resultados de la caracterización físico-química del lodo y el alimento.

Tabla 7 Variables evaluadas y resultados en caracterización de inoculo y alimento

		INOCULO	SUSTRATO
VARIABLE	UNIDAD	RESULTADO	RESULTADO
DBO₅	mg/L	-	25080
DQO	mg/L	5003	11353
SST	mg/L	300	10750
Cenizas	mg/L	437,143	10910
Temperatura	° Celsius	20	21
pH	N/A	7,72	5,58

Datos generados por Antek S.A. (DBO₅ y DQO) y tomados en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás Sede Bogotá (SST, Cenizas, Temperatura y pH)

5.1.4. ESTIMACIÓN DE LA PROPORCIÓN C/N

Se investigaron tres formas diferentes de conocer la proporción C/N de los residuos que fueron caracterizados, la primera fue por medio de artículos indexados con estudios que presentan la relación C/N de los residuos sólidos urbanos de origen orgánico utilizados; se usaron aquellos cuya composición resultara similar a la del muestreo realizado en el presente trabajo, esto se presenta en la tabla 8.

La segunda fue con base en la información presentada en el manual de biogás publicado por la FAO y el ministerio de energía de Chile [28] que presenta tablas con la relación C/N de varios tipos de residuos entre los cuales se encuentran los caracterizados en el presente estudio caracterizados como lo muestra la tabla 9.

La tercera forma fue por medio de las proteínas, carbohidratos y lípidos presentes en los residuos caracterizados en este estudio. Se tuvo en cuenta las formulas empíricas de los componentes químicos (proteínas, carbohidratos y lípidos) para obtener la cantidad de carbono y nitrógeno que estas contienen y así calcular para cada residuo la relación C/N como se muestra en las tablas 10 y 11.

Tabla 8 Relación C/N teórico de residuos

Proporción C/N teórico		
	C/N	Referencia
OFMSW 1 (frutas, vegetales, carnes y cereales)	15,61	[29]
OFMSW 2 (frutas, vegetales, carnes y cereales)	15	[30]
OFMSW 3 (frutas, vegetales, carnes y cereales)	12	[31]
OFMSW 4 (frutas, vegetales, carnes y cereales)	21,67	[32]
OFMSW 5 (frutas, vegetales, carnes y cereales)	24,5	[33]
OFMSW 6 (frutas, vegetales, carnes y cereales)	16,5	[34]

Tabla 9 Proporción C/N teórico de algunos residuos similares a los caracterizados

Relación C/N		
Residuo	C/N	Referencia
Papa	20	[28]
Tomate	12	
Cebolla	15	
Huesos	23	
Hortalizas	17	

Tabla 10 Cálculo de la composición de carbono y nitrógeno de proteínas, carbohidratos y lípidos

Composición (g/mol)				
	Peso	Formula empírica	C	N
Proteína	352	C ₁₆ H ₂₄ O ₅ N ₄	192	56
Carbohidratos	162	C ₆ H ₁₀ O ₅	72	0
Lípidos	480	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	2040	0
Total			2304	56
C/N			41,14	

Tabla 11 Cálculo de la proporción C/N de los residuos caracterizados

Proporción C/N de Residuos Orgánicos Caracterizados										
Cantidad producida (g/día)	Residuos	Agua	Proteína	Carbohidratos	Lípidos	Cenizas	Fibras	Aporte total C (g/día)	Aporte total N (g N/día)	Referencia
211,2	Cascara de huevo	0,016	0,033	0	0	0,951	0	3,802	1,109	[35]
227,2	Yema	0,4775	0,165	0,002	0,335	0,0135	0	344,126	5,96	[35]
31	Papa	0,77	0,019	0,201	0,001	0	0	3,222	0,094	[36]
11,3	Cebolla	0,89	0,013	0,071	0,002	0	0,021	0,533	0,023	[37]
73,8	Tallo de Cilantro	0,87	0,033	0,065	0,006	0	0,012	5,342	0,387	[38]
76,4	Tomate	0,947	0,01	0,019	0,0061	0	0,016	3,043	0,121	[39]
198,7	Lechuga	0,94	0,014	0,023	0,002	0	0	5,2375	0,443	[40]
1020	Cascaras de cítricos	0	0,0612	0	0,0254	0,0566	0	144,159	9,931	[41]
597,4	Hojas de plátano	0,0725	0	0	0,336	0,1363	0,4206	853,088	0	[42]
241,5	Huesos	-	0,333	0	0	0	0	43,865	12,794	[43]
							Total	1406,416	30,867	
							C/N	45,564		

La mezcla de residuos sólidos preparada para el presente estudio (ver Tabla 11) incluye algunos con alta relación C/N como cáscaras de papa, plátano, y otros con baja relación C/N como yemas de huevos, huesos y restos de carne [15].

De acuerdo a los datos obtenidos en las tres formas para hallar la relación C/N, la más aproximada a un valor específico es por medio de los componentes químicos

ya que la proporción C/N puede variar de acuerdo al residuo que más aporte carbono a la mezcla.

5.1.5. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DEL METANO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

El objetivo de calcular la producción de metano estimada para los residuos sólidos recolectados en el restaurante es comparar este valor con el valor real de metano producido en el biodigestor.

Con la información sobre la producción potencial de metano presentada en la tabla 1 (para carnes y huesos), y por C Tobias Marino et al. (para los demás residuos), [21] se calculó el potencial de producción de metano en los residuos recogidos durante el muestreo. El cálculo se llevó a cabo usando los coeficientes de producción de metano presentados por Tobias Marino, y multiplicándolos por los valores de peso de los residuos sólidos obtenidos luego de la caracterización en el restaurante escogido para el presente estudio (Ver tabla 12).

Tabla 12 Cálculo de la producción de metano (estimación con datos obtenidos de estudios previos)

TIPO RE RESIDUO	SV g/kg res	C/N	BMP ml CH ₄ /g SV	Fuente
OFMSW	393,5	51,8	546,1	[44]
OFMSW	385,3	—	560	[45]
OFMSW	338,5	—	391,6	[46]
PROMEDIO	372,4		499,2	N/A

La producción de Biogás esperada es de 0.5 m³, para 2688.5 gr de sustrato, lo que se expresa como 0,1859 m³CH₄/Kg Alimento.

5.1.6. RENDIMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DEL METANO (EFICIENCIA)

Se utilizó una mezcla del total de los residuos orgánicos recogidos durante el muestreo, se usaron todos los residuos porque el restaurante necesita dar tratamiento a la totalidad de residuos orgánicos generados. La mezcla de residuos tiene una relación biomasa-agua de 1:2 El rendimiento en la producción de metano se midió con el equipo Edibon y los resultados se muestran en tabla 13:

Tabla 13 Resultados del rendimiento de la producción de metano

DÍA	Temp. °C	Volumen de agua desplazado ml	Biogás producido	Total ml Biogás	Ajuste a m ³ Biogás/m ³ de Reactor	Pendiente del punto en la curva de producción de Metano
0	16	245				
1	16	225	20	20	4	
2	16	202	23	43	8,6	23
3	16	174	28	71	14,2	28
4	16	148	26	97	19,4	26
5	16	117	31	128	25,6	31
6	16	87	30	158	31,6	30
7	16	58	29	187	37,4	29
8	39	229	23	210	42	23
9	38	206	23	233	46,6	23
10	37	181	25	265	53	32
11	38	153	28	293	58,6	28
12	25	121-250	32	325	65	32
13	39	215	35	360	72	35
14	37	181	34	394	78,8	34
15	25	150	31	425	85	31
16	20	124-235	26	451	90,2	26
17	38	198	26	477	95,4	26
18	38	167	31	508	101,6	31
19	37	140	27	535	107	27
20	38	112-225	18	553	110,6	18
21	37	205	20	573	114,6	20

El cálculo de la eficiencia se desarrolló siguiendo el procedimiento propuesto en el aparte 5.11.3 del presente proyecto y los resultados se observan en la tabla 14:

Tabla 14 Eficiencia del proceso en la producción del metano

CALCULO DE EFICIENCIA DEL SUSTRATO		
	CANTIDAD	UNIDAD
DQO CH ₄	784,71	mg O ₂
DBO ₅ SUSTRATO	25080	mg O ₂
EFICIENCIA	3,13	%

La eficiencia del proceso de producción de biogás en el digester Edibon fue de 3.13% (ver Tabla 14). La eficiencia del proceso es baja respecto a la esperada, sin embargo puede ser mejorada controlando rigurosamente variables como la temperatura (aunque el digester tiene control de temperatura debió apagarse en los festivos y fines de semana por disposición de la Universidad), el pH y variando la frecuencia de alimentación por ejemplo a 2 veces por día (el sistema usado fue en batch). [2]

5.1.7.DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA

Luego de 23 días de mantener el digester encendido a la temperatura establecida en la metodología, se obtuvo el comportamiento de la producción de metano y se elaboraron los gráficos de generación de metano acumulado (ver Ilustración 4) y específico (ver Ilustración 5).

Con los valores de producción específica se halló la pendiente entre cada punto y encontrando que los valores hasta un tiempo de retención de 1-15 días fueron mayores que los valores de 15-23 días; teniendo en cuenta que un valor mayor de pendiente entre cada punto representa una mayor tasa de producción de metano, se fijó que el tiempo de retención hidráulica TRH óptimo para el ensayo realizado es de 15 días (ver Ilustración 5 y Tabla 13).

A continuación se presenta pendiente y coeficiente de correlación de los datos de producción acumulada de metano y su respectiva recta de mejor ajuste:

Pendiente (b) en ml CH₄/día: 0,035196544

Coeficiente de Correlación (r): 0,998

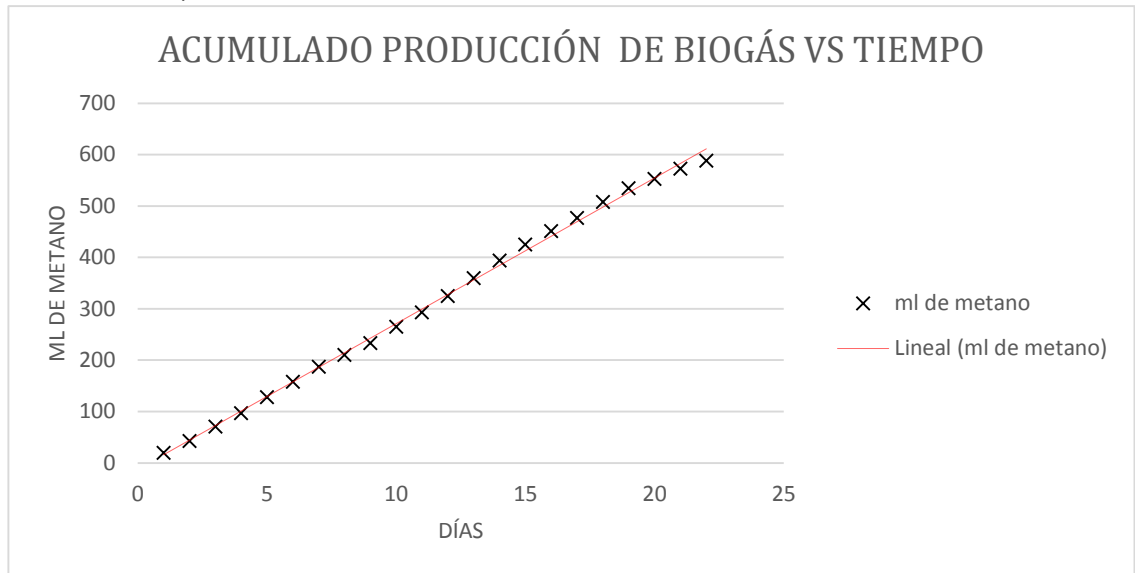
Incertidumbre de la pendiente (Eb) en ml CH₄/día: 0,000714412

Pendiente con su incertidumbre: $b = (0,035196544 + 0,000714412) \frac{ml\ CH_4}{día}$

Ilustración 4 Comportamiento producción de metano y TRH

La mayor tasa de producción se dio entre los días 1-15, a partir del día 15 el sistema tuvo una tendencia a la disminución de la producción de metano (ver

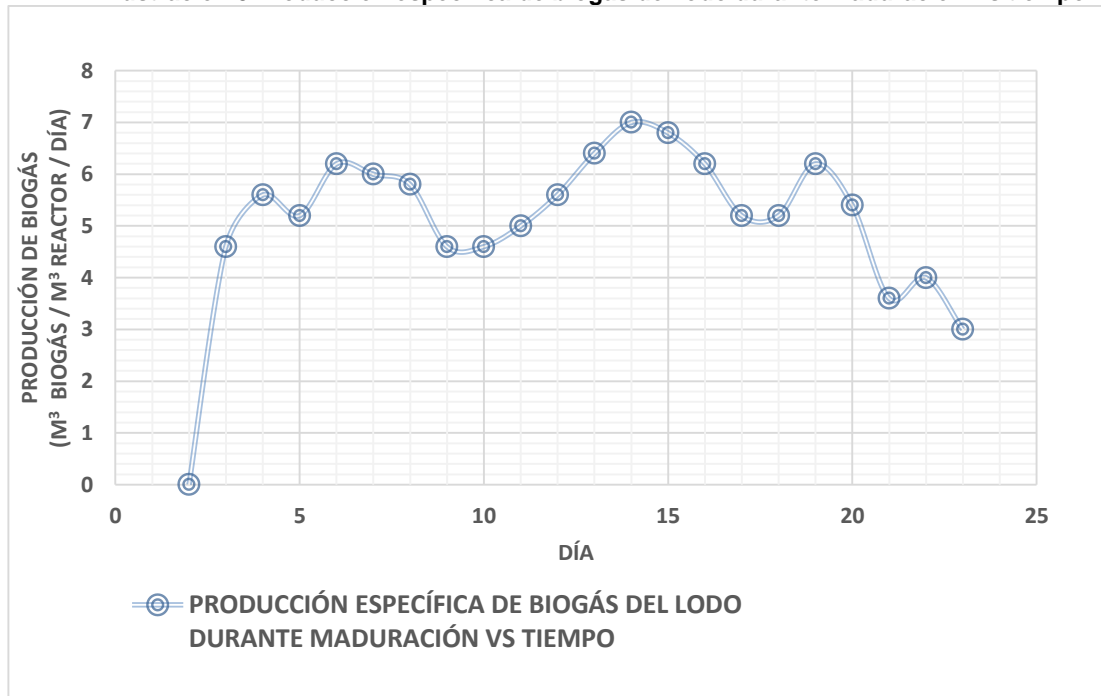
Ilustración 5).



El tiempo de evaluación usado fue de 22 días

El sistema se alimentó al inicio del experimento, presentó picos de producción de metano en los días 6, 14 y 19; estos picos se explican dada la necesidad de apagar el digester durante los fines de semana y reanudarlo a principio de semana, por disposición de la Universidad.

Ilustración 5 Producción específica de biogás del lodo durante maduración Vs tiempo



5.1.8. CÁLCULO DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL DIGESTOR

Teniendo en cuenta parámetros de diseño, resultados del muestreo, pesaje (ver Tabla 6) y las necesidades de los restaurantes, se calculó el volumen del digestor; a continuación se presentan las variables consideradas para el diseño y dimensionamiento del digestor:

- Residuos sólidos orgánicos generados/día: 40kg/día (ver encuestas realizadas a los restaurantes). De estos 40 Kg de residuos son utilizados 2,8 Kg como sustrato para la alimentación del biodigestor.
- Tiempo de retención hidráulica TRH: 15 días, se calculó a partir de la generación de biogás estimada en el experimento (ver aparte 6.1.7. del presente trabajo).
- Relación biomasa/agua: 1:2
- Los resultados obtenidos de la interrelación (ver Tabla 15) son los parámetros de diseño para el digestor anaerobio dimensionado para el restaurantes contemplado en el proyecto.

Tabla 15 Cálculo de los parámetros para el diseño del biodigestor

x	*V _d	*V _{cf}	*V _c	**h _{cf}	**d _{cf}	**r _{cf}	**r _c	**h _c	*v _c	*v _d
0,1	1350,8	1350	0,8	55,6	5,6	2,8	55,7	0,1	360	1800
0,2	1353,4	1350	3,4	35,0	7,0	3,5	35,2	0,2	360	1800
0,3	1357,6	1350	7,6	26,7	8,0	4,0	27,0	0,3	360	1800
0,4	1363,4	1350	13,4	22,1	8,8	4,4	22,5	0,4	360	1800
0,5	1370,9	1350	20,9	19,0	9,5	4,8	19,6	0,6	360	1800
1	1431,2	1350	81,2	12,0	12,0	6,0	13,4	1,4	360	1800
1,1	1447,5	1350	97,5	11,2	12,4	6,2	12,8	1,6	360	1800
1,2	1465,0	1350	115,0	10,6	12,7	6,4	12,4	1,8	360	1800
1,3	1483,9	1350	133,9	10,1	13,1	6,5	12,0	1,9	360	1800
1,4	1503,9	1350	153,9	9,6	13,4	6,7	11,7	2,1	360	1800
1,5	1525,0	1350	175,0	9,1	13,7	6,9	11,4	2,3	360	1800
2	1645,6	1350	295,6	7,5	15,1	7,5	10,7	3,1	360	1800
2,1	1672,3	1350	322,3	7,3	15,3	7,7	10,6	3,3	360	1800
2,2	1699,9	1350	349,9	7,1	15,6	7,8	10,5	3,4	360	1800
2,3	1728,2	1350	378,2	6,9	15,8	7,9	10,5	3,6	360	1800
2,4	1757,1	1350	407,1	6,7	16,0	8,0	10,4	3,8	360	1800
2,5	1786,8	1350	436,8	6,5	16,3	8,1	10,4	3,9	360	1800
2,541	1799,1	1350	449,1	6,4	16,3	8,2	10,4	4,0	360	1800

x	*V _d	*V _{cf}	*V _c	**h _{cf}	**d _{cf}	**r _{cf}	**r _c	**h _c	*v _c	*v _d
2,542	1799,4	1350	449,4	6,4	16,3	8,2	10,4	4,0	360	1800
2,543	1799,7	1350	449,7	6,4	16,4	8,2	10,4	4,0	360	1800
2,544	1800,0	1350	450,0	6,4	16,4	8,2	10,4	4,0	360	1800

* Los valores de volumen presentados en la tabla están en litros. ** Los valores de altura (h), diámetro (d) y radio (c) se presentarán en decímetros. X – Relación diámetro/altura (d/h), V_d – Volumen del digester, V_{cf} – Volumen de la cámara de fermentación, h_{cf} – Altura de la cámara de fermentación, d_{cf} – Diámetro de la cámara de fermentación, r_{cf} – Radio de la cámara de fermentación, r_c – Radio de la cúpula, h_c – Altura de la cúpula, V_c – Volumen de la cúpula.

Asumiendo que 1 kg de mezcla biomasa-agua ocupa un volumen de un litro:

$$V_d = (Kg \text{ residuo} + Kg \text{ agua}) * TRH = (40 \text{ kg} + 80 \text{ kg}) * 15 \text{ días} \\ = 1800 \text{ litros}$$

Volumen del biodigester: $V_d = 1800 \text{ litros} = 1,8 \text{ m}^3$

Volumen cámara de fermentación: $V_{cf} = 1350 \text{ litros} = 1,35 \text{ m}^3$

Volumen cúpula: $V_c = 450 \text{ litros} = 0,45 \text{ m}^3$

Altura cámara de fermentación: $h_{cf} = 0,64 \text{ m}$

Diámetro cámara de fermentación: $d_{cf} = 1,64 \text{ m}$

Radio cámara de fermentación: $r_{cf} = 0,82 \text{ m}$

Radio cúpula: $r_c = 1,04$

Altura cúpula: $h_c = 0,4$

Volumen de la cúpula: $V_c = 450 \text{ litros}$

5.2. ESTUDIO DE VALORACIÓN ECONÓMICA

Para el digester anaerobio seleccionado y dimensionado en el aparte anterior, se realizó el respectivo análisis de factibilidad incluyendo costos totales y periodo de recuperación de la inversión por ahorros correspondientes al uso del metano generado y reducción en la tarifa de aseo.

5.2.1. DATOS DEL MODELO

En este estudio se usaron variables que proporcionaran un escenario de referencia para estudiar la viabilidad económica de implementar una planta de tratamiento anaerobio de residuos orgánicos que tenga como objetivo la generación de gas metano.

Estas variables incluyen: rendimiento del metano (se utilizó el valor teórico del potencial de metano porque el producido arroja tiempos de retorno de la inversión infinitos), costos de operación y mantenimiento, precio del metano en el mercado, costos de inversión y capacidad de producción de metano. Las variables y sus respectivas cifras se presentan a continuación en las tablas 16.

Se halló el tiempo de recuperación de la inversión del proyecto en dos escenarios; el primer escenario se calculó con un digestor anaerobio de acero inoxidable más costoso que el segundo con un digestor anaerobio de plástico.

El escenario 1 (ver Tabla 17) tuvo un tiempo de recuperación de la inversión de 8 años y una inversión inicial de \$30'777.600 COP y el escenario 2 (ver Tabla 18) presenta un tiempo de recuperación de la inversión de 7 años y una inversión inicial de \$24'057.600 COP.

Tabla 16 Variables incluidas en el modelo de evaluación económica escenario 1

PLANTA DE TRATAMIENTO ANAEROBIO DE RESIDUOS ORGÁNICOS ESCENARIO 1		
ENTRADA	VALOR	UNIDAD
Rendimiento de CH ₄	0,1859	m ³ CH ₄ /Kg residuos
Generación de residuos sólidos orgánicos	40,00	Kg/día
Costos de operación y mantenimiento	2.500.000,00	COP/año
Precio del CH ₄ en el mercado (AÑO 0)	1.200,00 [47]	COP/m ³ de CH ₄
Inversión inicial	30.777.600,00	COP
Capacidad de producción de CH ₄	4639,88	m ³ CH ₄ /año

El escenario 1 tiene una inversión inicial mayor dado el uso de acero inoxidable en el tanque del digestor y su cúpula.

Tabla 17 Valor presente neto en Escenario 1

AÑO	1	2	3
Inversión inicial	\$30.777.600,00	\$0,00	\$0,00
Disminución de gastos			
CH ₄	\$3.354.677,04	\$3.455.317,35	\$3.558.976,87
Recolección de basuras	\$3.000.000,00	\$3.000.000,00	\$3.000.000,00
Egresos			
Costos de Mantenimiento	\$2.537.500,00	\$2.575.562,50	\$2.614.195,94

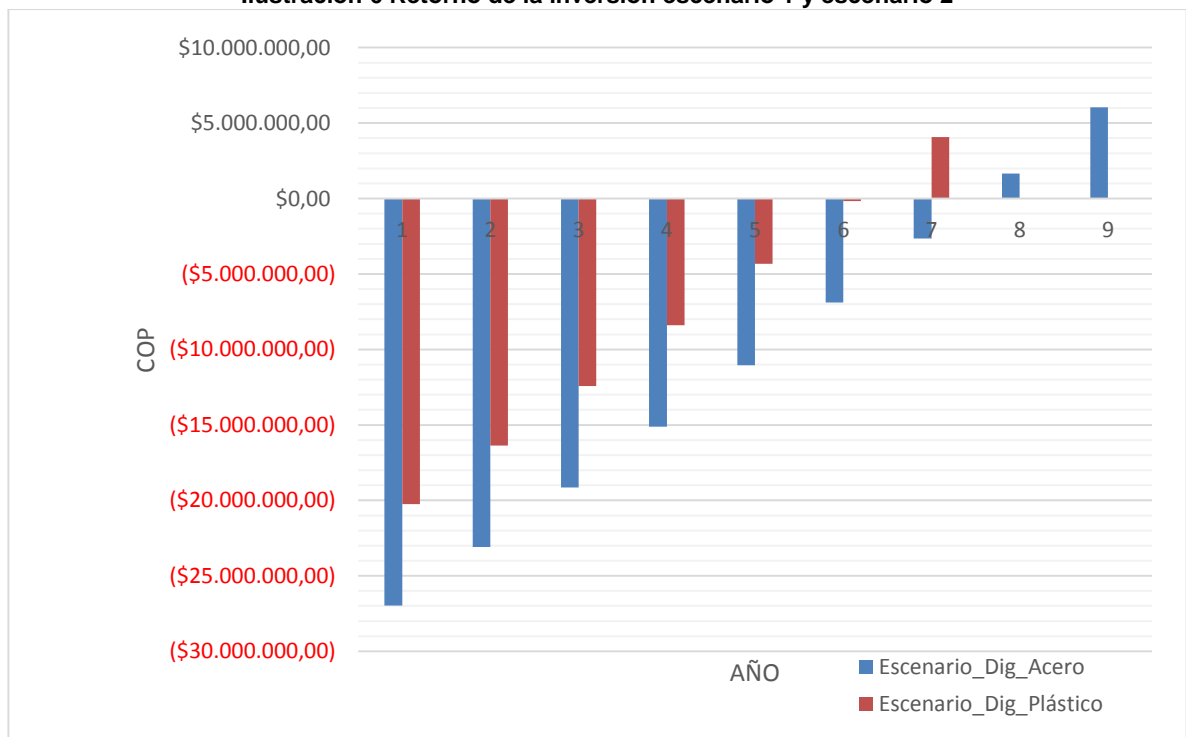
BALANCE	-\$26.960.422,96	-\$23.080.668,11	-\$19.135.887,17
AÑO	4	5	6
Inversión inicial	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Disminución de gastos			
CH4	\$3.665.746,18	\$3.775.718,56	\$3.888.990,12
Recolección de basuras	\$3.000.000,00	\$3.000.000,00	\$3.000.000,00
Egresos			
Costos de Mantenimiento	\$2.653.408,88	\$2.693.210,01	\$2.733.608,16
BALANCE	-\$15.123.549,87	-\$11.041.041,32	-\$6.885.659,36
AÑO	7	8	9
Inversión inicial	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Disminución de gastos			
CH4	\$4.005.659,82	\$4.125.829,62	\$4.249.604,51
Recolección de basuras	\$3.000.000,00	\$3.000.000,00	\$3.000.000,00
Egresos			
Costos de Mantenimiento	\$2.774.612,28	\$2.816.231,47	\$2.858.474,94
BALANCE	-\$2.654.611,82	\$1.654.986,33	\$6.046.115,90

Tabla 18 Valor presente neto Escenario 2

AÑO	1	2	3
Inversión inicial	\$24.057.600,00	\$0,00	\$0,00
Disminución de gastos			
CH4	\$3.354.677,04	\$3.455.317,35	\$3.558.976,87
Recolección de basuras	\$3.000.000,00	\$3.000.000,00	\$3.000.000,00
Egresos			
Costos de Mantenimiento	\$2.537.500,00	\$2.575.562,50	\$2.614.195,94
BALANCE	-\$20.240.422,96	-\$16.360.668,11	-\$12.415.887,17
AÑO	4	5	6
Inversión inicial	\$0,00	\$0,00	\$0,00

Disminución de gastos			
CH4	\$3.665.746,18	\$3.775.718,56	\$3.888.990,12
Recolección de basuras	\$3.000.000,00	\$3.000.000,00	\$3.000.000,00
Egresos			
Costos de Mantenimiento	\$2.653.408,88	\$2.693.210,01	\$2.733.608,16
BALANCE	-\$8.403.549,87	-\$4.321.041,32	-\$165.659,36
AÑO	7		
Inversión inicial	\$0,00		
Disminución de gastos			
CH4	\$4.005.659,82		
Recolección de basuras	\$3.000.000,00		
Egresos			
Costos de Mantenimiento	\$2.774.612,28		
BALANCE	\$4.065.388,18		

Ilustración 6 Retorno de la inversión escenario 1 y escenario 2



5.2.2.RESULTADOS DEL MODELO

El escenario 1 tuvo un tiempo de recuperación de la inversión de 8 años, el escenario 2 presentó un tiempo de recuperación de la inversión de 7 años.

Se debe resaltar que los costos totales de cada escenario fueron eximidos de pago de IVA teniendo en cuenta los artículos 424-5 numeral 4 y 428 literales “f” e “i” del Estatuto Tributario; que establece exención del pago del IVA para aquellos proyectos que reduzcan las emisiones de gases efecto invernadero.

6. CONCLUSIONES

- En la caracterización de los residuos se encontraron 10 componentes diferentes (cascaras y yemas de huevo, cebolla, papa, hojas de plátano, tomates, lechuga, cascaras de cítricos y huesos) utilizados como sustrato; de estos residuos se calculó la proporción C/N de tres formas diferentes y se determinó que la relación C/N que mejor se ajusta a la mezcla de residuos del presente estudio es de 45,5; se evidenció que el residuo que más aportó carbono a la mezcla son las hojas de plátano, ajustando la cantidad de este residuo la relación C/N estaría en el óptimo de 20 a 30. Se analizaron los datos de DBO_5/DQO que indican el índice de biodegradabilidad del sustrato.
- Asumiendo que las trampas de hidróxido de potasio KOH y óxido de hierro Fe_2O_3 aplicadas en el ensayo permitieron purificar el biogás producido y que está compuesto principalmente de metano, el potencial energético teórico del metano producido en el ensayo fue de $5,88 \times 10^{-3}$ Kwh para 2688 gramos de residuos sólidos urbanos de origen orgánico [28]. Si el proceso de optimiza y se logra una producción de metano como la presentada en estudios preliminares, el promedio diario de generación aumentaría a 12 m³ de metano (esperado para el digestor diseñado), y el potencial energético sería de 120 Kwh.
- A partir de los resultados de los parámetros de diseño del biodigestor se propone construir un digestor de 1,8 m³ para dar tratamiento a los residuos del restaurante que se eligió para el presente estudio; el digestor se diseñó para una capacidad de tratamiento 40 kg de residuos al día, sacando este valor de las encuestas aplicadas a los restaurantes.
- Se eligió la producción de metano por el buen precio que presenta en el mercado. Los modelos de factibilidad económica del proyecto arrojaron un periodo de retorno positivo en ambos casos; de 8 años para el escenario 1 con una inversión inicial de \$30.777.600,00 COP, y de 7 años para el escenario 2 con inversión inicial de \$24.057.600,00 COP.
- Se crearon herramientas para toma de decisiones que se anexan, las cuales consisten en:
 - Tabla en Excel con 3 formas de calcular la relación C/N para una mezcla de residuos sólidos orgánicos.
 - Tabla en Excel con los parámetros de diseño de la planta de tratamiento para residuos orgánicos urbanos.
 - Formato de encuesta para conocer los tipos de residuos, frecuencias de recolección, conocimiento en el aprovechamiento de los residuos entre otras características.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Merkley y R. Allen, «Pumps & System Curves,» de *Sprinkle and Trickle Irrigation*, Logan, Utah, Utah State University, 2004, p. 123.
- [2] Ph. D. Edgar F. Castillo Monroy, *Digestión anaerobia, una alternativa para el tratamiento de residuos solidos urbanos*, Santander : Centro de estudios e investigaciones ambientales , 2007.
- [3] ConvertWorld.com, «ConvertWorld.com,» 22 JULIO 2015. [En línea]. Available: <http://www.convertworld.com/es/presion/Metro+de+agua.html>. [Último acceso: 22 JULIO 2015].
- [4] B. Alcadía Mayor de Bogotá, «APORTES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA POLÍTICA BASURA CERO BOGOTÁ HUMANA,» BOGOTÁ, 2012.
- [5] BUN-CA, *Manuales sobre energia renovable: biomasa*, San Jose, Costa Rica, 2002.
- [6] L. Zheng, J. Song, C. Li, Y. Gao, P. GengBinni-Qu y L. Lin, «Preferential policies promote municipal solid waste (MSW) to energy in China: Current status and prospects,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 36, pp. 135-148, 2014.
- [7] W. Bogale y F. Viganò, «A preliminary comparative performance evaluation of highly efficient Waste-to-Energy plants,» *Energy Procedia*, nº 45, pp. 1315-1324, 2014.
- [8] Q. Aguilar-Virgen, P. Taboada-González, S. Ojeda-Benítez y S. Cruz-Sotelo, «Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in situ parameters,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 30, pp. 412-419, 2014.
- [9] M.-M. Vicente-Lemea, M.-H. Rochaa, E.-E. Silva-Loraa, O.-J. Venturini, B.-M. Lopes y C. H. Ferreira, «Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil,» *Resources, Conservation and Recycling*, nº 87, pp. 8-20, 2014.
- [10] Gladys Jaramillo Henao, Liliana María Zapata Márquez , «Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia,» Universidad de Antioquia, Medellin , 2008.
- [11] Gobierno Nacional, *Ley 1715 de 2014*, Bogotá D.C, 2014.
- [12] Endrigo Pereira Lima, «Planes y tecnicas de muestreo,» Pelotas, Brasil , 2006.

- [13] V. Nallathambi Gunaseelan, «Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks,» *Biomass and Bioenergy*, nº 26, pp. 389-399, 2004.
- [14] E. Castillo Monroy, M. Vergara Mendoza, D. Critancho Blanco, L. Arenas Beltrán, A. Martínez González, M. Hernández Pardo, H. Luna Wandurraga, J. Castillo Arguelles y C. Sandoval Lozano, «ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO A ESCALA LABORATORIO PARA LA METANIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA,» de *DIGESTIÓN ANAEROBIA: UNA ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS*, Bucaramanga, 2007, pp. 82-83.
- [15] Elena Campos Pozuelo, Xavier Flotats i Ripoll, August Bonmatí i Blasi, «Biogás y aprovechamiento de la biomasa,» Universitat de Lleida, Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Catalunya, 2012.
- [16] Bernardo Campos Cuni, «Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector corporativo y campesino,» *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 20 , nº 2, pp. 37-41, 2011.
- [17] Sonia Raquel Duarte Cely, «Estudio de factibilidad técnico-económica y ambiental para el aprovechamiento del biogás producido en el tratamiento de efluente de las plantas extractoras de aceite de palma de la zona de puerto wilches,» Universidad Industrial de Santander , Bucaramanga, 2006.
- [18] Luis Alfredo Hernández, «Tecnologías para el aprovechamiento del gas producido por la digestión anaeróbica de la materia orgánica,» *Agronomía Colombiana*, vol. 13, nº 1, pp. 76-90, 1996.
- [19] bogotacompra.com, «bogotacompra.com,» 14 07 2015. [En línea]. Available: <http://www.bogotacompra.com/Bogota/usaquen-c507.html>. [Último acceso: 14 07 2015].
- [20] P. Fernandez, «fisterra.com,» Unidad de epidemiología Clínica y Estadística, [En línea]. Available: http://www.fisterra.com/mbe/investiga/9muestras/tamano_muestral2.pdf. [Último acceso: 14 Julio 2015].
- [21] E. Pereira Lima, «Planos e Técnicas de amostragem,» de *Disciplina de Amostragem de Águas e Resíduos* , Pelotas, Brasil, 2006, pp. 16-18.
- [22] E. INTERNATIONAL, «Anaerobic Digester PDAN,» Madrid, 2011.

- [23] Y. Olaya y L. González, *Fundamentos para el diseño de Biodigestores*, U. N. d. Colombia, Ed., Palmira, 2009.
- [24] C. Tobias Marino, B. Hector, P. H. Mazza Rodrigues, L. M. Oliveira Borgatti, P. Marques Meyes, E. J. Alves da Silva y E. R. Ørskov, «Characterization of vegetables and fruits potential as ruminant feed by in vitro gas production technique,» *Livestock Research for Rural Development*, nº 22, pp. 1-10, 2010.
- [25] «Potencial de biogás de residuos de frutas y verduras provenientes de restaurantes de Palmira,» *Acta agronómica*, nº Número especial, pp. 97-98, 2012.
- [26] M. Ramírez, *VIABILIDAD DE UN PROCESO PARA LA ELIMINACIÓN CONJUNTA DE H₂S Y NH₃ CONTENIDO EN EFLUENTES GASEOSOS*, Cádiz, 2007.
- [27] netquest.com, «netquest.com,» [En línea]. Available: <http://www.netquest.com/blog/es/que-tamano-de-muestra-necesito/>. [Último acceso: 12 03 2015].
- [28] FAO, MinEnergía, PNUD, GEF, «Manual de Biogás,» Santiago de Chile, 2011.
- [29] Ana Nielfa, Raul Cano, Marc Vinot, Eduardo Fernández, Maria Fdz-Polanco, «Anaerobic digestion modeling of the main components of organic fraction of municipal solid waste,» *El Sevier*, nº 94, pp. 180-187, 2015.
- [30] Sphia Ghanimeh, Mutasem El Fadel, Pascal Saikaly, «Mixing effect on thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste,» *El sevier*, nº 117, pp. 63-71, 2012.
- [31] Reyna I. Rodríguez-Pimentel, Suyen Rodríguez-Pérez, Oscar Monroy-Hermosillo and Florina Ramírez-Vives, «Effect of organic loading rate on the performance of two-stage anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste,» *Water Science and Technology*, nº 72.3 , pp. 384-390, 2015.
- [32] Abdelhadi Makan, Mohammed Mountadar, «Effect of C/N ration on the in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco,» *J Mater Cycles Waste Manag* , nº 14, pp. 241-249, 2012.
- [33] Muhammad Khalid Iqbal, Tahira Shafiq, Khurshed Ahmed , «Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost,» *El Sevier* , nº 101, pp. 1913-1919, 2010.
- [34] Musa I. Tanimu, Tinia I. Mohd Ghazi, Razif M. Harun y Azni Idris, «Effect of carbon to nitrogen ratio of food waste on biogas methane production in a batch mesophilic

anaerobic digester,» *International Journal of Innovation Management and Technology* , vol. 5, nº 2, pp. 116-119, 2014.

- [35] S. Grobas y G.G. Mateos, *Influencia de la nutrición sobre la composición nutricional del huevo*, Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid , 1996.
- [36] Sonia Liliana Pertuz Cruz , *La papa, composición química y valor nutricional del tubérculo*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- [37] Mileydi Machado Mancilla , «Plantamiento de un proceso para la conservación de la cebolla junca mediante el metodo de deshidratación gravimetrica,» Universidad Tecnologica de Pereira , Pereira , 2012.
- [38] Jose Pablo Morales , *Cultivo de cilantro, cilantro ancho y perejil*, Santo domingo: Fundación de desarrollo agropecuario , 1995.
- [39] José Neptali Hernández Yépez , «Caracterización fisicoquímica y microbiológica del tomate margariteño y evaluación de la efectividad en tratamientos de pre-ensado para el incremento de su vida comercial a temperatura ambiente,» Universidad de Córdoba, España , 2013.
- [40] Nérida Granval de Millán y Julio César Gaviola , *Manual de producción de semillas hortícolas*.
- [41] Hugo Bernal Barragán , «Desarrollo de tecnologías para la elaboración de nuevos alimentos para ganado con base en pulpa deshidratada de cítricos en la región centro de nuevo león,» Universidad Autonoma de Nuevo León , Monterrey, Mexico , 2014.
- [42] Diana M. Granda, Amanda I. Mejía y Gloria A. Jiménez, «Utilización de residuos de plátano para la producción de metabolitos secundarios por fermentación de estado sólido con el hongo,» *Vitae* , vol. 12, nº 2, pp. 13-20, 2005.
- [43] Nelson Fernando Ramos Carrillo , «Aprovechamiento del desecho de huesos de res para la obtención de harina de hueso en la fabrica federer,» Escuela Politécnica Nacional , Quito, Ecuador , 2010.
- [44] A. Nielfa, R. Cano y M. Fernández Polanco, «Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge,» *Biotechnology Reports*, vol. 5, pp. 14-21, 2015.
- [45] W. Mosos, L. Cadavid y A. Agudelo, «Potencial de biogás de residuos de frutas y verduras provenientes de restaurantes de Palmira,» *Acta Agronómica*, 2012.

- [46] N. Pisutpaisal, C. Nathaoa y U. Sirisukpokac, «Biological Hydrogen and Methane Production in from Food Waste in Two-stage CSTR,» *ENERGY PROCEDIA*, vol. 50, pp. 719-722, 2014.
- [47] UPME, «PROYECCIONES DE PRECIOS DE LOS ENERGÉTICOS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA ENERO 2014-DICIEMBRE 2037,» Bogotá, 2014.
- [48] L. Gómez, «Luego de dos años, polémico modelo de aseo de Bogotá debe desmontarse,» *El Tiempo*, 04 09 2014.
- [49] «servinformacion.com,» [En línea]. Available: <http://www.finanzaspersonales.com.co/ahorro-e-inversion/articulo/cuantos-clientes-corresponden-negocio/48439>. [Último acceso: 26 Febrero 2014].
- [50] N. Curry y P. Pillay, «Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment,» *Renewable Energy*, nº 41, pp. 200-2009, 2012.
- [51] M. Silva y T. Naik, *Review of composting and anaerobic digestion of municipal solid waste*, Milwaukee,, Wisconsin, 2008.
- [52] CALRECYCLE, «BIOPLASTICS IN CALIFORNIA: ECONOMIC ASSESSMENT OF MARKET CONDITIONS FOR PHA/PHB BIOPLASTICS PRODUCED FROM WASTE METHANE,» SACRAMENTO, 2013.
- [53] Otoniel BUENROSTRO, Silke CRAM, Gerardo BERNACHE y Gerardo BOCCO , «La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales,» *Contaminación Ambiental*, vol. 16, nº 1, pp. 19-26, 2000.
- [54] Luis Alfredo Hernández A. , «Tecnologías para el aprovechamiento del gas producido por la digestión anaerobica de la materia organica.,» *Agronomía colombiana*, vol. 3, nº 1, pp. 76-90, 1996 .
- [55] Universidad Nacional De Colombia, «<http://www.virtual.unal.edu.co/>,» [En línea]. Available: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000352/html/un1/cont_102-02.html. [Último acceso: 10 04 2014].
- [56] postconsumers.com, «postconsumers.com,» [En línea]. Available: <https://www.postconsumers.com/education/how-long-does-it-take-a-plastic-bottle-to-biodegrade/>. [Último acceso: 04 03 2014].
- [57] L. Shen, J. Haufe y M. K. Patel, «Product overview and market projection of emerging bio-based plastics,» Utrecht, 2009.

- [58] N. O. a. A. A. NOAA, «noaa.org,» 07 Febrero 2013. [En línea]. Available: <http://response.restoration.noaa.gov/about/media/how-big-great-pacific-garbage-patch-science-vs-myth.html>. [Último acceso: 06 Marzo 2014].
- [59] W. F. Owen, D. Stuckey, J. Healy Jr, L. Y. Young y P. L. McCarty, «Bioassay For Monitoring Biochemical Methane Potential And Anaerobic Toxicity,» *Water Reasearch*, vol. 13, pp. 485-492, 1979.
- [60] M. Eeghen, « The preparation and use of compost,» 1983.
- [61] U. D. P. M. ENERGÉTICA, «GUÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS,» Bogotá, D.C., 2003.

8. ANEXOS

1. ENCUESTA



EVALUACIÓN PARA CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS GENERADOS EN RESTAURANTES

INFORMACIÓN SOBRE EL PROYECTO: Cordial saludo, por medio de esta encuesta se busca obtener información sobre los residuos orgánicos generados en restaurantes de una localidad de Usaquén. Una vez concluidas las encuestas programadas se obtendrá una caracterización previa al muestreo que se pretende hacer de este tipo de residuos. El objetivo final de este estudio es analizar el potencial energético de los residuos orgánicos generados en restaurantes de Usaquén en Bogotá que no realicen ningún tratamiento.

1 UBICACIÓN *ESTA INFORMACIÓN LA DILIGENCIA EL ENTREVISTADOR UNA VEZ FIRMADO EL CONSENTIMIENTO INFORMADO*

1.1 Encuesta No. 1.2 Fecha:
 DIA MES AÑO

1.3 Localización:
 1.3.1 Barrio en que se ubica el restaurante: _____
 1.3.2 Dirección _____
 1.3.3 Estrato:

2 INFORMACIÓN GENERAL

2.1 Nombre de quién responde: _____ 2.2 Edad
 2.3 Genero: M F 2.4 Lugar de Nacimiento: _____
 2.6 Tiempo trabajando dentro del restaurante: _____ 2.7 Cargo que ocupa dentro del restaurante: _____
 <1 año 2 a 5 años >6 años

3 INFORMACIÓN SOBRE LOS RESIDUOS GENERADOS

3.1 ¿Hace algún tipo de separación en sus residuos?
 1 Ninguna
 2 Biodegradables y no biodegradables
 3 Ordinarios Biodegradables y Reciclables
 4 Otros ¿Cuales? _____

3.3 ¿Con que frecuencia saca residuos biodegradables para su recolección?
 1 1 vez / Día
 2 1 veces / Semana
 3 1 veces / Semana
 4 1 veces / Semana
 5 2 veces / Semana
 6 1 vez / Semana
 7 1 veces / Mes
 8 1 vez / Mes
 9 Otra, ¿Cuál? _____

3.3.1 Que cantidad de residuos se generan

Bolsa grande	<input type="text"/> 1	¿Cuántas? _____
Bolsa mediana	<input type="text"/> 2	¿Cuántas? _____
Bolsa pequeña	<input type="text"/> 3	¿Cuántas? _____

3.4 ¿Como describiría los residuos que se generan en el restaurante?

	Minimo	Medio	Máximo
3.3.1 ACEITES Y GRASAS	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.2 CASCARAS DE PLATANO	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.3 CASCARAS DE PAPA	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.4 RESTOS DE FRUTAS	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.5 RESTOS DE CARNES	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.6 SEMILLAS	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.7 ARROZ	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.8 HUESOS	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.9 SALSAS	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.10 RESTOS DE HORTALIZAS	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.11 RESTOS DE VERDURAS	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.12 CASCARAS DE NARANJA LIMÓN Y CITRICOS	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.13 LACTEOS	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.14 CASCARAS DE HUEVO	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.18 BARRIDO	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3
3.3.19 OTRO ¿Cuál?	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 3

5 SENSIBILIZACIÓN

5.1 ¿Sabe que uso se les puede dar a los residuos biodegradables?
 No Si ¿Cuál(es)? _____

5.2 ¿Cree usted que los alimentos que consumen pueden tener algún tipo de contaminante?
 No Si ¿Cuál(es)? _____

5.3 ¿Utiliza usted alguna sustancia para el tratamiento de sus residuos?
 No Si ¿Cuál(es)? _____

5.4 ¿Le gustaría implementar algún tratamiento que genere un valor agregado a sus residuos biodegradables?
 No Si ¿Cuál(es)? _____

6 CIERRE DEL CUESTIONARIO

6.1 ¿Les interesaría ser informados sobre los resultados de este estudio en un futuro?
 e-mail: _____

6.2 OBSERVACIONES: _____ Telefono: _____

Firma del participante _____ Nombre del encuestador _____

2. ELECCIÓN DEL RESTAURANTE QUE FUE MUESTREADO

Los datos recogidos en la encuesta fueron llevados a una tabla y se encontró el promedio de cada variable trabajada. Finalmente se seleccionó el restaurante que mejor representaba el promedio general dados sus resultados en la encuesta.

Tabla 19 Resultados encuesta de caracterización preliminar

1.3.1.2	3.3.1	3.3.2	3.3.3	3.3.4	3.3.5	3.3.6	3.3.7	3.3.8	3.3.9	3.3.10	3.3.11	3.3.12	3.3.13	3.3.14	3.3.15	COINCIDENCIAS
Il Porto	1	2	3	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	
RELACION	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	10
Casa vieja	2	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	
RELACION	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	6
La Biforia	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	
RELACION	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	10
80 Silas	2	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	3	1	2	1	
RELACION	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	9
Hamburguesería Usaquen	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	
RELACION	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	9
Entre Cuates	1	1	1	1	3	1	1	2	2	3	3	3	1	1	1	
RELACION	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	7
Oliveto Pizza	2	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	2	1	1	2	
RELACION	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	10
Koi	3	1	2	1	1	1	2	1	1	2	2	3	1	3	1	
RELACION	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	9
Archies	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	3	1	1	2	
RELACION	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	8
Restaurante Bar Tienda de Café	2	2	2	3	1	1	1	1	2	2	2	3	1	1	2	
RELACION	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	12
Mr. Ribs	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	
RELACION	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	9
El Mercado	1	3	1	2	1	1	1	1	1	3	3	3	1	2	3	
RELACION	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	5
Wingz	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	
RELACION	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	7
Kathmandu	2	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	1	3	
RELACION	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	11
Il Pomodoro	2	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	1	1	1	2	
RELACION	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	11
PROMEDIO	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	

3. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Materiales y equipo necesario:

- Filtros con diámetro de poro de 0.45 µm
- Balanza analítica
- Matraz de filtración de 1 L
- Embudos de filtración
- Desecador de vidrio
- Pipeta de 50 ml
- Estufa con rango de temperatura entre 0° y 250° Celsius.

Procedimiento:

- ✓ Introducir el filtro en la estufa por una hora a una temperatura de 105° Celsius.
- ✓ Ubicar el filtro sobre el desecador, y pesar en la balanza analítica (previamente calibrada), este peso será (P_0).
- ✓ Acoplar el filtro en el equipo de filtración, y hacer pasar 50 ml de muestra a través de él.
- ✓ Una vez filtrado, se debe introducir el filtro en la estufa, y dejar allí por una hora a 105° Celsius.
- ✓ Finalmente se deja enfriar en el desecador por 30 minutos, para que no absorba humedad, y pesar en la báscula para encontrar lo que será (P_1).

El contenido de SST fue la diferencia pesada entre el filtro vacío (P_0), y el filtro con el filtrado seco (P_1). Dividiendo este valor por el volumen de la muestra, se obtuvo el valor de sólidos suspendidos totales en ppm.

4. PRUEBA DE CENIZAS

Materiales y equipo necesario:

- Filtros con material filtrado (SST)
- Balanza analítica
- Crisol
- Matraz de filtración de 1 L
- Embudos de filtración
- Desecador de vidrio
- Mufla con rango de temperatura entre 0° y 600° Celsius o superior.

Procedimiento:

- ✓ Pesar el crisol con el material filtrado (SST) para obtener (P_0).
- ✓ Introducir el crisol con el material filtrado (SST) en la mufla por una hora a una temperatura de 550° Celsius.
- ✓ Introducir el crisol en el desecador por 30 minutos para dejar enfriar, sin que absorba humedad.
- ✓ Pesar el crisol (P_1).

La diferencia entre P_1 y P_0 , fue el valor de cenizas.