

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK**

**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES**

**Plan de Investigación de fin de carrera titulado:**

**“Ensayos Operativos en un biodigestor tipo batch alimentado por RSU producidos en el  
DMQ 2015”**

**Realizado por:**

**JOSELINE IVONNE PAZMIÑO MONGE**

**Director del proyecto:**

**JORGE ESTEBAN OVIEDO**

**Como requisito para la obtención del título de:**

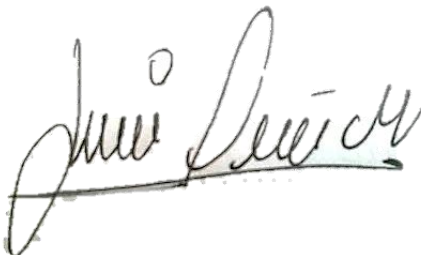
**INGENIERA AMBIENTAL**

**2014-2015**

## **DECLARACION JURAMENTADA**

Yo, JOSELINE PAZMIÑO MONGE, con cédula de identidad # 171711156-9, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Josline Pazmiño Monge', written over a horizontal line.

Josline Ivonne Pazmiño Monge

171711156-9

# **DECLARATORIA**

El presente trabajo de investigación titulado:

**“ENSAYOS OPERATIVOS EN UN BIODIGESTOR TIPO BATCH  
ALIMENTADO POR RSU PRODUCIDOS EN EL DMQ 2015”**

Realizado por:

**JOSELINE IVONNE PAZMIÑO MONGE**

como Requisito para la Obtención del Título de:

**INGENIERA AMBIENTAL**

ha sido dirigido por el profesor

**JORGE ESTEBAN OVIEDO COSTALES**

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



Jorge Esteban Oviedo Costales

**DIRECTOR**

## **LOS PROFESORES INFORMANTES**

Los Profesores Informantes:

**KATTY CORAL**

**MAGDALENA DÍAZ**

Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador



**Katty Coral**



**Magdalena Díaz**

Quito, 15 de Julio del 2015

## **DEDICATORIA**

A mi madre Nadia Isabel Monge Oviedo, ya que ha sido el incentivo de cada día para finalizar esta etapa de mi vida, por siempre brindarme su dedicación, su apoyo y su amor puro, infinito e incondicional. Es y será un pilar fundamental para el cumplimiento de mis sueños y quiero enfatizar una especial dedicación de este logro a ella.

Y aquellas personas que han dado un sentido más a mi existencia por su confianza, amor y amistad incondicional.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar quiero expresar mi agradecimiento a Dios por darme la oportunidad de vivir y concluir una de las muchas fases de la vida.

A Esteban Oviedo, Katty Coral y Magdalena Díaz, por sus valiosas aportaciones y la guía que me han brindado a lo largo de este proyecto de investigación; su profesionalismo no se compara a su inmensa calidad humana, muchas gracias por haber confiado en mí y también por darme un buen ejemplo a seguir.

A mi tía Sandra Monge, por su apoyo en todos los momentos de mi vida y enseñarme que los problemas si pueden ser enfrentados.

## ÍNDICE GENERAL DEL CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	10
1.1. Descripción del tema a desarrollar .....	10
1.2. Antecedentes .....	11
1.3 Importancia del Estudio.....	13
1.4. Objetivo General .....	14
1.5. Objetivos Específicos .....	14
1.6 Características del sitio del proyecto.....	14
MARCO TEÓRICO .....	16
2.1. Estudios Previos .....	16
2.1.1. Procesos de biodigestión .....	16
2.1.2 Factores determinantes en el proceso metanogénico (producción de biogás).....	21
2.1.2.1. Ubicación del sistema de biodigestión .....	21
2.1.2.2. Cantidad de desecho disponible .....	21
2.1.2.3. Naturaleza y composición bioquímica de materias primas .....	21
2.1.2.4. Relación carbono Nitrógeno.....	23
2.1.2.5. Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles .....	25
2.1.2.6. Potencial redox .....	25
2.1.2.7. Tiempo de retención hidráulico (TRH) .....	25
2.1.2.8. Nutrientes .....	26
2.1.2.9. Tóxicos e Inhibidores .....	26
2.1.2.10. Agitación - Mezclado .....	30
2.1.2.11. Promotores de la metanogénesis (inoculantes biológicos) .....	31
2.1.3. Subproductos de la Digestión anaerobia .....	31
2.1.3.1. Biogás.....	31
2.1.3.2. Biofertilizante .....	34
2.1.4. Cuantificación del metano.....	34
2.1.5. Investigación Universidad Internacional SEK .....	35
2.2. Marco conceptual .....	36
2.2.1. Temperatura.....	36
2.2.2. pH.....	38
2.2.3. Digestor discontinuo.....	42
2.2.4. Metano.....	44
METODOLOGÍA .....	46
3.1. Tamaño de la muestra.....	46

3.2. Procedimiento.....	48
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	53
4.1. Levantamiento de datos.....	53
4.1.1. Densidad.....	53
4.1.2. Volumen.....	53
4.1.3. Sólidos totales.....	54
4.1.4. Sólidos Volátiles.....	55
4.1.5. Nutrientes.....	56
4.1.6. Relación Carbono Nitrógeno.....	57
4.2. Presentación de Resultados.....	57
4.2.1. Temperatura.....	57
4.2.2. Potencial Hidrógeno.....	62
4.2.3. Presión.....	67
4.2.4. Crecimiento bacteriano.....	70
4.2.5. Protocolo de uso del biodigestor.....	72
4.2.5.1. Preparación del equipo.....	72
4.2.5.2. Preparación de la carga.....	73
4.2.5.4. Puesta en marcha.....	77
4.2.5.5. Cuantificación de los Productos.....	78
4.2.5.6. Mantenimiento del biodigestor.....	78
4.2.5.7. Procedimientos de seguridad.....	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
5.1. Conclusiones.....	80
5.2. Recomendaciones.....	81
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXOS.....	86



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales ácidos grasos generados durante la digestión.....	19
Tabla 2. Clasificación de las metanobacterias .....	20
Tabla 3. Composición química de diversos residuos de origen animal y vegetal (valores promedios, base seca).....	22
Tabla 4. Clasificación de sustratos para la digestión Anaeróbica .....	22
Tabla 5. Producción de biogás a partir de residuos vegetales .....	23
Tabla 6. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural. ....	24
Tabla 7. Concentración Inhibidora de sustancias comunes.....	27
Tabla 8. Concentración de amoníaco y su efecto en el proceso de digestión anaeróbica .....	29
Tabla 9. Concentración de compuestos orgánicos que reducen la producción de gas en un 50%.....	30
Tabla 10. Características Generales del Biogás .....	32
Tabla 11. Valores medios de los componentes del biogás en función de los sustratos. ....	32
Tabla 12. Aplicaciones que puede tener el biogás .....	32
Tabla 13. Tratamiento según el uso final de biogás. (0= no tratamiento, 1= tratamiento parcial, 2= tratamiento elevado).....	33
Tabla 14. Rangos de temperatura según el tipo de bacterias .....	36
Tabla 15. Rangos de temperaturas y el tiempo de retención.....	37
Tabla 16. Rangos óptimos de pH para los diferentes microorganismos .....	39
Tabla 17. Producción de metano en residuos de frutas y vegetales (rango mesofílico 35°C) .....	45
Tabla 18. Porcentaje de humedad en residuos en la Primera Carga .....	54
Tabla 19. Porcentaje de humedad en residuos en la segunda carga.....	54
Tabla 20. Porcentaje de Sólidos Orgánicos Totales Primera Carga.....	55
Tabla 21. Porcentaje de Sólidos Orgánicos Totales Segunda Carga.....	55
Tabla 22. Concentración inhibitoria de algunas sustancias contenidas en el biodigestor.....	56
Tabla 23. Relación Carbono- Nitrógeno de la materia introducida en el biodigestor.....	57
Tabla 24. Temperatura en el interior del biodigestor en la primera carga .....	58
Tabla 25. Temperatura en el interior del biodigestor en la segunda carga.....	60
Tabla 26. Potencial Hidrógeno en el interior del biodigestor en la Primera carga .....	62
Tabla 27. Potencial Hidrógeno en el interior del biodigestor en la segunda carga.....	66
Tabla 28. Prueba en la muestra de lixiviado del cambio sufrido del Potencial Hidrógeno vs Lechada .....	64
Tabla 29. Prueba en el biodigestor del cambio sufrido del Potencial Hidrógeno vs Lechada .....	65
Tabla 30. Valores de Presión registrados en la primera carga .....	67
Tabla 31. Valores de Presión registrados en la segunda carga.....	68
Tabla 32. Producción de residuos humanos y animales (Estimado) .....	73
Tabla 33. Velocidad de generación de gas a partir de materiales de uso común .....	73
Tabla 34. Muestra de la producción de KWh por m3 de biogás.....	73
Tabla 35. Efecto del tamaño de partícula sobre el proceso metanogénico .....	74
Tabla 36. Frutas y vegetales con alto contenido de potasio .....	88
Tabla 37. Alimentos con alto contenido de Calcio .....	88

Tabla 38. Alimentos con alto contenido de Magnesio .....	89
Tabla 39. Alimentos con alto contenido de Zinc .....	89

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Densidad .....	46
Ecuación 2. Volumen de un Cilindro .....	47
Ecuación 3. Cálculo del volumen del biodigestor .....	47
Ecuación 4. Volumen del gasómetro .....	48
Ecuación 5. Volumen Real del Digestor .....	48
Ecuación 6. Cálculo del Porcentaje de Humedad % .....	50
Ecuación 7. Cálculo del porcentaje de Sólidos Orgánicos Totales .....	50

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Eliminación de sólidos volátiles, SV(%) y producción volumétrica de gas Pv (m <sup>3</sup> biogás/m <sup>3</sup> dig-día) para un reactor anaerobio continuo de mezcla completa, en función del tiempo de retención hidráulica. ....	26
Gráfico 2. Dependencia de la constante de crecimiento de la temperatura.....	36
Gráfico 3. Dependencia del pH de la actividad metanogénica .....	39
Gráfico 4. Diagrama de diseño para alcalinidad .....	41
Gráfico 5. Incremento de la Temperatura Interna del reactor en la Primera Carga .....	61
Gráfico 6. Potencial Hidrógeno dentro del Biodigestor en la primera carga .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos .....	17
Figura 2. Actividad celular de una Bacteria formadora de Ácido.....	18
Figura 3. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía .....	34
Figura 4. Producción de gas en función del tiempo de un sistema Batch de 4 reactores.....	43
Figura 5. Biodigestor Discontinuo o Batch .....	43
Figura 6. Origen del metano.....	44
Figura 7. Concentración de algunas sustancias contenidas en el biodigestor en la Primera Carga .....	86
Figura 8. Concentración de algunas sustancias contenidas en el biodigestor en la Segunda Carga .....	86
Figura 9. Preparación de carga .....	76

## RESUMEN

La problemática de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) representa un reto importante para nuestra sociedad, de tal manera que se debe proponer nuevas alternativas de tratamiento en función de las necesidades de cada comunidad. En el presente proyecto de investigación, se propone la utilización de los desechos orgánicos provenientes del Distrito Metropolitano de Quito, como materia prima para la producción de metano, a través del desarrollo de un proceso anaeróbico en un biodigestor tipo batch. Esta es una alternativa energética que podría favorecer a la población de la ciudad.

Los parámetros de muestreo más importantes dentro de la degradación eran, la producción de metano y las diferentes fluctuaciones de pH, presión y temperatura que se produjeron, estos fueron medidos con el fin de asegurar la eficiencia en el sistema.

La información de dichos ensayos constituye un aporte al conocimiento actual del tema, y de igual manera facilita la replicabilidad de futuros ensayos que se realicen para tratar de incluir a la Biometanización en el sistema de gestión de residuos sólidos urbanos de la ciudad.

Palabras clave: biometanización, residuos sólidos urbanos, metano, degradación, anaeróbico

## ABSTRACT

The issue of Municipal Solid Waste (MSW) is a major challenge for our society, so it should propose new treatment alternatives based on the needs of each community. In this research project, the use of organic waste from the Metropolitan District of Quito, as raw material for the production of methane, through the development of an anaerobic process in a batch digester type is proposed. This is an energy alternative that could favor the population of the city.

The most important parameters sampling within degradation were, methane production and different pH fluctuations, pressure and temperature that occurred, these were measured in order to ensure efficiency in the system.

The information from these tests is a contribution to the current knowledge of the subject, and likewise facilitates replication of future trials conducted to try to include the Biometanización in the system of solid waste management in the city.

Keywords: biomethanation, municipal solid waste, methane, degradation, anaerobic

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Descripción del tema a desarrollar

En los inicios de la civilización, el impacto del ser humano sobre la naturaleza fue limitado a intervenciones en pequeñas escalas, los miembros de las comunidades primitivas vivieron integrados al medio natural, y de él obtenían solo lo indispensable para cubrir sus necesidades. Los desechos generados entonces, eran fácilmente asimilados por la naturaleza, ya fuera por las cantidades generadas, como por la composición química de los mismos (UNIDO, 2007).

Posterior a la Revolución Industrial, los matices de esta situación comenzaron a cambiar y actualmente alcanzan cifras verdaderamente alarmantes. El rápido aumento de la población; la complejidad de los diferentes entornos urbanos en las grandes metrópolis, y el descubrimiento de nuevas formas de combinar las sustancias, para la elaboración de otras más difíciles de degradar, han pasado de novedades científicas a verdaderos problemas de contaminación ambiental (UNIDO, 2007).

Como consecuencia de las acciones anteriormente mencionadas, la acumulación de residuos no asimilables por la naturaleza crece incontroladamente; el vertiginoso desarrollo económico y el incremento incontrolado de los niveles de consumo, han propuesto la urgente búsqueda de soluciones a este inconveniente. La sociedad ya no puede ignorar un problema que, si bien empezó por dañar la salubridad urbana, en pocos decenios acabó por afectar diferentes componentes del medio ambiente (Rodríguez, 2014).

En el caso del DMQ, el manejo de los residuos sólidos urbanos ha provocado una disminución progresiva de los espacios físicos destinados a rellenos sanitarios, y la consiguiente acumulación de residuos sólidos, afectando de tal manera a los recursos suelo, fuentes hídricas y aire, los cuales son deteriorados por la formación de gases y líquidos lixiviados, quemas y humos, polvo y olores nauseabundos, además también que incide directamente en la degradación del paisaje (Hernández, 2014).

Esta condición que no solamente se produce a nivel del Ecuador, ha provocado que tanto a nivel nacional como internacional, el manejo sustentable de residuos alcance mayor interés, generándose nuevas ideas y procesos, los cuales persiguen la disminución de su generación y valorización. Estas condiciones hacen que sea necesario lograr una gestión sustentable que prevenga los potenciales impactos que causa la generación y manejo incorrecto de los residuos (Secretaría de Ambiente, 2014).

Una alternativa para favorecer dicho propósito es la digestión anaerobia, o biodigestión, es una tecnología en la que los residuos orgánicos son convertidos en productos aprovechables como el biogás (energía renovable) y biol (fertilizante

natural), lo cual permite una mejor gestión sostenible de los residuos orgánicos, tanto desde el punto de vista medioambiental, como social y económico. (Ortega, 2006, p.3) Estudios indican que 30 millones de toneladas de CH<sub>4</sub> son generadas anualmente por diferentes sistemas de producción animal y desechos orgánicos. Estas emisiones pueden minimizarse a aproximadamente 13.24 millones de toneladas de CH<sub>4</sub> al año con la aplicación de este sistema de digestión (Laines, Sosa, Cámara, Sánchez & Ferreiro, 2011).

Además de evitar estos efectos, este proceso genera un aprovechamiento de los residuos producidos, lo cual ayudaría a la reducción de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEIs), no sólo por la mencionada minimización de las emisiones de gases de fermentación, sino también por la realización del aprovechamiento de fuentes energéticas diferentes a las derivadas de combustibles fósiles. Así pues, el planteamiento de utilizar los residuos como una fuente energética (renovable), supone aprovechar un recurso que, de otro modo, se perdería (Agencia Andaluza de la Energía, 2011).

Como se puede evidenciar la digestión anaerobia trae varias ventajas y es por ello que, la utilización de residuos orgánicos para este fin está comenzando a crecer en los últimos años, lo que representa una oportunidad para aquellos municipios que no cuentan con rellenos sanitarios o que, si los tienen, no están aprovechando el gas para generar electricidad. Es importante mencionar que, en la actualidad en el relleno sanitario del Distrito no existe un sistema de captación y tratamiento del biogás, por lo que se debe tomar en cuenta dicho sistema, el mismo que contribuiría a impulsar el desarrollo económico sostenido y a proporcionar una fuente energética renovable (Rodríguez, 2014).

Teniendo en cuenta este argumento, el presente trabajo de investigación analizó y determinó la factibilidad técnica, para poder llevar a cabo la digestión anaerobia con los residuos orgánicos provenientes del Distrito Metropolitano de Quito, ya que esta técnica es inexistente en el escenario descrito. Para dicho objetivo, se tiene que analizar y determinar la cantidad y calidad del biogás que se puede obtener con los residuos sólidos orgánicos de la ciudad, esta práctica se realizará a través de la operación de un biodigestor tipo Batch, en donde se controlaran todos los parámetros implicados en esta fermentación metanogénica.

De esta manera se podrá determinar si los residuos sólidos orgánicos generados cumplen con las características necesarias para la producción de biogás. En este contexto, es necesario contar con información acerca del proceso, para de esta manera lograr dar un gran paso en el cambio de la forma tradicional de manejar los residuos.

## **1.2. Antecedentes**

La biodigestión anaerobia, es una de las soluciones para el tratamiento de los residuos orgánicos y una fuente de energía renovable desde ya varias décadas atrás. En el año 1890 se construye el primer biodigestor a escala real en la India, y desde este surgimiento se han inventado y probado varios modelos de plantas de biogás, esto con el objetivo de aumentar la eficiencia y bajar los costos de los mismos; ya en 1896 en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad (Arce, 2011).

Transcurriendo el tiempo, ya en todo el mundo se difunden los denominados tanques Imhoff para el tratamiento de aguas cloacales colectivas. El gas producido se lo utilizó para el

funcionamiento de las propias plantas, en vehículos municipales y en algunas ciudades se lo llevo hasta inyectar en la red de gas comunal, por tal motivo, durante los años de la Segunda Guerra Mundial se comienza la propagación de los biodigestores a nivel rural tanto en Europa como en China e India, los cuales se transformaron en líderes de la materia (Hilbert, S.F).

Esta difusión se ve interrumpida por el fácil acceso a los combustibles fósiles, y recién en la crisis energética de la década de los años 70, se reinicia con gran ímpetu la investigación y extensión en todo el mundo incluyendo la mayoría de los países latinoamericanos (Arce, 2011).

Los últimos 20 años han sido fructíferos en cuanto a descubrimientos sobre el proceso microbiológico y bioquímico, esto gracias al nuevo material de laboratorio que permitió el estudio de los microorganismos intervinientes en condiciones anaerobias. Habiendo superado una primera etapa a nivel piloto, a lo largo de los años transcurridos, la tecnología de la digestión anaerobia se fue especializando abarcando actualmente diferentes campos de aplicación con objetivos muy variados, siendo difundidas para determinados fines en combinación con tratamientos aeróbicos convencionales (Hilbert, S.F).

Los países más importantes generadores de esta tecnología en la actualidad son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, Estados Unidos, Filipinas y Alemania, cuyas plantas de tratamiento de desechos industriales, han tenido una importante evolución (Hilbert, S.F).

Cabe recalcar que, en todos los países europeos se han construido en las últimas dos décadas más de 8,000 digestores a nivel industrial, en Alemania se cuenta con más de 6000 plantas de biogás en operación superando los 2300 MW, y en los países latinoamericanos también se están desarrollando proyectos industriales de aprovechamiento de desechos orgánicos para la producción de biogás, un ejemplo es Bolivia, ya que implementó en el 2006 un programa de viviendas autoenergéticas (Laines, Sosa, Cámara, Sánchez & Ferreiro, 2011).

Este programa instaló 250 biodigestores de polietileno tubular en comunidades rurales como una alternativa para desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias de pequeña, mediana y gran magnitud (Laines et al., 2011).

En el caso de la ciudad de Quito, la Empresa Pública Metropolitana de Rastro Quito, en convenio con la Empresa Eléctrica Quito y el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, están construyendo un biodigestor para el aprovechamiento de los desechos biológicos que se producen del faenamiento de los animales (EMRAQ-EP, S.F). Con la recuperación de la energía a través de este biodigestor se espera conseguir el calentamiento del agua que utiliza la EMRAQ-EP para la limpieza de los productos e instalaciones, a fin de que exista un ahorro en la utilización del gas licuado de petróleo, con el que en la actualidad se calienta el agua (EMRAQ-EP, S.F).

El objetivo de este proyecto es demostrar que la tecnología de digestión anaerobia permite la valorización de los residuos orgánicos, producción de biogás, abonos y la capacidad de aprovechamiento energético con la que se cuenta, para poder replicarlo a gran escala, utilizando todos los sustratos orgánicos. (EMRAQ-EP, S.F, p. 2).

Como se puede evidenciar en la actualidad, en el Distrito no existe un aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, debido a esto, la Universidad Internacional SEK, en la Facultad de Ciencias Ambientales se realizaron dos proyectos de investigación acerca del

tema, el primero realizado por Sara López, el cual fue titulado “Producción de metano en un biodigestor de residuos sólidos urbanos orgánicos y caracterización bioquímica de los microorganismos involucrados en el proceso”, y el segundo proyecto llevado a cabo por Ana Barriga (“Rediseño de un biodigestor tipo batch alimentado con residuos sólidos orgánicos urbanos producidos en el Distrito Metropolitano de Quito en el año 2014); es importante entonces mencionar que, el presente proyecto es la continuación de dichas investigaciones, y se basó principalmente en la optimización del biodigestor, para lo cual se encontraron las proporciones adecuadas para lograr la mayor eficiencia en la generación de metano. Los resultados obtenidos servirán entonces, como un aporte que permita fundamentar la idea de la inclusión de un sistema de biogás a partir de residuos sólidos urbanos generados dentro del Distrito Metropolitano de Quito.

### **1.3 Importancia del Estudio**

El manejo de los residuos sólidos urbanos en el Distrito Metropolitano de Quito es deficiente, es por ello que se deben tomar en cuenta nuevas alternativas para su gestión, y la biometanización de los residuos biodegradables podría convertirse en una eficaz solución, capaz de generar energía renovable como el biogás, reducir el volumen y peso de los residuos que van a los vertederos, y disminuir la emisión de metano a la atmósfera (Crisanto, 2013).

La producción de energía eléctrica mediante el uso de la biomasa y más exactamente mediante el uso del biogás en el Ecuador no es una tecnología muy común, pero cabe mencionar que es una fuente de energía eléctrica alternativa y como tal cabe dentro de la matriz energética del país y de las políticas de gobierno actuales, las cuales tratan de minimizar el uso de energía eléctrica proveniente de recursos petroleros, ya que en cualquier momento podría existir un incremento en el precio de estos, de tal forma que se eleve el costo de la producción de la energía proveniente de estas fuentes, y a su vez la contaminación que en estas se produzca.

La ausencia de experimentación científica, no ha permitido obtener datos certeros que incorporen esta alternativa energética dentro del sistema de gestión de residuos de la ciudad, es por ello que, existe la necesidad de cubrir esta falta de información, misma que podrá ser un aporte para las futuras líneas de investigación enfocadas en el aprovechamiento de residuos sólidos.

Por dicho motivo se realizó el presente proyecto, el cual se llevó a cabo gracias a las investigaciones previas realizadas en la Universidad Internacional SEK; esta investigación es de gran importancia ya que permite validar los datos obtenidos y por otro lado aumentar la base de datos acerca de este proyecto, para de esta manera poder concluir de mejor forma tanto desde el punto de vista estadístico como desde el punto de vista técnico que, si la investigación es válida o no válida para la zona, y a la vez permite planificar adecuadamente los diferentes componentes que afectan dicho sistema.



## 1.4. Objetivo General

Realizar Ensayos Operativos en un biodigestor tipo batch alimentado por RSU producidos en el DMQ 2015

## 1.5. Objetivos Específicos

- Gestionar los parámetros físico-químicos para optimizar la calidad y el tiempo de generación de metano.
- Encontrar las proporciones adecuadas de la mezcla del sustrato, para generar la mayor eficiencia en la generación de metano.
- Elaborar un protocolo acerca del procedimiento operacional para el funcionamiento del biodigestor.

## 1.6 Características del sitio del proyecto

Donde está presente la población humana, día a día se incrementa la generación de residuos urbanos, los cuales están compuestos tanto por residuos sólidos orgánicos e inorgánicos, encontrando que su contenido, para países en vías de desarrollo, lo conforma la fracción orgánica con un promedio del 60%, porcentaje del cual solo una pequeña parte es aprovechada por entidades que colectan estos desechos en centrales de abasto o industrias de alimentos, para incorporarlos a sistemas de producción de abonos, para uso agrícola o también como componente suplementario en la dieta de especies pecuarias. A pesar de esto, son altos los volúmenes que aún están llegando, en el mejor de los casos, a rellenos sanitarios, y en los peores casos a ríos, caminos o zonas verdes (Rodríguez, 2014).

Según información proporcionada por la Empresa Metropolitana de Aseo, se tiene que la producción per cápita de residuos sólidos urbanos en Quito es de 0.801 kg/hab/día, con una población aproximada de 1.999,256 habitantes, lo cual genera un total de 1.602,00 toneladas de basura por día, en donde, un 77% de los hogares elimina la basura a través de carros recolectores, los cuales son dispuestos en rellenos sanitarios, sitios inicialmente controlados que con el tiempo y por falta de estabilidad administrativa y financiera, por lo general, terminan convirtiéndose en botaderos a cielo abierto. El restante 23% la elimina de diversas formas, que provocan inconvenientes e impactos de diferente índole como, taponamiento de cauces de agua y alcantarillados, generación de deslaves, proliferación de insectos y roedores; que traen consigo problemas ambientales y de salud a la población (Ministerio del Ambiente, 2014).

Es por tal motivo que, dichas estadísticas hacen reflexionar sobre la necesidad de la ciudad por incorporar dentro de su gestión de residuos una alternativa que aborde las diferentes aristas de este servicio y permita alcanzar una gestión eficiente, eficaz, ambientalmente sustentable y financieramente sostenible, todo bajo un marco de aceptación y colaboración ciudadana (Ministerio del Ambiente, 2014).

Como se puede evidenciar, a lo largo de los años, se han estado desaprovechando las cualidades fisicoquímicas y microbiológicas inherentes a la Fracción Orgánica de Residuos

Sólidos Urbanos, lo que directamente, viene afectando la capacidad instalada y el tiempo de uso de rellenos sanitarios, a la población civil y al ambiente (aire, suelo y agua), esto debido a varias circunstancias como: la generación y emisión de gases de efecto invernadero, el vertimiento constante de lixiviados que deterioran la calidad de los suelos para el establecimiento de cualquier tipo de cultivo y la calidad de agua (Huamán, 2001).

En cuanto a la salud de las personas, la importancia de los residuos sólidos como causa directa de enfermedades no está bien determinada. Sin embargo se le atribuye una incidencia en la transmisión de algunas enfermedades. Para comprender con mayor claridad de los efectos de los residuos sólidos urbanos en las personas, es necesario distinguir entre los riesgos directos y los riesgos indirectos generados por los RSU (Huamán, 2001).

Los riesgos directos son ocasionados por el contacto directo con los residuos, las personas más expuestas son los recolectores debido a la manipulación de recipientes para el almacenamiento de los residuos, en la misma situación se encuentran los segregados o chamberos cuya actividad de separación y recolección de materiales la realizan casi siempre sin protección alguna. En cambio, los riesgos indirectos son los originados por el manejo inadecuado de los residuos sólidos urbanos y por los ya anteriormente nombrados los vectores sanitarios que representan un peligro para la población (Huamán, 2001).

Para la solución de dicho problema, el punto clave no es cuantas opciones de tratamiento se utilicen, o si se aplican todas al mismo tiempo, sino que sean parte de una estrategia que responda a las necesidades y contextos locales o regionales, así como a los principios básicos de las políticas ambientales en la materia (Huamán, 2001).

La presente investigación, desarrollada en base a la aplicación de la tecnología anaerobia, es una alternativa a los actuales problemas generados por la deficiente Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos, basados en la reducción de los residuos enviados a disposición final. Esto traerá varios beneficios como: el mejoramiento de la calidad de vida de la población, el cuidado del ambiente y la conservación de los recursos naturales, además que puede evitar la emisión de alrededor de 420 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> y puede prevenir la emisión de 49 mil toneladas de óxidos de nitrógeno. (Observatorio Natural para la gestión de residuos Sólidos Urbanos, 2009)

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Estudios Previos

En base a proyectos de investigación anteriormente realizados, se pudo obtener una amplia información sobre el tema, es por ello que el proyecto se basa en la revisión de fuentes secundarias (Herrero, 2008).

A lo largo de las varias pruebas y diseños sobre la operación de los biodigestores se puede decir que, la digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo, en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, esto es realizado por medio de un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (e.g.  $H_2$   $O_2$ ) (Herrero, 2008).

Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano (Comisión Nacional de Energía, 2007).

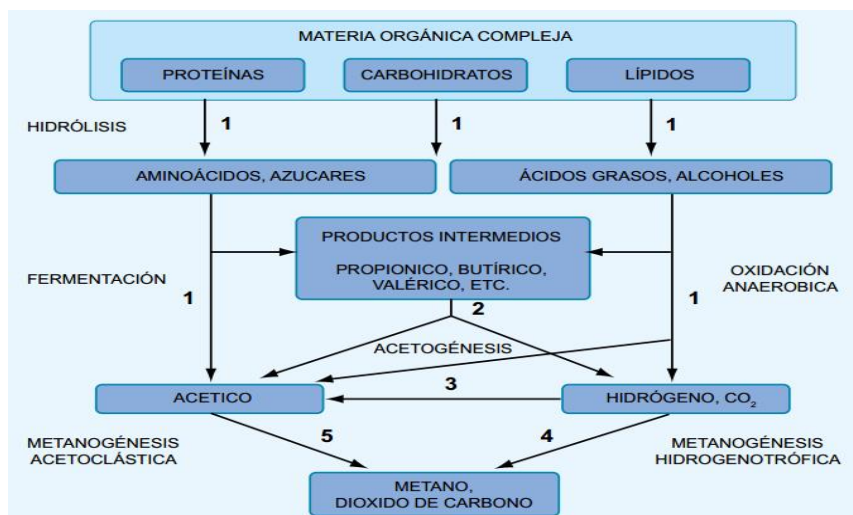
##### 2.1.1. Procesos de biodigestión

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas (Moreno, 2008):

- a. Hidrólisis: La materia orgánica (proteínas, carbohidratos y lípidos) no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga), que puedan atravesar la pared celular. En esta fase las partículas y moléculas complejas, son hidrolizadas por enzimas extracelulares, las cuales son producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos (Aguilar, 2014).

La fase hidrolítica es decisiva para la biodegradación de RSU, convirtiéndose en la etapa limitante para los residuos con gran cantidad de sólidos, ya que los microorganismos solo son capaces de metabolizar la materia orgánica disuelta. La velocidad viene limitada, en gran parte, por el grado de trituración o el tamaño de partícula de las sustancias a hidrolizar. Cuanto mayor es la velocidad de solubilización de la materia orgánica, mayor es la velocidad de producción de biogás (Moreno, 2008).

Figura 1. Reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos



Fuente: Aguilar, 2014, p.13.

Cabe recalcar que, cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso (FAO, 2011).

La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas, denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol (FAO, 2011).

Es importante mencionar que, la velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de la hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa

y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. (FAO, 2011, p. 8)

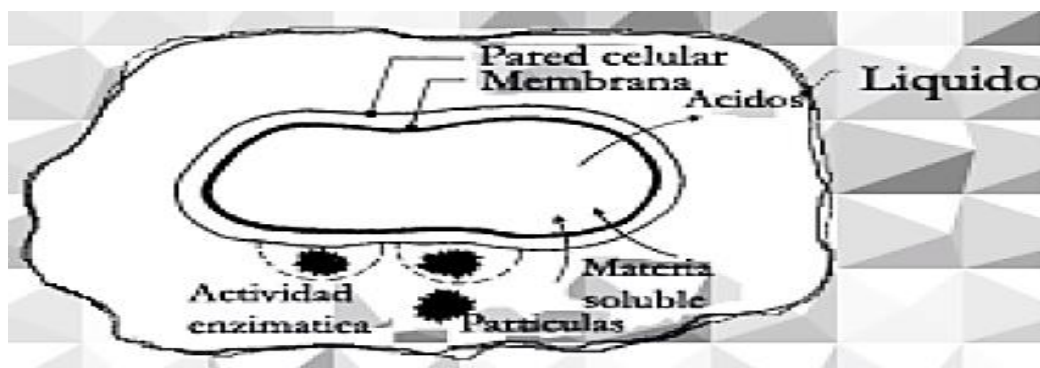
Los pretratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores (FAO, 2011).

b. Etapa fermentativa o acidogénica

Los compuestos solubles son metabolizados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios (Burgos, 2013).

La pared celular de las bacterias acidogénicas actúa como un tamiz y deja las partículas más grandes en el exterior, mientras que la membrana selecciona y guía el material dentro y fuera del interior de la célula. No todos los sólidos orgánicos pueden ser degradados y no todos entran a la célula, estos materiales constituyen la fracción no biodegradable y son llamados sólidos inertes (Burgos, 2013, p. 18).

Figura 2. Actividad celular de una Bacteria formadora de Ácido



Fuente: Burgos, 2013, p. 18.

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa (Moreno, 2008).

La importancia de este proceso y de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema (Moreno, 2008).

Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos (FAO, 2011).

Tabla 1. Principales ácidos grasos generados durante la digestión

Ácidos orgánicos importantes	
<b>Ácidos volátiles</b>	
	Ácido acético
	Ácido propiónico
	Ácido n-butírico
	Ácido isobutírico
<b>Ácidos no volátiles</b>	
	Ácido láctico
	Ácido piruvico
	Ácido succínico

Fuente: (FAO, 2011, p. 20).g

c. Etapa acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos ( $H_2$  y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato ( $CH_3 COO^-$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ), a través de las bacterias acetogénicas. Los representantes de estos microorganismos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*. (Moreno, 2008, p. 9)

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente (Moreno, 2008).

d. Etapa metanogénica

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización (FAO, 2011).

Estas bacterias se caracterizan por ser muy sensibles al oxígeno y a los ácidos, solo pueden usar como sustrato los compuestos orgánicos e inorgánicos más sencillos. Su crecimiento y reproducción es muy lento, doblar su población demora de cuatro a seis días. Su estudio ha avanzado muy lentamente por la dificultad de aislar, incubar y almacenarlos, por tal motivo hasta ahora se han obtenido muy pocas especies puras, no pasan de 13 cepas puras (Guevara, 1996).

Tabla 2. Clasificación de las metanobacterias

Orden	Familia	Género	Especies
Methanobacteriales	Methanobacteriaceae	Methanobacterium	Methanoformicum
			Methanobryantil
			M. thermoautotrophic
		Methanobrevibacter	Methanoruminantium
			Methanoarboriphilus
			Methanosmithil
Methanococcales	Methanococcaceae	Methanocoecus	Methanovanniellii
			Methanovoltae
Methanomicrobiales	Methanomicrobiaceae	Methanogenium	Methanocaraci
			Methanomarispigri
		Methanospillum	Methanohongatei
	Methanomicrobium	Methanomobile	
	Methamisarcinaceae	Methanosarcina	Methanobarkerie

Fuente: Guevara, 1996, p.14.

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano, a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato,  $H_2 / CO_2$ , formato, metanol y algunas metilaminas (Moreno, 2008).

Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el  $H_2$  como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son Methanosarcina y Methanotherix. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior. (Moreno, 2008, p. 10)

Como se puede evidenciar, la descomposición anaeróbica convierte los compuestos complejos en compuestos simples, dando como resultado final la liberación de una mezcla de gases. De esa mezcla, el gas que representa el mayor porcentaje es el metano (uno de los principales gases que ocasiona el efecto invernadero) (Herrero, 2008).

Una vez entendido el proceso que se va a realizar, es indispensable conocer algunos de los factores importantes que gobiernan el proceso metanogénico. Muchos investigadores evalúan el desempeño de un sistema anaeróbico en función de la tasa de producción de metano, porque la metanogénesis se considera un paso limitante del proceso. Debido a esto, la biotecnología anaeróbica requiere de un cuidadoso monitoreo de las condiciones que se encuentran dentro del proceso biológico (FAO, 2011). Estas condiciones se discuten a continuación.

## **2.1.2 Factores determinantes en el proceso metanogénico (producción de biogás)**

### **2.1.2.1. Ubicación del sistema de biodigestión**

Típicamente, los biodigestores se construyen por debajo del nivel del suelo (enterrados), pero esto depende íntimamente del costo que se pretende ocupar en la construcción, ya que esta práctica es utilizada para bajar dichos costos (Samayoa, Bueso & Viquez, 2012).

En cuanto a las condiciones climáticas, es importante mencionar que, en climas calientes es necesario proteger al biodigestor de la radiación solar, pues dependiendo del material de fabricación (como plástico) el sol lo pueda dañar, o bien calentarlo excesivamente, y en climas fríos es necesario aislar el biodigestor del suelo utilizando algún material aislante: paja, heno o plástico; también construir algún tipo de infraestructura para mantener el calor (invernadero) (Samayoa, Bueso & Viquez, 2012).

### **2.1.2.2. Cantidad de desecho disponible**

Conocer la cantidad de desechos disponible es uno de los pasos más importante para decidir la implementación de un sistema de biodigestión. La cantidad de desecho orgánico define, por ejemplo, el tamaño del biodigestor o la cantidad del producto esperado (Hernández, 2014).

### **2.1.2.3. Naturaleza y composición bioquímica de materias primas**

Una vez que se identifica la cantidad de desecho disponible, se deben conocer las características de este desecho. En teoría cualquier desecho orgánico tiene la capacidad de transformarse en biogás a través de un biodigestor. Sin embargo, existen características de los desechos que facilitan el buen funcionamiento del biodigestor y otras que impiden dicho funcionamiento, es decir la calidad y la cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado (Castillo, 2012).

Los sustratos ideales para la digestión anaerobia en biodigestores son los desechos orgánicos húmedos de origen agrícola, industrial, doméstico y municipal, así como las excretas de origen humano y animal. Los residuos de la industria alimentaria y de las actividades agrícolas en particular, son excelentes como sustratos para la digestión anaerobia, ya que no contienen contaminantes, patógenos, ni metales pesados (Rivas, Vargas & Watso, 2009).

La presencia de nutrientes como carbono, nitrógeno, así como un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc,



cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores), es necesaria para el desarrollo de las comunidades microbianas encargadas de la producción de biogás (Hilbert, S.F).

A continuación se indican varias tablas que servirán para conocer que residuo es mayormente favorable para la producción de biogás.

Tabla 3. Composición química de diversos residuos de origen animal y vegetal (valores promedios, base seca)

Materia Prima	Lípidos (%)	Proteínas (%)	Celulosa Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceniza (%)
Paja de trigo	1,10	2,10	65,45	21,60	3,53
Paja de centeno	9,62	5,42	59,95	12,70	12,31
Paja de arroz	2,35	12,26	30,51	10,61	12,55
Poroto verde	3,80	11,04	39,61	13,84	9,14
Pasto verde	8,05	4,94	57,22	9,80	19,99
Alfalfa	10,41	12,81	36,79	8,95	10,30
Hojas secas	4,01	3,47	32,78	29,66	4,68
Caña maíz		4,50	35,40	10,30	6,50
Bovino	3,23	9,05	32,49	35,57	19,66
Porcino	11,50	10,95	32,39	21,49	23,67
Aves	2,84	9,56	50,55	19,82	17,23
Equino	2,70	5,00	40,50	35,00	17,80
Ovino	6,30	3,75	32,00	32,00	25,95
Caprino	2,90	4,70	34,00	33,00	26,40

Fuente: Varnero & Arellano, 1991

Tabla 4. Clasificación de sustratos para la digestión Anaeróbica

Características	Clase	Tipo de sustrato	Características Cuantitativas
Sólido	1	Basura Doméstica	>20% ST 40-70 % Fracción Orgánica
		Estiércol Sólido	
		Restos de Cosecha	
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces Animales	100-150 g/L DQO 5%-10% ST 4%-8% SV
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS)	3	Heces Animales de cría y levante diluido con agua de lavado	3-17 g/L DQO 1-2 g/L SS
		Aguas residuales de mataderos	

Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias	5-18 g/L DQO
		Aguas Negras	4-500 g/L DQO

Fuente: FAO, 2011.

Tabla 5. Producción de biogás a partir de residuos vegetales

Residuos	Cantidad residuo Ton/ha	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m <sup>3</sup> /Ton	m <sup>3</sup> /ha
<b>Cereales (paja)</b>				
Trigo	3.3	123:1	367	1200
Maíz	6.4	45:1	514	3300
Cebada	3.6	95:1	388	1400
Arroz	4.0	58:1	352	1400
<b>Tubérculo (hojas)</b>				
Papas	10.0	20:1	606	6000
Betarragas	12.0	23:1	501	6000
<b>Leguminosas (paja)</b>				
Porotos	3.2	38:1	518	1650
Habas	4.0	29:1	608	1400
<b>Hortalizas (hojas)</b>				
Tomate	5.5	12:1	603	3300
Cebolla	7.0	15:1	514	3600

Fuente: Varnero & Arellano, 1991

#### 2.1.2.4. Relación carbono Nitrógeno

Siendo el carbono y el nitrógeno las principales fuentes de alimentación de las distintas poblaciones que participan en los procesos de digestión anaerobia, se establece que la relación Carbono – Nitrógeno debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, con un valor recomendable de 30/1, esto puede explicarse debido a que estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno (Ferrer, 2011).

Es importante mencionar que, la descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso (Huamán, 2001).

En general las materias primas ricas en carbono producen más gas que las ricas en nitrógeno, así mismo es más rápida la producción de gas a partir de materias primas nitrogenadas (excretas), que las ricas en carbono (paja y tallos). Mientras en los primeros 10 días de

fermentación las materias primas nitrogenadas generan de 34.4%-46% del total de gas producido, las ricas en carbono solo aportan el 8.8% (Huamán, 2001).

Tabla 6. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.

<b>Materiales</b>	<b>%C</b>	<b>%N</b>	<b>C/N</b>
<b>Residuos animales</b>			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
Pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1
<b>Residuos Vegetales</b>			
Paja de trigo	46	0.53	87:1
Paja cebada	58	0.64	90:1
Paja arroz	42	0.63	67:1
Paja avena	29	0.53	55:1
Rastrojos maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	30	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	44	0.06	730:1

Fuente: Varnero & Arellano, 1991

Si esta relación C/N es muy alta, el Nitrógeno se va a consumir rápidamente por las bacterias metanogénicas para satisfacer sus necesidades proteicas y no reaccionará más con el contenido restante de Carbono. Como resultado, la producción de gas bajara. De otra parte, si dicha relación es muy baja, es decir, donde el nitrógeno sea abundante, el nitrógeno será liberado y acumulado en forma de amoniaco, el cual incrementara el pH de la carga en el digestor y la producción de biogás puede disminuir (Guevara, 1996).

En este sentido no se recomienda utilizar un solo tipo de sustrato. Lo ideal es por el contrario, combinar materiales ricos en nitrógeno con materiales abundantes en carbono para obtener un buen balance de nutrientes que promueva el adecuado crecimiento de los microorganismos que degradan la materia orgánica dentro del biodigestor y, de esta manera, aumentar la productividad del mismo (Guevara, 1996).

### **2.1.2.5. Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles**

Toda materia está compuesta por agua y una fracción sólida, a la que se le llama sólidos totales. El agua contenida en los residuos no produce biogás y por tanto ocupa un volumen no aprovechado en el digestor. Sin embargo, resulta imprescindible para que el proceso fermentativo se desarrolle adecuadamente a nivel microbiológico. Así pues, debe alcanzarse un equilibrio entre la productividad de biogás asociada al aporte de sólidos y la humedad necesaria para la fermentación (FIAB, S.F).

El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla orgánica con que se carga el biodigestor es un factor importante a considerar para lograr un buen funcionamiento del proceso, tal concentración puede variar de un 25 a un 15%. La mezcla óptima estaría compuesta por un porcentaje de sólidos de 6% a 9%, según los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio, el contenido de (ST) no debe exceder el 10 % de la mezcla, por eso, se deben diluir antes de ser tratados (Rodríguez, 2014).

Es importante mencionar que, la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas (Rodríguez, 2014).

En cuanto al porcentaje de sólidos volátiles respecto al de sólidos totales (% de sólidos volátiles o SV) suele variar entre el 70-95%. Los residuos que tienen un porcentaje inferior al 60% no suelen considerarse buenos sustratos para la digestión anaerobia. Por otro lado, una buena biodegradabilidad de estos sólidos volátiles es clave para obtener un alto rendimiento de biogás (FIAB, S.F).

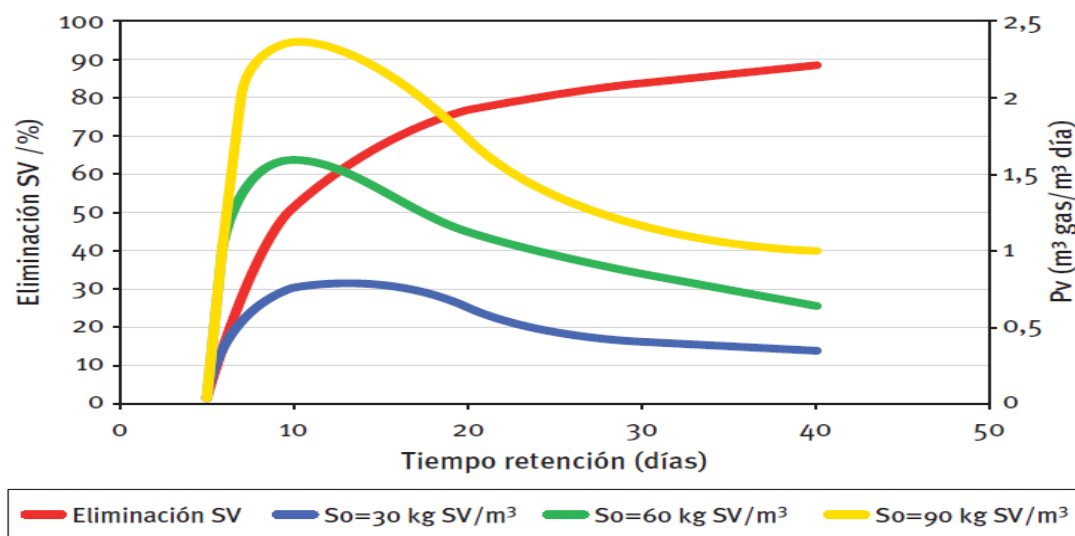
### **2.1.2.6. Potencial redox**

Conviene mantener el valor del potencial redox por debajo de -300 mV o -330 mV para asegurar el ambiente fuertemente reductor que las bacterias metanogénicas necesitan para su óptima actividad (Morales, 2011).

### **2.1.2.7. Tiempo de retención hidráulico (TRH)**

El tiempo de retención es definido como el periodo de tiempo que permanece la materia orgánica dentro del sistema para alcanzar la degradación. El tiempo de retención está directamente relacionado con la temperatura ambiente. En un digestor que opera a régimen estacionario o “discontinuo”, el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga (Rodríguez, 2014).

Gráfico 1. Eliminación de sólidos volátiles, SV(%) y producción volumétrica de gas Pv ( $\text{m}^3$  biogás/ $\text{m}^3$  dig-día) para un reactor anaerobio continuo de mezcla completa, en función del tiempo de retención hidráulica.



Fuente: Rodríguez, 2014, p. 8.

#### 2.1.2.8. Nutrientes

Al igual que en todas las operaciones bioquímicas, se requieren macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes (minerales traza) en el proceso anaeróbico para la síntesis de nueva biomasa. Sin embargo, una de las ventajas de los procesos de digestión anaeróbica, frente a los procesos aeróbicos, es su baja necesidad de nutrientes derivada de los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaeróbicos (Castillo, 2012).

Además del nitrógeno y el fósforo, se han identificado otras trazas de diversos nutrientes como esenciales para los microorganismos anaeróbicos. Los metales traza tales como hierro, cobalto, molibdeno, selenio, calcio, magnesio, zinc, cobre, manganeso y boro a niveles de  $\text{mg}/\text{L}$  y la vitamina B12 en niveles de  $\mu\text{g}/\text{L}$ , se ha encontrado que mejoran la producción de metano si se encuentran en los valores óptimos, ya que si sucede lo contrario vendrían a ser inhibidores del proceso de digestión (Moreno, 2008).

#### 2.1.2.9. Tóxicos e Inhibidores

El proceso de digestión anaeróbica es inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema. Estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Sustancias tales como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles, forman parte del primer grupo, en tanto que, sulfuro, amoníaco y ácidos grasos de cadena larga, forman parte de otro grupo (Moreno, 2008).

Experimentalmente se ha comprobado que la magnitud del efecto toxico de una sustancia puede ser reducido significativamente por aclimatación de la población de microorganismos al toxico. Por otra parte, muchas de estas sustancias a bajas concentraciones pueden estimuladoras en el proceso (Hilbert, S.F).

Se dice que, la presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo. Cuando es demasiado alta la concentración de ácidos volátiles (más de 2.000 ppm para la fermentación mesofílica y de 3.600 ppm para la termofílica) se inhibirá la digestión (Hilbert, S.F).

En el siguiente cuadro, se dan valores de concentraciones de ciertos inhibidores comunes, cantidades que se deben tomar como orientativos, puesto que las bacterias intervinientes pueden con el tiempo adaptarse a condiciones que en un principio las afectaba marcadamente (Hilbert, S.F). El orden de toxicidad de los metales pesados es Ni>Cu >Cr ~ Cr >Pb>Zn (FAO ,2011).

Tabla 7. Concentración Inhibidora de sustancias comunes

Inhibidores	Concentración Inhibidora
SO <sub>4</sub>	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitrato (según contenido de Nitrógeno)	0,05 mg/L
Cu	100 mg/L
Cr	200 mg/L
Ni	200-500 mg/L
CN (Después que se han domesticado las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml).	25 mg/L
ABS (Detergente sintético)	20-40 mg/L
Na	3500-5500 mg/L
K	2500-4500 mg/L
Ca	2500-4500 mg/L
Mg	1000-1500 mg/L

Fuente: Hilbert, S.F

- Ácidos grasos volátiles.

La concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), productos intermedios mayoritarios del proceso anaeróbico, es uno de los parámetros que más eficazmente pueden indicar la evolución del proceso. De hecho, este parámetro es uno de los más utilizados en los sistemas de control debido a su rápida respuesta ante variaciones del sistema. Un ejemplo de ello, es la acumulación de ácidos grasos volátiles que tiene lugar en el sistema cuando la velocidad de degradación de estos, por parte de las

bacterias responsables, disminuye por alguna causa adversa. Por tanto, un aumento en la concentración de ácidos volátiles en el sistema, siempre significa una desestabilización del proceso y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás (Ortega, 2006).

En un sistema anaeróbico óptimo, la concentración de AGV es relativamente baja y se encuentra usualmente en el rango de 50-250 mg HAc/L. Cuando la relación simbiótica entre acidogénicos y metanogénicos se rompe, los AGV se acumulan (Moreno, 2008).

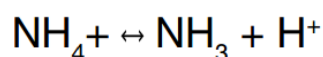
- Hidrógeno

El hidrógeno es también un compuesto intermedio importante del proceso anaeróbico. Su acumulación en el medio provoca la inhibición de la acetogénesis y, consecuentemente, la acumulación de ácidos grasos volátiles con más de dos átomos de carbono (Moreno, 2008).

- Nitrógeno amoniacal

El amoníaco puede estar presente en las materias primas que entran al digestor o ser producido durante la degradación anaeróbica de compuestos orgánicos nitrogenados tales como proteínas o aminoácidos, las proteínas generalmente contienen 16% de nitrógeno. Durante el proceso anaeróbico, el nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formas amoniacales. Aunque el nitrógeno amoniacal es un nutriente importante para el crecimiento bacteriano, una concentración excesiva puede limitar su crecimiento. El nitrógeno amoniacal es la suma del ión amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) (Ortega, 2006). Ambas especies se encuentran en equilibrio químico, y la concentración relativa de cada una depende del pH, tal como indica la ecuación de equilibrio:

Ecuación 1. Ecuación de Equilibrio del Nitrógeno amoniacal



(Ortega, 2006, p. 13)

De las dos especies, la que parece inhibir el proceso es el amoníaco libre ya que se ha comprobado experimentalmente que el efecto inhibitorio por amonio aumenta a pH alcalino (Ortega, 2006).

Además del pH, la cantidad de amoníaco libre depende de la concentración del sustrato, de la relación C/N, de la capacidad tamponadora del medio y de la temperatura de digestión. Obviamente, aquellos residuos que contengan mayores proporciones de proteínas u otros compuestos nitrogenados son los que presentan más problemas de inhibición por amonio. Se ha reportado que los digestores que operan a mayores temperaturas son sensibles a la toxicidad por amonio que aquellos que operan en el rango termofílico (Crisanto, 2013).

Muchas industrias agropecuarias generan residuos con altos contenidos de amoníaco. La digestión anaeróbica de tales residuos generalmente presenta problemas debido a

los altos niveles de amoníaco. Se reportó que a niveles de amoníaco-N que excedían 3000 mg/L, el ión amonio se volvía tóxico independientemente del pH (Crisanto, 2013).

Tabla 8. Concentración de amoniaco y su efecto en el proceso de digestión anaeróbica

Amoniaco-N (mg/L)	Efectos
50-100	Benéficos
200-1000	Sin efectos adversos
1500-3000	Efectos Inhibitorios a niveles de pH altos
Sobre 3000	Tóxico

Fuente: FAO, 2011, p. 47

- Sulfatos y sulfuros

La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el sustrato puede producir la inhibición del proceso anaeróbico, especialmente de la metanogénesis. En presencia de sulfatos, las bacterias metanogénicas compiten con las sulfato-reductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrógeno), mostrando éstas últimas ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras. El resultado de esta competencia determinará la proporción de ácido sulfhídrico y metano en el biogás producido (Crisanto, 2013).

El sulfuro es también un inhibidor para muchos grupos bacterianos. En general, los Metanogénicos son más sensibles que los acidogénicos y Acetogénicos, comenzando a ser toxica una concentración de 50 mg/L, si los microorganismos metanogénicos no están aclimatados a los sulfuros. Parece que la forma tóxica es la no ionizada, por lo que la inhibición se favorece a pH bajos y a bajas temperaturas (Ortega, 2006).

La forma ionizada (HS<sup>-</sup>) presenta menor toxicidad. Por tanto, la inhibición tiene dos etapas, la primera debida a la competición por el sustrato entre los microorganismos metanogénicos y sulfato-reductores y la segunda es una inhibición directa del crecimiento metanogénico por la presencia de sulfuros solubles (Ortega, 2006).

- Cationes y metales pesados

Los cationes de metales alcalinos y alcalino-terreos tienen un efecto estimulador de la actividad de las bacterias a bajas concentraciones. A partir de un nivel de concentración, pueden proporcionar toxicidad provocando una disminución de la velocidad de crecimiento (Crisanto, 2013).

La toxicidad de los cationes aumenta con el peso molecular, por lo que los metales pesados son los que provocan toxicidad a menor concentración (Crisanto, 2013).



Los niveles de inhibición varían mucho en función de varios factores. Si la introducción del catión en el reactor se produce de forma gradual, los microorganismos pueden aclimatarse y el efecto toxico es menor. La presencia de sulfuros también disminuye la inhibición debido a la precipitación de estos con los metales pesados, pudiendo llegar a tolerarse elevadas concentraciones de metales pesados en estos casos (Crisanto, 2013).

- **Compuestos orgánicos**

Los compuestos orgánicos que resultan tóxicos para el proceso de anaerobiosis provienen de los residuos industriales en altas concentraciones. Sin embargo, a bajas concentraciones puede convertirse en fuente de alimento para los microorganismos, con un diseño adecuado la mayoría pueden ser tratados por vía anaerobia con buenos resultados. A continuación se presenta una tabla con diversos tipos de contaminantes y las concentraciones a las cuales produce efectos inhibitorios (Ortega, 2006).

Tabla 9. Concentración de compuestos orgánicos que reducen la producción de gas en un 50%

Tóxico	Concentración mg/L	Tóxico	Concentración mg/L
<b>Hidrocarburos</b>		<b>Alcanos Halogenados</b>	
Alcanos		Clorometano	50
ciclohexano	150	Cloroformo	1
Octano	2	Tetracloruro de carbono	6
Decano	0.35	Pentacloroetano	11
<b>Aromáticos</b>		Hexacloroetano	22
Benceno	1200	Bromometano	4
Tolueno	580	Bromodichlorometano	2
Xileno	250	<b>Alquenos Halogenados</b>	
<b>Fenoles</b>		Tricloroetano	13
Fenol	2100	Tetracloroetano	22
o-Cresol	890	1,1-Dicloroetano	8
p-Cresol	91	<b>Aromáticos Halogenados</b>	
<b>Alcoholes</b>		Clorobenceno	270
Metanol	22000	1,2-Diclorobenceno	150
Etanol	43000	2-Clorotolueno	53
1-propanol	34000	2-cloro-p-xileno	89
1-butanol	11000	2-Clorofenol	160
<b>Cetonas</b>		<b>Miscelaneos</b>	
Acetona	50000	Hidroquinona	2800
2-Butanona	28000	Acetonitrilo	28000
2-Hexanona	6100	Acilonitrilo	90

Fuente: Perry, 2001, p. 68.

### 2.1.2.10. Agitación – Mezclado

Los objetivos buscados con la agitación son: remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor y prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor (Moreno, 2008).

En la selección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se debe considerar que el proceso anaeróbico involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio en el cuál el metabolito de un grupo específico servirá de alimento para el siguiente, implicará una merma en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de biogás (Moreno, 2008).

Se distinguen 3 tipos de agitación, estas son:

- **Mecánica:** A través de agitadores manuales o con motores eléctricos (Crisanto, 2013).
- **Hidráulica:** A través de bombas de flujo lento se hace recircular la biomasa (Crisanto, 2013).
- **Burbujeo de biogás:** Se recircula el biogás producido al fondo del biodigestor por medio de cañerías, para producir burbujeo y de esta manera movimiento de la biomasa (Crisanto, 2013).

#### **2.1.2.11. Promotores de la metanogénesis (inoculantes biológicos)**

El crecimiento bacteriano dentro de los digestores sigue tres etapas: La de arranque (I), la de estabilización (II) y la de declinación (III). La primera etapa puede ser acortada mediante la inclusión de un determinado porcentaje de material de otro digestor rico en bacterias metanogénicas que se encuentran en plena actividad (Rodríguez, 2014).

Esto es particularmente importante en los digestores discontinuos que deben ser arrancados frecuentemente. De esta forma se alcanza en forma más rápida la etapa de estabilización, con lo cual, puede incrementarse la producción de biogás por kg. Los dos factores a tener en cuenta en la inoculación de un digestor son la proporción en que se agrega y la edad del mismo. Cuanto mayor sea la proporción y menor la edad del inóculo, mayor será la eficacia (Rodríguez, 2014).

### **2.1.3. Subproductos de la Digestión anaerobia**

#### **2.1.3.1. Biogás**

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable (FAO, 2011).

A continuación se presentan varias propiedades y características específicas de este subproducto.

Tabla 10. Características Generales del Biogás

Composición	55 – 70% metano (CH <sub>4</sub> ) 30 – 45% dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m <sup>-3</sup>
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m <sup>3</sup> biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH <sub>4</sub> mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m <sup>-3</sup>
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol <sup>-1</sup>

Fuente: Deublein y Steinhauser, 2008

Tabla 11. Valores medios de los componentes del biogás en función de los sustratos.

Componente	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos industriales	Gas de vertedero
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
Dióxido de carbono	20-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
Sulfuro de hidrógeno	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0,5-100 ppm
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de carbono	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm

Fuente: Foster, 2005, p. 25.

En la actualidad, las aplicaciones más comunes del biogás son la combustión directa para la producción de calor y la generación de energía eléctrica, ya que puede ser utilizado en una variedad de equipos comerciales: motores de combustión interna, estufas, etc. No obstante, existe un interés creciente por otras alternativas como son su aplicación como combustible de automoción y su integración en la red de gas natural (Agrowaste, 2010).

Tabla 12. Aplicaciones que puede tener el biogás

Aplicaciones del Biogás	
Opción	Aplicación
Generación eléctrica	Apropiada para muchas instalaciones
Combustión Directa	Cocinas, iluminación
Calderas/Hornos	Uso por temporadas o en situaciones especiales

Refrigeración	Refrigeración en hatos (aproximadamente el 15 al 30% del uso de electricidad en hatos): enfriamiento temporal y en situaciones especiales
---------------	---

Fuente: Rodríguez, 2014, p. 18

Es importante mencionar que, el biogás, además de metano tiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas: agua, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, siloxanos, etc. Por tanto, es necesaria la limpieza del combustible, dependiendo del uso final (IDEA, 2007).

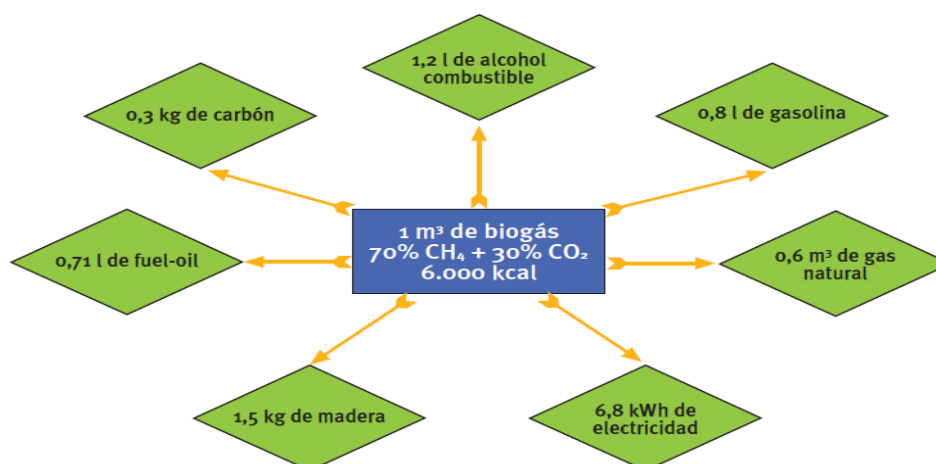
Tabla 13. Tratamiento según el uso final de biogás. (0= no tratamiento, 1= tratamiento parcial, 2= tratamiento elevado)

Uso final	Eliminación del agua	Eliminación del CO <sub>2</sub>	Eliminación del H <sub>2</sub> S
Producción térmica en caldera	1	0	0-1-2
Producción de electricidad en motores estacionarios	1 o 2	0-1-2	1 o 2
Combustible de vehículos o para turbinas	2	2	2
Gas natural para calefacción	2	2	2
Pilas de combustible	2	2	2

Fuente: IDAE, 2007, p.10.

Debido a su alto contenido en metano, tiene un poder calorífico algo mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural. Un biogás con un contenido en metano del 60% tiene un poder calorífico de unas 5.500 kcal/Nm<sup>3</sup> (6,4 kWh/Nm<sup>3</sup>) (IDAE, 2007). Es decir, salvo por el contenido en H<sub>2</sub>S, es un combustible ideal, con unas equivalencias que se muestran en la figura siguiente

Figura 3. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía



Fuente: IDAE, 2007, p.8.

### 2.1.3.2. Biofertilizante

Como subproducto después de la generación de biogás, se obtiene materia orgánica estabilizada rica en elementos minerales. En función a la carga usada y el proceso seguido, esta materia orgánica, también conocida como bioabono, biofertilizante en forma sólida: proveniente de digestores batch o semicontinuos con buen poder fertilizante, y que se puede comercializar sin problemas (Rodríguez, 2014).

En general todos los productos orgánicos obtenidos, independientemente del proceso utilizado para su estabilización, son buenos acondicionadores o mejoradores de las propiedades físicas de los suelos, porque aportan niveles interesantes de materia orgánica estabilizada. Presentan una textura física particular, de baja densidad (del orden de  $0,5\text{g/cm}^3$ ) y baja resistencia mecánica; por lo tanto, la incorporación de estos substratos orgánicos en el suelo permite mejorar la estructura de éste, reduciendo problemas de compactación y susceptibilidad de erosión; además, incrementan la capacidad de retención de agua, así como el intercambio gaseoso, favoreciendo el desarrollo radical. Sin embargo, la clasificación como biofertilizante, depende de las características bioquímicas de las materias primas utilizadas, de forma que si éstas contienen altos niveles de nutrientes, generarán productos con características de fertilizantes orgánicos (FAO, 2011).

### 2.1.4. Cuantificación del metano

En la actualidad se realizan múltiples experimentos en laboratorios, con el fin de estudiar el comportamiento de la materia orgánica sometida al proceso de digestión anaerobia en reactores, en casi la totalidad de estos experimentos, el uso del cromatógrafo es obligado, ya que el objeto final de estudio es, por lo general, el biogás generado, y, por lo tanto, se requiere establecer con cierta confiabilidad los porcentajes de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , entre otros (López, 2013).

Lamentablemente los costos de inversión (entre 6.000 a 75.000 USD), mantenimiento y operación de un cromatografía de gases son elevados lo que limita el desarrollo de muchas investigaciones en este sentido; por otro lado, el costo por análisis cromatográfico en un laboratorio especializado varía entre 30 a 100 USD, valores a los que hay que multiplicarlos, en algunos casos, por 100 o más según el número de muestras a analizar; generando altos costos en las investigaciones (López, 2013).

En vista del alto costo que significa utilizar esta tecnología, se han desarrollado algunas metodologías que permiten la cuantificación indirecta del biogás junto a sus componentes; entre los más comunes están los métodos volumétricos que emplean un instrumento como la botella de Mariotte. A escala de laboratorio esta cuantificación se conoce como la valoración de la Actividad Metanogénica Específica, es una herramienta que se utiliza para determinar la capacidad de asimilación que tienen las bacterias metanogénicas para producir biogás, permitiendo clasificar el potencial de la biomasa para convertir el sustrato en metano y gas carbónico bajo diferentes condiciones ambientales (López, 2013).

### **2.1.5. Investigación Universidad Internacional SEK**

Como se puede evidenciar, existen varios datos bibliográficos acerca del proyecto de los biodigestores, pero como ya se mencionó en la parte superior, en el Distrito Metropolitano de Quito no existe un aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos por medio de los biodigestores, por lo que, la Universidad Internacional SEK, en la Facultad de Ciencias Ambientales, procedió a realizar un proyecto de investigación, el cual fue un trabajo de fin de carrera titulado “Rediseño de un biodigestor tipo batch alimentado con residuos sólidos orgánicos urbanos producidos en el Distrito Metropolitano de Quito en el año 2014”, fue desarrollado por Ana María Barriga Paredes como requisito para la obtención del título de Ingeniera Ambiental.

Entonces es importante mencionar que, el presente proyecto será la continuación de dicha investigación, y se basará principalmente en la optimización del biodigestor, esto con el objeto de mantener, mejorar y contribuir con las líneas de investigación desarrolladas hasta el momento.

Algunos datos fundamentales e importantes de la tesis anterior son: el lugar de operación del biodigestor, presenta un valor de temperatura media de 15 °C (INAMHI, 2010); el equipo cuenta con un sistema de calentamiento, el cual tiene como fin la elevación de la temperatura interna del biodigestor, al igual que contiene un instrumento de medición de temperatura que está diseñado para ofrecer una alta precisión y fiabilidad, tiene una precisión del 1% de la división de la escala, y un rango de medición que se encuentra especificado entre los 0 °F a 160 °F; además posee un manómetro que se encuentra diseñado para medir la presión y vacío de medios gaseosos, consta de un tornillo de calibración situado en el dial para volver a poner en cero el indicador (Barriga, 2014)

Una vez conocido, entendido y llevado a cabo el tema de investigación, los resultados obtenidos servirán entonces, como un aporte que permita fundamentar la idea de la inclusión

de un sistema de biogás a partir de residuos sólidos urbanos generados dentro del Distrito Metropolitano de Quito.

## 2.2. Marco conceptual

### 2.2.1. Temperatura

La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados, que a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión dando lugar a mayores producciones de biogás (Ortega, 2006).

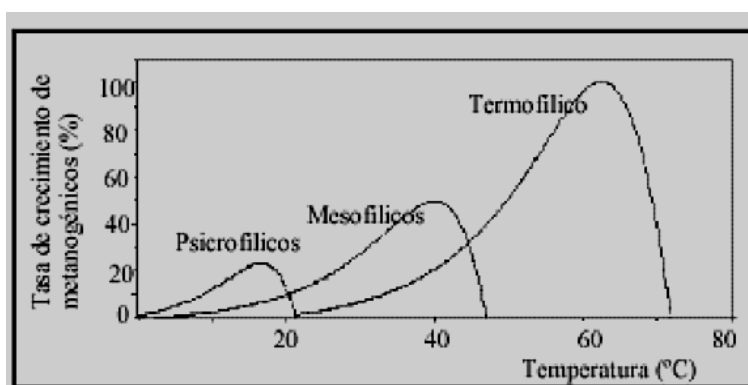
Para que se inicie el proceso de la biodigestión anaerobia, se necesita una temperatura mínima de 4° a 5° C, y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 70°C. Se realiza generalmente una diferenciación en tres rangos de temperatura de acuerdo al tipo de bacterias que predominan en cada una de ellas (Acosta & Obaya, 2005).

Tabla 14. Rangos de temperatura según el tipo de bacterias

BACTERIAS	RANGO DE TEMPERATURAS	SENSIBILIDAD
Psicrofilicas	menos de 20°C	+ - 2°C/hora
Mesofilicas	entre 20°C y 40°C	+ - 1°C/hora
Termofilicas	más de 40°C	+ - 0,5°C/hora

Fuente: Ortega, 2006, p.17.

Gráfico 2. Dependencia de la constante de crecimiento de la temperatura



Fuente: Ortega, 2006, p. 18

Hasta el momento, el rango psicrófilico ha sido poco estudiado y, en general, se plantea como poco viable debido al gran tamaño del reactor necesario. Sin embargo, presenta menores problemas de estabilidad que en los otros rangos de operación (Ortega, 2006).

El régimen mesofílico de operación es el más utilizado, a pesar de que en la actualidad se está utilizando cada vez más el rango termofílico para conseguir una mayor velocidad del proceso. Sin embargo, el régimen termofílico suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta además mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga (Ortega, 2006).

Tabla 15. Rangos de temperaturas y el tiempo de retención

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de retención
Sicrófilica	4-10 °C	15-18°C	25-30°C	Arriba de 100 días
Mesofílica	15-20 °C	28-33°C	35-45°C	30-60 días
Termofílica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente: Acosta & Obaya, 2005, p.5.

A temperaturas entre 40 y 50°C, las bacterias productoras de metano son inhibidas. La acción digestiva se debilita cerca a los 42°C, ya que esto representa la transición de organismos mesofílicos a termofílicos (Acosta & Obaya, 2005).

La temperatura influye no solo en las bacterias productoras de metano sino también en las bacterias productoras de ácidos. Por lo tanto, las fluctuaciones en la temperatura pueden ser ventajosas para ciertos grupos y desventajosas para otros. (Aguilar, 2013, p.23)

Es importante mencionar que, las bacterias metanogénicas son más sensibles a la temperatura en comparación con los demás microorganismos de un biodigestor, debido a que su velocidad de crecimiento es más lenta. El proceso de digestión anaerobio no se ve afectado si la temperatura aumenta en unos pocos grados; sin embargo, un decrecimiento podría retardar la producción de metano, sin perjudicar la actividad de las bacterias acidificantes, lo cual permite una excesiva acumulación de ácidos y una posible falla en el biodigestor. En este sentido, se debe procurar mantener un microclima cálido en el biodigestor para conservar una tasa de producción de biogás alta (Rivas, Vargas & Watson, 2009).

Una estrategia para aumentar la temperatura del biodigestor y, a la vez, mantenerla más constante, consiste en la construcción de una estructura liviana forrada con plástico de invernadero, la cual también contribuye a restringir el acceso de animales que puedan dañarlo (Rivas, Vargas & Watson, 2009).

La actividad biológica y por lo tanto la producción de gas aumenta con la temperatura. Al mismo tiempo se deberá tener en cuenta que al no generar calor el proceso, la temperatura deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior. El cuidado en el mantenimiento



también debe extremarse a medida que aumentamos la temperatura, dado que como se mencionó anteriormente que, las bacterias termofílicas tienen mayor sensibilidad a las pequeñas variaciones térmicas (Gualoto, 2013).

Otros de los factores que se ve íntimamente relacionado con la temperatura, son los tiempos que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación (Tiempo de retención Hidráulica, TRH). A medida que se aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención y en consecuencia se necesitará un menor volumen de reactor para digerir una misma cantidad de biomasa (Gualoto, 2013).

Aunque por lo anteriormente planteado parece ser más conveniente trabajar en el rango termófilo, esto no siempre es exactamente así en la práctica por diferentes motivos, siendo los principales los siguientes:

- Al aplicarse mayor temperatura hay un gasto mayor de energía en el propio proceso lo que puede en algunos casos atentar contra el aprovechamiento energético del biogás para otros usos (Acosta & Obaya, 2005).
- Los equipos, tuberías, válvulas y accesorios en general, son más costosos cuando se trabaja con temperaturas termófilas, así como su mantenimiento correspondiente (Acosta & Obaya, 2005).
- El proceso termófilo requiere de un mayor cuidado ya que los microorganismos que predominan en éste son mucho más sensibles a ligeros aumentos de concentración de materia orgánica, cambios de temperatura, cantidades de tóxicos en el residual, etc., que los microorganismos mesófilos (Acosta & Obaya, 2005).

Por otra parte, la solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura de manera que la materia orgánica es más accesible para los microorganismos aumentando así la velocidad del proceso. Por último, la viscosidad de sólidos y semisólidos disminuye al aumentar la temperatura lo que implica menores necesidades de agitación (Ortega, 2006).

### **2.2.2. pH**

La actividad enzimática (o el desempeño digestivo) es influenciado por el pH. Dicho parámetro en un digestor anaeróbico inicialmente decrecerá con la producción de ácidos volátiles. Sin embargo, como las bacterias productoras de metano consumen los ácidos volátiles y la alcalinidad es producida, el pH del digestor se incrementa y después se estabiliza. En un tiempo de retención hidráulica mayor a cinco días, las bacterias productoras de metano comienzan rápidamente a consumir los ácidos volátiles (Aguilar, 2013).

Una actividad enzimática aceptable de bacterias productoras de ácidos ocurre por encima de 5.0pH, pero una actividad enzimática aceptable de bacterias productoras de metano no ocurre por debajo de 6.2pH. La mayoría de las bacterias anaerobias, incluyendo las bacterias productoras de metano, se desempeñan adecuadamente dentro del rango 6.8 a 7.2, y esto ocurre a medida que los ácidos volátiles son convertidos a metano y dióxido de carbono, ya

que, el pH de un sistema anaeróbico es significativamente afectado por el contenido de dióxido de carbono del biogás (Acosta & Obaya, 2005).

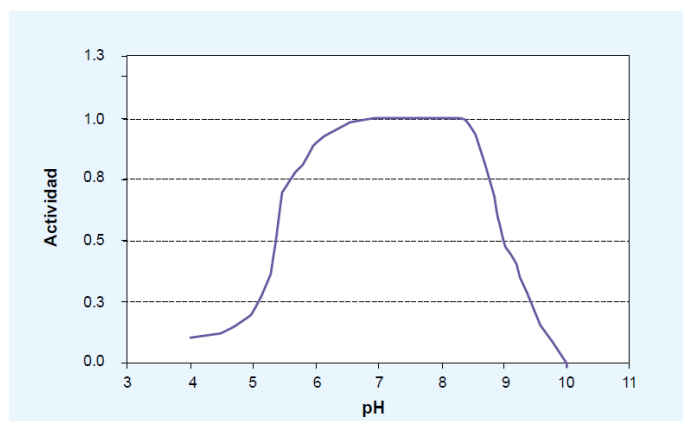
En cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un rango de pH diferenciado. El mayor problema generalmente es mantener el pH por encima de 6,6, ya que los ácidos orgánicos producidos como intermediarios en las primeras etapas debido a una sobrecarga o cualquier otro desequilibrio pueden provocar un rápido descenso del pH y el consiguiente cese de la producción de metano (Rittmann y McCarty, 2001).

Tabla 16. Rangos óptimos de pH para los diferentes microorganismos

Etapa	Tipo de bacterias	Rango óptimo pH
Hidrólisis	<i>Hidrolíticas acidogénicas</i>	7,2 – 7,4
Acidogénesis	<i>Hidrolíticas acidogénicas</i>	7,2 – 7,4
Acetogénesis	<i>Acetogénicas y homoacetogénicas</i>	7,0 – 7,2
Metanogénesis	<i>Metanogénicas hidrogenófilas y acetoclásticas</i>	6,5 – 7,5

Fuente: Burgos, 2013, p.21.

Gráfico 3. Dependencia del pH de la actividad metanogénica



Fuente: FAO, 2011, p. 45.

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6 ni subir de 8. La estabilidad de los digestores es incrementada por una elevación de pH. Un decremento por debajo del nivel de operación normal ha sido usado como un indicador de falla por resolver (Elizondo, 2005). Un decremento puede ser causado por tres razones:

1. Una acumulación de ácidos orgánicos debido a la falla de las bacterias productoras de metano al convertir los ácidos orgánicos a metano (Elizondo, 2005).
2. Una descarga de golpe de ácidos orgánicos hacia el digestor anaeróbico (Elizondo, 2005).

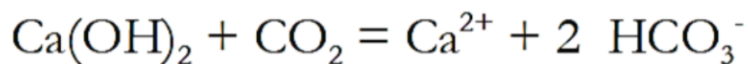
3. La presencia de desperdicios que inhiben la actividad de las bacterias productoras de metano. Un decremento en la alcalinidad usualmente precede a un cambio rápido en el pH (Elizondo, 2005).

Una vez que el pH ha empezado a descender diversos materiales pueden agregarse al digestor. Cada uno de ellos posee ventajas y desventajas, la elección sobre cual usar dependerá de la disponibilidad, el costo y las preferencias en almacenamiento y manejo. El mezclado es muy importante durante la adición de cualquier material, a fin de prevenir que se localice en un lugar específico dentro del digestor. Los materiales de uso más común son cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), Bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ), Carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), Hidróxido de Sodio ( $\text{NaOH}$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), o bicarbonato de amonio ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) (Acosta & Obaya, 2005).

Debido a su bajo costo, los más utilizados son el hidróxido de sodio, el amoníaco y la cal, sin embargo el uso de estos químicos implica riesgos considerables para la estabilidad del proceso que deben ser evaluados antes de introducirlos (Ortega, 2006).

La cal, es el material más común debido a su disponibilidad, relativo bajo costo y facilidad en el manejo (se prefiere el uso de cal apagada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sobre la cal viva  $\text{CaO}$  por el cuidado que la segunda implica en el manejo y en la dosificación). Sin embargo es la sustancia que implica riesgos mayores, y no puede mantenerse control de pH una vez que se ha elevado por encima de 6,8. Cuando la cal se agrega se remueve  $\text{CO}_2$  del líquido del digestor formando así  $\text{HCO}_3^-$  necesario para aumentar la alcalinidad, la reacción se da de la siguiente manera (Ortega, 2006).

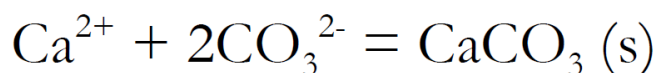
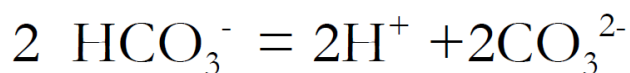
Ecuación 2



Como puede apreciarse para la reacción es necesario el consumo de dióxido de carbono, esta es la reacción ideal cuando hay una buena dosificación, sin embargo si se agrega más cal de la necesaria se agotará el dióxido presente en la fase líquida lo que hará que el  $\text{CO}_2$  presente en la fase gaseosa pase a fase líquida alterando el equilibrio, este desequilibrio resulta en la creación de vacío debido a la reducción de la presión total del gas. Si no se hace nada para liberar esta presión el digestor podría colapsarse (Ortega, 2006).

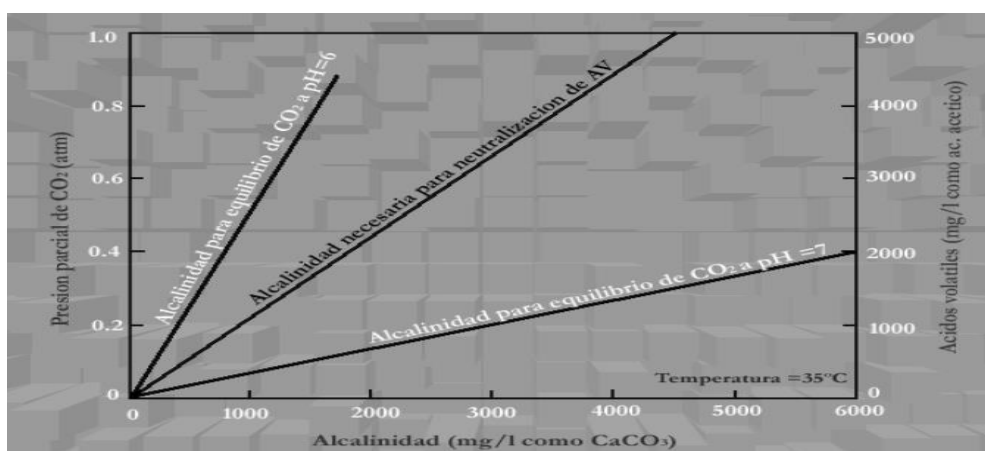
Un segundo costo para la formación de condiciones alcalinas mediante el uso de cal es la formación de  $\text{CaCO}_3(\text{s})$  (Ortega, 2006).

## Ecuación 3



A medida que la concentración del bicarbonato aumenta también aumenta la del carbonato de calcio, el cual al llegar a un cierto punto se precipita, este precipitado puede estar en suspensión igual que el resto de las partículas o puede formar incrustaciones dentro del equipo, de manera que tiene que ser retirada cierta cantidad lo que resulta en la remoción de alcalinidad de bicarbonato también. Se menciona que todas estas reacciones nocivas se presentan justo cuando se ha elevado el pH por encima de 6.8, si se continua agregando cal la concentración del CO<sub>2</sub> seguirá cayendo casi al 10% y el pH se incrementara hasta 8.0. (Ortega, 2006).

Gráfico 4. Diagrama de diseño para alcalinidad



Fuente: Ortega, 2006, p.59.

Cuando se adicionan hidróxidos o carbonatos al digestor se pueden evitar los problemas derivados de la formación de precipitados insolubles, sin embargo si se excede en la cantidad aplicada problemas de vacío se presentarán (Ortega, 2006).

Cuando se usa bicarbonato de sodio se evitan muchos problemas mencionados previamente como el consumo de CO<sub>2</sub>, pero su costo es más elevado y el sodio puede inhibir el proceso. Si es amoníaco el que va usarse, debe tenerse mucho cuidado en la dosificación ya que se presentaran problemas de toxicidad si se agrega demasiado (Ortega, 2006, p.59).

Es así que la introducción de materiales alcalinos debe hacerse con mucho cuidado y pleno conocimiento de las reacciones secundarias que tienen lugar o mejor evitar su adicción. Otra

medida que se toma en caso de que la producción de ácidos se eleve consiste en inyectar agua al proceso para diluir tanto la carga orgánica como la concentración de ácidos formados hasta ese momento (Ortega, 2006, p.59).

Los ácidos volátiles y la alcalinidad son medidos a fin de conocer el avance del proceso y así poder tener un control del mismo. Usualmente los resultados de las pruebas se expresan en forma de un cociente (acidez/ Alcalinidad). El digestor trabaja mejor cuando los AGV (ácidos grasos volátiles)/Alc (alcalinidad) es menor a 0.25, y algunos prefieren mantenerlo a 0.15. Esto quiere decir que la alcalinidad es cuatro veces mayor que la acidez, un margen suficiente para amortiguar los efectos de una variación en la carga de alimentación (Ortega, 2006, p.59).

Es importante mencionar que, el valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas (Comisión Nacional de Energía, 2007).

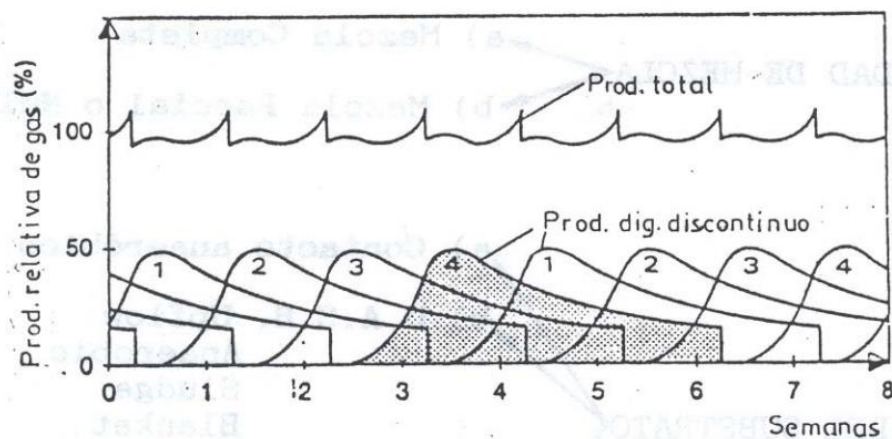
### **2.2.3. Digestor discontinuo**

También llamados sistemas de “primera generación”. La característica principal de este grupo de fermentadores es, como su propio nombre lo indica, la carga discontinua, la cual se efectúa de una vez y se inocula con biomasa microbiana de la digestión precedente, para favorecer el arranque de la fermentación. Estos digestores se han diseñado preferentemente para tratar residuos orgánicos con alto contenido en sólidos y, por lo tanto, los periodos de retención hidráulica son bastante prolongados. Dentro de este sistema se encuentran los digestores de tipo familiar de China y de India usados desde la antigüedad (Aguilar, 2013).

En un sistema discontinuo, la curva de evolución temporal de la producción de biogás sigue la misma tendencia que la curva típica del crecimiento de microorganismos (latencia, crecimiento exponencial, estacionalidad y decrecimiento). Para conseguir una producción de biogás cercana a la continuidad deben combinarse varios reactores discontinuos con puestas en marcha intercaladas en el tiempo (IDEA, 2007).

Este tipo de digestores son eficaces para la digestión de materiales celulósicos que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de alimentación y salida. Su utilización no está muy difundida (IDEA, 2007).

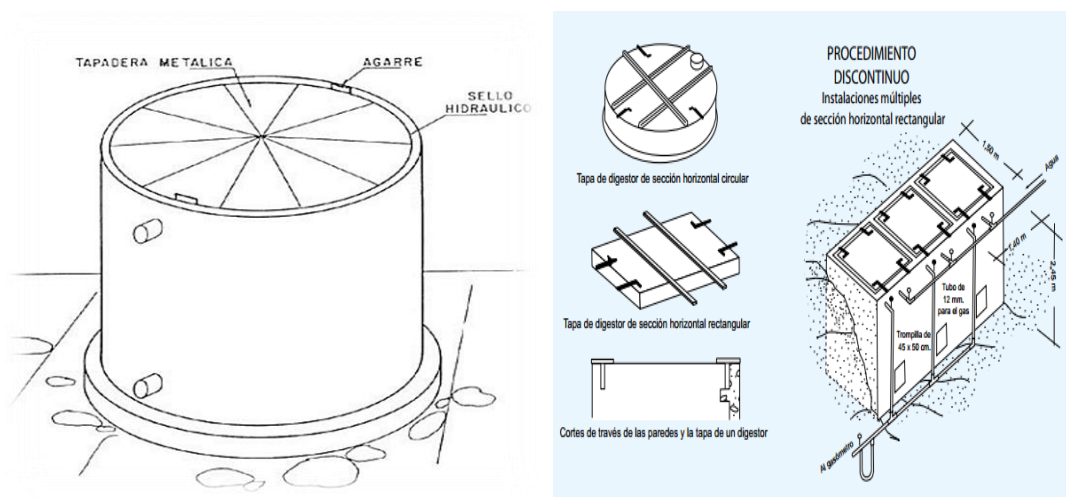
Figura 4. Producción de gas en función del tiempo de un sistema Batch de 4 reactores



Fuente: Rivas, 2010, p. 30.

En esas plantas al comienzo hay mucha masa orgánica y pocas bacterias y al final tienen muchas bacterias y poca masa orgánica. La operación involucra principalmente cargar un biodigestor que permanecerá cerrado con sustrato, un inoculante (20%) y en algunos casos, una base para mantener el pH casi neutral. El digestor es sellado, y la fermentación se realiza entre 30 y 180 días, dependiendo de la temperatura ambiente. Durante este período, la producción de gas aumenta paulatinamente hasta un máximo y luego declina. Esta fermentación se puede realizar con un contenido de sólidos orgánicos de 6 a 10%. La producción de biogás en este tipo de digestores es de 0,5 a 1,0 m<sup>3</sup> biogás/m<sup>3</sup> digestor (Rivas, 2010).

Figura 5. Biodigestor Discontinuo o Batch



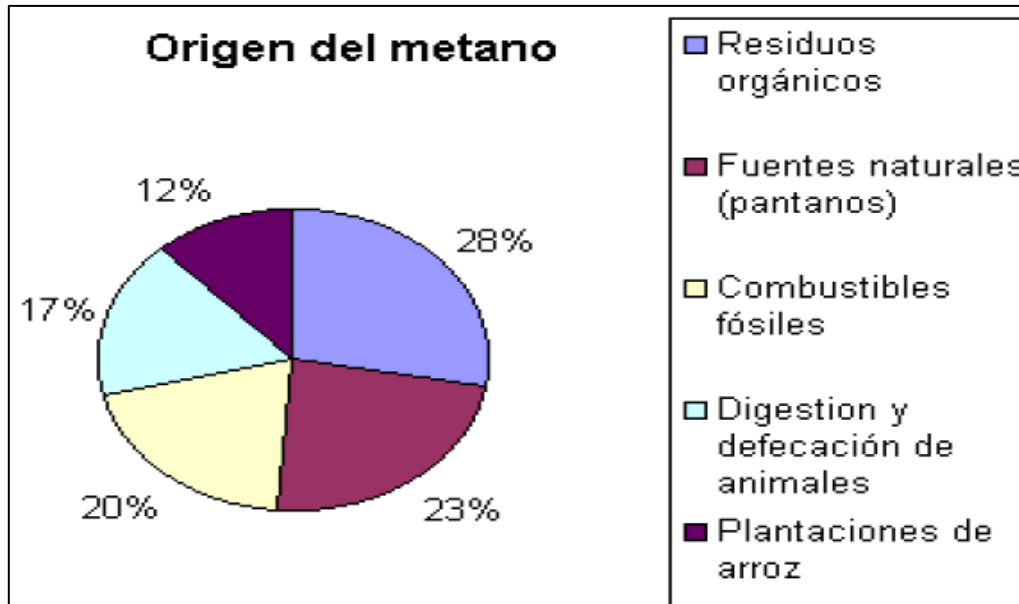
Fuente: FAO, 2011, p. 102.

#### 2.2.4. Metano

El metano es un gas incoloro, inodoro, inflamable y más ligero que el aire. Se emplea como combustible y es un componente principal de gas natural. También se emplea en la fabricación de sustancias químicas tales como acetileno, cianuro de hidrogeno, hidrogeno y metanol. Se lo conoce también como gas de los pantanos y es el segundo gas que más contribuye al efecto invernadero (Instituto Nacional de Ecología, 2002)

En cuanto al biodigestor, el metano se crea sobre todo mediante las bacterias que se alimentan de material orgánico cuando escasea el oxígeno. Por tanto, el metano emana de fuentes naturales y de fuentes influidas por el hombre, siendo mayoría estas últimas. Las fuentes influidas por el hombre son la minería y la quema de combustibles fósiles, la cría de animales (el ganado se alimenta de plantas que fermentan en sus estómagos, por lo que exhalan metano que también está presente en el estiércol), el cultivo de arroz (los arrozales inundados producen metano porque la materia orgánica en el suelo se descompone sin oxígeno suficiente) y los vertederos (aquí también, los residuos orgánicos se descomponen sin oxígeno suficiente) (Herrero, 2008).

Figura 6. Origen del metano



Fuente: Arce, 2011, p. 18.

Tabla 17. Producción de metano en residuos de frutas y vegetales (rango mesofílico 35°C)

<b>Residuo</b>	<b>SV (% de ST)</b>	<b>Producción de metano (m<sup>3</sup>/t SV alimentado)</b>
Mango	95,7	469
Plátano	91,2	292
Naranja	93,5	479
Mandarina	94,6	471
Limón	96,8	473
Piña	93,9	356
Uva	91,1	232
Tomate	95,3	298
Cebolla	88,2	400
Patata	90,9	267
Berenjena	92,6	385
Coliflor	84,6	261
Nabo	84,4	314
Rábano	83,3	299

Fuente: Agencia Andaluza de la Energía, 2011, p. 42.



## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1. Tamaño de la muestra

Una muestra puede definirse simplemente como un subconjunto de la población. La función principal de la muestra es permitir que los investigadores lleven a cabo el estudio de los individuos de la población, de manera tal que los resultados de su estudio puedan ser utilizados para sacar conclusiones que se aplicarán a toda la población. (Martínez, 2012, p.30)

Esta característica es conocida como representatividad, y es un criterio fundamental en la toma de muestras, para su cumplimiento, es necesario establecer el tamaño de la muestra y diseñar un procedimiento de selección de la misma que sea capaz de elegir aquellos elementos que realmente son representativos de la población (Acuña, 2003).

En referencia a la representatividad y confiabilidad de las muestras, se puede establecer que las mismas fueron tomadas en el mercado municipal de la Ofelia, el cual se encuentra ubicado en el mismo sector. Se aplicó el criterio fundamental del azar, es decir cualquier miembro de la población muestral tuvo la misma probabilidad de incorporarse en la muestra, esto junto a que el manejo y registro de los datos estuvo a cargo del investigador proponente aumentan el grado de confiabilidad de las muestra.

Las fórmulas utilizadas y la explicación de la misma pueden observarse a continuación:

Para la determinación del tamaño de la muestra del proyecto de investigación, se utilizó la fórmula de la densidad y las fórmulas para calcular el volumen, básicamente lo que se realizó es determinar la densidad del sustrato e igualmente el volumen que ocupa el mismo, de esta manera se pudo establecer que cantidad de residuos orgánicos es introducida en el biodigestor.

#### Densidad

La densidad de la mezcla fue determinada de forma empírica, primero una cantidad desconocida de materia prima húmeda fue pesada en una balanza, como paso siguiente la muestra fue comprimida en forma de pellet, se obtuvieron las medidas del cilindro, radio y altura, y se calculó la densidad a partir de la fórmula:

Ecuación 4. Densidad

$$\rho = \frac{m}{v}$$

(Tipler, 2006 p.366).

Donde;

$\rho$ : Densidad de la muestra [ $gcm^3$ ]

$m$ : Masa de la muestra [g]

$v$ : Volumen de la muestra [ $cm^3$ ]

Como no se posee el volumen del cilindro se realiza la siguiente operación:

Ecuación 5. Volumen de un Cilindro

$$v = \pi * r^2 * h$$

Dónde:

$r$ : Radio del cilindro

$h$ : Altura del cilindro

Volumen

#### 1. Volumen del digestor

El volumen del biodigestor es un parámetro que varía de acuerdo a la densidad del residuo, el tiempo de retención considerado (45 días) y la carga alimentada al equipo. La ecuación establecida permitió el cálculo de este parámetro:

Ecuación 6. Cálculo del volumen del biodigestor

$$VD = E * TR * \frac{1}{\rho}$$

(Chugandro & Manitio, 2010 p.59)

Donde;

$VD$ : Volumen del Digestor ( $m^3$ )

$E$ : Carga alimentada al digestor ( $kg/día$ )

$TR$ : Tiempo de retención (días)

$\frac{1}{\rho}$ : Densidad ( $\frac{m^3}{kg}$ )

#### 2. Volumen de la campana de gas

Durante la alimentación del digestor con la materia orgánica es importante que el equipo sea llenado hasta el 50% del volumen total, el 50% restante tiene que ser ocupado por el gas, este volumen sirvió como un gasómetro integrado para el almacenamiento del biogás dentro del tanque principal. (Barriga, 2014, p.60)

El volumen de la campana de gas es calculado a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 7. Volumen del gasómetro

$$VC = VD * \frac{0.50}{0.50}$$

(Chungandro & Manitio, 2010, p.60)

Donde;

*VC*: Volumen del gasómetro

*VD*: Volumen del digestor

### 3. Volumen real del digestor

El volumen real del digestor puede definirse como el volumen total que ocupa la campana de gas y el volumen de los residuos orgánicos. Dicho volumen es calculado a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Volumen Real del Digestor

$$VDR=VC+VD$$

(Chugandro & Manitio, 2010 p.59)

Donde;

*VDR*: Volumen Real del Digestor

*VC*: Volumen de la Campana de gas

*VD*: Volumen del Digestor

## 3.2. Procedimiento

Para obtener un buen resultado del biodigestor, es fundamental seguir un conjunto de procedimientos que permiten el correcto funcionamiento del equipo, desde el inicio hasta el final, a continuación se citaran las actividades realizadas en esta investigación.

1. Se procedió con la limpieza del biodigestor, tanto en la parte interna como externa, además de los alrededores de la instalación.
2. Se cambió el plástico ubicado alrededor del equipo, esto con el objetivo de mantener el calor.
3. Se revisó el funcionamiento de los instrumentos y elementos que permiten el control de variables dentro del biodigestor: manómetro, termómetro y medidor de pH (equipo que cuenta con la garantía del fabricante y que ha estado en permanente mantenimiento para asegurar su correcto funcionamiento).
4. Se calibró el medidor de pH

5. Se realizó pruebas de fugas dentro del biodigestor, la misma que tiene como fin determinar si es que existe algún escape de biogás.
6. Se taparon las fugas existentes en el biodigestor.
7. La selección de la muestra de residuos sólidos orgánicos urbanos se realizó en el mercado de la Ofelia, dentro del Distrito Metropolitano de Quito. En este sitio se obtuvo cantidades equivalentes de residuos sólidos orgánicos (cuatro quintales aproximadamente), los cuales fueron recolectados bajo el criterio del azar.
8. Se estableció a que categoría de residuo orgánico pertenece la muestra ingresada: Plantas leguminosas, Frutas en descomposición, podas de jardín (quicuyo), tejidos animales, entre otros.  
Esto permitió establecer por medio de fuentes secundarias la posible relación carbono nitrógeno que tendrá el sustrato.
9. Se realizó un pre tratamiento a los residuos sólidos orgánicos, independientemente del tamaño de la muestra y del tipo de muestreo con el que ha de trabajarse es fundamental cumplir con todos los procedimientos que permiten el inicio de operaciones en el digestor.
  - a. La muestra fue sometida a un proceso de mezcla de forma manual, antes de ingresar al equipo.
  - b. Se disminuyó el tamaño de partícula de los residuos, dicha reducción es importante ya que permitió que la población bacteriana degrade el sustrato a mayor velocidad, necesitando menor tiempo para cumplir con el proceso degradativo, además fue necesaria por la características de diseño que presenta el equipo (Corace, et.al, 2006). Este proceso fue realizado con la ayuda de una trituradora de una planta florícola, el tamaño de salida de la partícula fue de aproximadamente un centímetro de diámetro.
10. Se extrajo una muestra del sustrato y se determinó la densidad de forma empírica, mediante la compresión de la muestra en un pellet, la determinación de su masa y también su volumen por medio de la medición de su altura y radio.
11. Se realizó la caracterización fisicoquímica de los residuos sólidos orgánicos:

Potencial Hidrógeno, Temperatura, Sólidos Totales, Sólidos Orgánicos Volátiles, y nutrientes como N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn, Ba.

- a) La determinación de la temperatura y el potencial de hidrógeno, se realizó in situ, con la ayuda de un multiparámetro modelo Thermoscientific Orion 4 Star.
- b) Los parámetros de Sólidos Totales y Sólidos Orgánicos Volátiles fueron analizados en el laboratorio, a partir de una muestra de 100 g directamente extraída de la materia prima que alimentó al equipo, cada parámetro fue analizado por duplicado. Para dicha determinación, es importante mencionar que se siguió la metodología establecida por la APHA.

### Sólidos Totales

El Método para la determinación de este parámetro es el mismo establecido en el Standard Methods de la APHA, codificado como SM 2540-B. Es empleado para la determinación de la fracción sólida dentro de una muestra de agua, sin embargo es útil para determinar la cantidad de agua o porcentaje de humedad que posee un residuo al someterlo a una temperatura de entre 103 °C a 105 °C por 24 horas; la diferencia entre el peso del residuo húmedo y el residuo húmedo junto a la cápsula que lo contiene indica el valor de humedad.

Ecuación 9. Cálculo del Porcentaje de Humedad %

$$\text{Humedad} = \frac{A - B}{A - C} * 100$$

(APHA, 1995, p.217)

Dónde:

A: Peso cápsula + muestra húmeda [g]

B: Peso cápsula + muestra seca [g]

C: Peso cápsula. [g]

### Sólidos Volátiles

Se pueden definir como la fracción orgánica de los sólidos totales o como la porción de sólidos totales que se volatilizan durante la calcinación. La determinación de este parámetro sigue la metodología S.M. 2540-E, establecida en el Standard Methods. En este proceso se sometió a la materia orgánica a temperaturas superiores a los 550 °C por un periodo determinado de tiempo de cuatro horas, y se determinó que porción de la materia orgánica se ha volatilizado y que fracción permanece fija, usando la diferencia de peso como indicativo principal (APHA, 1995). El valor de los sólidos orgánicos totales pudo calcularse por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 10. Cálculo del porcentaje de Sólidos Orgánicos Totales

$$\%TS = \frac{m1 - m2}{m0} * 100$$

(APHA, 1995)

Dónde:

$m_0$ : Peso cápsula + muestra húmeda

$m_1$ : Peso cápsula + muestra seca

*m*<sub>2</sub>: Peso cápsula + muestra calcinada

- c) Se analizó la cantidad de nutrientes contenida en el sustrato como: P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn, Ba, este proceso se lo realizó en el INIAP (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias), en los laboratorios ubicados en la Estación Experimental Santa Catalina, para este proceso se extrajo 1 kg de la muestra.
12. Se pesó la cantidad de residuos que se debía ingresar al digestor, esto dependió de los resultados de la densidad previamente establecida.
  13. Se trasladó la materia orgánica a pequeñas fundas, para de esa manera hacer más fácil y menos pesado el transporte del material al digestor.
  14. Se ingresó la materia orgánica dentro del digestor, por medio de la boca de alimentación de cuatro pulgadas de diámetro, ubicada en la parte superior del tanque de alimentación.
  15. Se cerró el biodigestor, tanto la boca de alimentación como la válvula de salida de gas y la válvula de salida de fertilizante orgánico líquido.
  16. Se conectó el sistema de mantenimiento de la temperatura y se inició el proceso de digestión.
  17. Se ejecutó el control de parámetros, temperatura y presión, esto se lo realizó in situ y desde el inicio de la operación; esta toma de datos fue diaria, los valores recolectados fueron registrados en una hoja de cálculo inteligente de forma que puedan ser analizados posteriormente.
  18. Se tomó también otro parámetro indispensable para el desarrollo del proceso anaerobio, el potencial de hidrógeno, dicho parámetro fue obtenido mediante una toma de muestra dentro del biodigestor.  
La extracción de la muestra se la realizó por medio de la válvula de salida del fertilizante orgánico líquido, esta medida fue tomada diariamente junto con los parámetros anteriores.
  19. Se realizó la agitación manual, por medio de una manivela en media luna, ubicada en la parte superior del tanque de digestión, esta actividad se hizo a diario, por un periodo de tiempo de 10 minutos, con la finalidad que los elementos del fondo recirculen y se pueda activar a las poblaciones bacterianas que lo habitan.
  20. Se ejecutó una Cuantificación de los Productos
    - a. Para el caso del biol (líquido) y el biosol (sólido o lodo), su extracción se realizó usando el sitio de desfogue principal, y se hizo una vez que el periodo de retención establecido culminó, en este caso en el día 45.
    - b. Para el caso del componente gaseoso se realizó la prueba de gas, útil para verificar la generación del biogás en condiciones de baja productividad, para este proceso, se procedió a extraer los gases contenidos en el biodigestor, esto por medio de la válvula de gases que se encuentra en la parte superior.  
Se abrió la llave de la válvula, sin extraer el corcho, en dicho corcho se inyectó una jeringa y se procedió a extraer los gases contenidos.

Una vez obtenida la muestra, se destapó la jeringa que contenía los componentes gaseosos, y se acercó a un fósforo prendido, si la llama sufre un cambio de color es indicativo que en la mezcla existe presencia de metano.

21. Se realizó la extracción del material sobrante que se encontraba dentro del biodigestor.

#### Segunda carga

22. Se volvió a repetir el mismo proceso y se repitió la operación.

23. En vista de que la medida de pH tomada diariamente no se encontraba en los valores óptimos, se decidió poner al tercer día de iniciado el proceso, una solución de cal para de esa manera elevar los valores.

24. Debido a que la solución de cal cambio radicalmente los valores de pH, se realizó un análisis de contaje total microbiano, utilizando el método de determinación de la cantidad de microorganismos aerobios mesófilos, establecido por la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1 529-5:2006, esto con el objetivo de visualizar si existe la presencia de bacterias en el material.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Levantamiento de datos

Se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica, en relación a los valores registrados de densidad, sólidos totales, y sólidos orgánicos totales.

##### 4.1.1. Densidad

La determinación de este parámetro fue desarrollado de forma empírica, es decir a través de la compresión de la muestra en un pellet, la determinación de su masa y también su volumen a través de la medición de su altura y radio.

$$\text{Volumen del cilindro} = \pi * r^2 * h$$

$$V \text{ Primera Carga} = \pi * (0.65\text{cm})^2 * 0.9\text{cm} = 1,1946\text{cm}^3$$

$$\rho \text{ Primera carga} = \frac{m}{v} = \frac{1,0208}{1,1946} = \frac{0,8545 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

$$V \text{ Segunda Carga} = \pi * (0.9\text{cm})^2 * 1\text{cm} = 2.5447\text{cm}^3$$

$$\rho \text{ Segunda carga} = \frac{m}{v} = \frac{1,0032}{2,5447} = \frac{0,3942 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

##### 4.1.2. Volumen

1. Volumen del digestor

$$VD = E * TR * \frac{1}{\rho}$$

$$VD = \frac{9,49 \text{ kg}}{\text{dia}} * 45 \text{ dias} * \frac{1\text{m}^3}{854.5 \text{ kg}}$$

$$VD = 0,499\text{m}^3$$

2. Volumen de la campana de gas

$$VC = VD * \frac{0,5}{0,5}$$

$$VC = 0,499\text{m}^3 * \frac{0,5}{0,5}$$

$$VC = 0,499 \text{ m}^3$$



## 3. Volumen real del digestor

$$VDR = VC + VD$$

$$VDR = 0,499m^3 + 0,499m^3$$

$$VDR = 0,998 m^3$$

## 4.1.3. Sólidos totales

Tabla 18. Porcentaje de humedad en residuos en la Primera Carga

Muestra	Peso Del Crisol	Peso De La Muestra Húmeda	Crisol + Muestra	Crisol + Muestra Seca
1	36,8482	10,0063	46,8545	37,9561
2	34,1810	10,0558	44,2368	35,2178
			Humedad % (1)	88,92
			Humedad % (2)	89,68

Elaborado por: Pazmiño, 2015

$$\%Humedad(1) = \frac{46,8545 - 37,9561}{46,8545 - 36,8482} * 100 = 88,92$$

$$\%Humedad(2) = \frac{44,2368 - 35,2178}{44,2368 - 34,1810} * 100 = 89,68$$

Tabla 19. Porcentaje de humedad en residuos en la segunda carga

Muestra	Peso Del Crisol	Peso De La Muestra Húmeda	Crisol + Muestra	Crisol + Muestra Seca
1	22,1288	10,0142	32,143	23,8164
2	20,8645	10,1335	30,998	23,0065
			Humedad % (1)	83,1479
			Humedad % (2)	78,8622

Elaborado por: Pazmiño, 2015

$$\%Humedad (1) = \frac{32,143 - 23,8164}{32,143 - 22,1288} * 100 = 83,1479$$

$$\%Humedad(2) = \frac{30,998 - 23,0065}{30,998 - 20,8645} * 100 = 78,8622$$

Los residuos sólidos de frutas y vegetales se caracterizan, en general, por su elevado contenido en humedad (>80%) y en sólidos volátiles (SV), pudiendo llegar a ser más del 95%

de los sólidos totales (ST), presentando además una elevada biodegradabilidad (Vereda, 2006).

Como se puede ver en los resultados obtenidos, el contenido total de sólidos (ST) se encontró entre los valores de 12% los de la primera carga y 22% los de la segunda carga, lo que lleva a la conclusión que las dos cargas se encontraba fuera del límite (10 %en peso) de los valores óptimos de los sólidos totales, para no realizar la adición de agua.

#### 4.1.4. Sólidos Volátiles

Tabla 20. Porcentaje de Sólidos Orgánicos Totales Primera Carga

Muestra	Peso Del Crisol	Peso De La Muestra Húmeda	Crisol + Muestra Incinerado		
1	36.8482	10.0063	36.9283		
2	34.181	10.0558	34.2638		
(1) Sólidos Volátiles (g)			9.9262	%Sólidos Volátiles	99.1995
(2) Sólidos Volátiles (g)			9.9685	%Sólidos Volátiles	99.1318

Elaborado por: Pazmiño, 2015

$$\text{Sólidos Volátiles (1)} = (36,8482 + 10,0063) - 36,9283 = 9,9262 \text{ g}$$

$$\text{Sólidos Volátiles (2)} = (34,181 + 10,0558) - 34,2638 = 9,9685 \text{ g}$$

Tabla 21. Porcentaje de Sólidos Orgánicos Totales Segunda Carga

Muestra	Peso Del Crisol	Peso De La Muestra Húmeda	Crisol + Muestra Incinerado		
1	22,1288	10,0142	22,3455		
2	20,8645	10,1335	21,2353		
(1)Sólidos Volátiles (g)			9,7975	%Sólidos Volátiles	97,8360
(2)Sólidos			9,7627	%Sólidos	96.3408

	Volátiles (g)		Volátiles
--	---------------	--	-----------

Elaborado por: Pazmiño, 2015

$$\%oTS (1) = (22,1288 + 10,0142) - (22,3455) = 9,7975 g$$

$$\%oTS (1) = (20,8645 + 10,1335) - (21,2353) = 9,7627g$$

En los sólidos volátiles (SV) se pudo determinar que más del 96% pertenecen a esta categoría.

Según estudios se dice que en general, la fracción orgánica incluye: un 75% de azúcares y hemicelulosa, 10% de celulosa y 5% de lignina. Es precisamente este elevado contenido (75%) de materia orgánica fácilmente biodegradable en los residuos vegetales, junto con su elevada humedad, los factores determinantes que aconsejan su tratamiento biológico y determinan su adecuación para el tratamiento por digestión anaerobia.

#### 4.1.5. Nutrientes

Tabla 22. Concentración inhibitoria de algunas sustancias contenidas en el biodigestor

Sustancia	Concentración Estimuladora (mg/kg)	Concentración Inhibidora Moderadamente (mg/kg)	Concentración Inhibidora Fuertemente (mg/kg)	Resultados Primera Carga (mg/kg)	Resultados Segunda Carga (mg/kg)
Cu	-	100	-	3	10
Fe	-	-	-	272	3079
Mn	-	-	-	9	63
Zn	-	3	-	9	32
Ca	100-200	2500-4500	8000	1800	7200
P	-	-	-	5600	3300
Mg	75-150	1000-1500	3000	1800	2000
K	200-400	2500-4500	12000	63500	53000
Na	100-200	3500-5500	8000	1100	700

Elaborado por: Pazmiño, 2015

Como se mencionó con anterioridad, la caracterización fisicoquímica de la materia orgánica se realizó en los laboratorios del INIAP, estación Santa Catalina, los resultados en relación a la valoración de P, K, Mg, Mn, Cu, Zn, Fe, Ca determinaron que el único compuesto que se encuentra actuando de manera estimulante al proceso es el Cu, ya que el resto de los elementos se ubicaron en los rangos superiores a los óptimos, es decir estaban actuando como

inhibidores, especialmente el K y el Zn ya que superaron con valores extremos los límites establecidos. Los resultados obtenidos en el análisis se pueden visualizar en el Anexo A.

#### 4.1.6. Relación Carbono Nitrógeno

Tabla 23. Relación Carbono- Nitrógeno de la materia introducida en el biodigestor

Residuo	%C	%N <sub>2</sub>	Relación C/N
Tubérculo	30	1,5	20:01
Remolacha	-	-	23:01
Leguminosas	-	-	28:1
Porotos	-	-	38:1
Habas	-	-	29:1
Hortalizas	30	1,8	17:1
Tomate	-	-	12:1
Cebolla	-	-	15:1
Hojas Secas	41	0,5-1	41:1
Desperdicios de verduras	-	-	35:1
Frutas	-	1,52	34,8

Fuente: FAO, 2011.

## 4.2. Presentación de Resultados

### 4.2.1. Temperatura

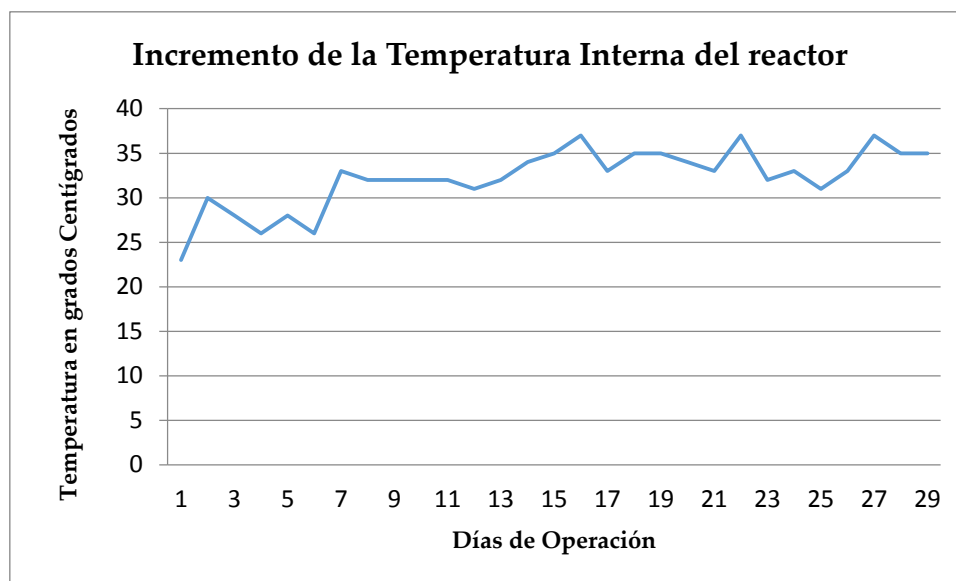
La variable temperatura fue monitoreada de forma diaria, con el instrumento de medición (termómetro), y reflejó el valor de la temperatura interna del sustrato que se depositó en el reactor (Barriga, 2014). De acuerdo a las mediciones realizadas en campo se pudo determinar que:

Tabla 24. Temperatura en el interior del biodigestor en la primera carga

<b>Día</b>	<b>Temperatura Grados Fahrenheit</b>	<b>Temperatura Grados Centígrados</b>
13/03/2015	74	23
16/03/2015	87	30
17/03/2015	84	28
18/03/2015	80	26
19/03/2015	84	28
20/03/2015	80	26
23/03/2015	93	33
24/03/2015	91	32
25/03/2015	90	32
26/03/2015	90	32
27/03/2015	90	32
30/03/2015	88	31
01/04/2015	90	32
02/04/2015	94	34
06/04/2015	96	35
07/04/2015	100	37
08/04/2015	92	33
09/04/2015	96	35
10/04/2015	96	35
13/04/2015	94	34
14/04/2015	92	33
15/04/2015	100	37
16/04/2015	90	32
17/04/2015	92	33
20/04/2015	88	31
21/04/2015	92	33
22/04/2015	100	37
23/04/2015	96	35
24/04/2015	96	35

Elaborado por: Pazmiño 2015

Gráfico No1.Incremento de la Temperatura Interna del reactor en la primera carga



Elaborado por: Pazmiño, 2015

La variable temperatura como se mencionó anteriormente, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, es por tal motivo que los datos obtenidos se lo realizó de forma diaria, y se puede decir que, el biodigestor en el que se realizó el proceso operó en el rango mesofílico, es decir entre 25 y 45°C.

El primer día su medición en campo correspondía a un valor de 23°C, el día 45 en donde finalizó el proceso de digestión anaerobia el valor de la temperatura llegó a 35°C, entonces se puede destacar que durante todo el ensayo los valores de temperatura fueron prácticamente subiendo, a pesar de que dicha elevación no haya sido uniforme, ya que al mismo tiempo en varios días se manifestaron algunos descensos de temperatura en dos grados máximo, con respecto al día anterior. A partir del décimo día, se superó la barrera de los 30 °C y hasta el día final del ensayo no se llegó a valores superiores de los 37 °C.

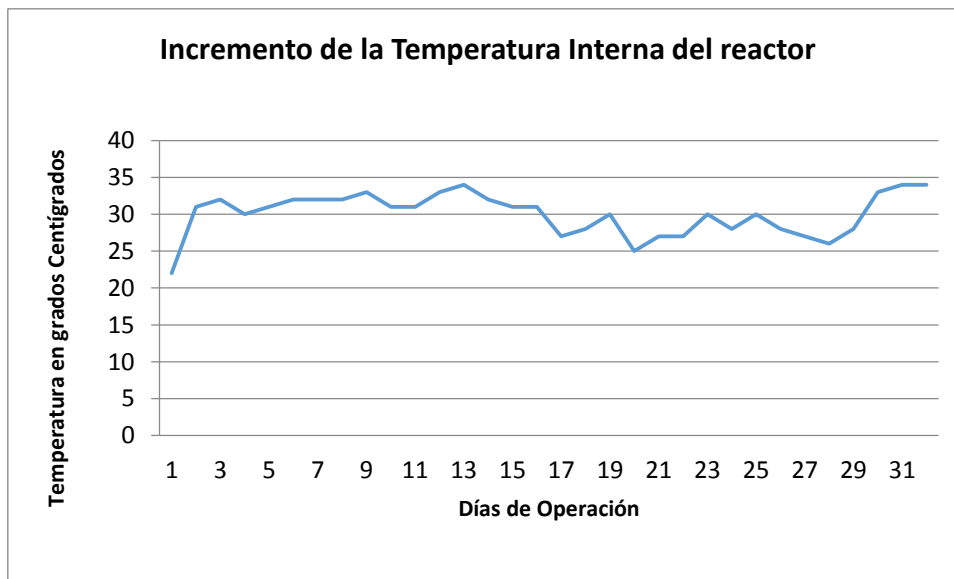
Si bien existió un aumento de los valores en los 45 días de duración del ensayo, es también importante destacar que el mantenimiento de los valores de temperatura se considera más importante que el aumento en si (Mosquera & Martínez, 2012). Esto debido a que para un óptimo funcionamiento del digestor, se recomienda que el tratamiento anaeróbico se diseñe para que opere con variaciones de temperatura que no excedan los 0.6 – 1.2 °C /día (FAO, 2011).

Tabla 25. Temperatura en el interior del biodigestor en la segunda carga

<b>Día</b>	<b>Temperatura Grados Fahrenheit</b>	<b>Temperatura Grados Centígrados</b>
2/05/2015	72	22
4/05/2015	88	31
5/05/2015	90	32
6/05/2015	86	30
7/05/2015	88	31
8/05/2015	90	32
11/05/2015	90	32
12/05/2015	91	32
13/05/2015	92	33
14/05/2015	88	31
15/05/2015	88	31
18/05/2015	92	33
19/05/2015	94	34
20/05/2015	90	32
21/05/2015	89	31
22/05/2015	89	31
25/05/2015	81	27
26/05/2015	84	28
27/05/2015	86	30
28/05/2015	78	25
29/05/2015	82	27
1/06/2015	82	27
2/06/2015	86	30
3/06/2015	84	28
4/06/2015	86	30
5/06/2015	83	28
8/06/2015	81	27
9/06/2015	80	26
10/06/2015	84	28
11/06/2015	92	33
12/06/2015	94	34
15/06/2015	94	34

Elaborado por: Pazmiño 2015

Gráfico 5. Incremento de la Temperatura Interna del reactor en la Segunda Carga



Elaborado por: Pazmiño 2015

El biodigestor operó nuevamente en el rango mesofílico, el primer día su medición en campo correspondía a un valor de 22°C, y el último día la temperatura llegó a 34°C. Los datos lastimosamente no sufrieron el incremento esperado, ya que se puede evidenciar algunas declinaciones significantes de dicho parámetro, debido a que los descensos de temperatura superaron los de la primera carga, es decir subieron a cinco grados máximo, con respecto al día anterior. Nuevamente se sufren variaciones bruscas de temperatura en el digestor, lo que significó una desestabilización en el proceso.

Es importante mencionar que, todos los microorganismos presentes en el biodigestor pueden resistir cambios variables de temperatura hasta un lapso de dos horas aproximadamente, y pueden retomar rápidamente a los ritmos normales de producción de metabolitos cuando la temperatura se restablece. Sin embargo, cuando la temperatura cae numerosas veces por un tiempo prolongado, esto puede conducir a un desbalance en la proporción de microorganismos. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura (FAO, 2011).



#### 4.2.2. Potencial Hidrógeno

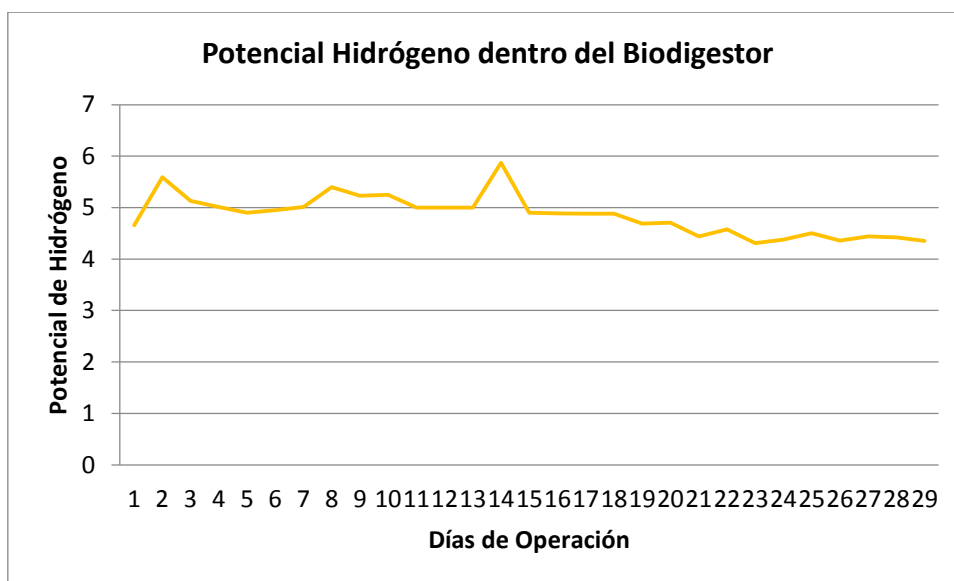
La variable pH fue monitoreada de forma diaria, con el instrumento de medición destinado para este fin (multiparametro), y reflejo el valor del pH del sustrato que se depositó en el reactor. De acuerdo a las mediciones realizadas en campo se pudo determinar que:

Tabla 26. Potencial Hidrógeno en el interior del biodigestor en la Primera carga

<b>Día</b>	<b>Potencial de Hidrógeno</b>
13/03/2015	4,66
16/03/2015	5,59
17/03/2015	5,13
18/03/2015	5,01
19/03/2015	4,90
20/03/2015	4,95
23/03/2015	5,01
24/03/2015	5,40
25/03/2015	5,23
26/03/2015	5,25
27/03/2015	5,00
30/03/2015	5,00
01/04/2015	5,00
02/04/2015	5,87
06/04/2015	4,90
07/04/2015	4,89
08/04/2015	4,88
09/04/2015	4,88
10/04/2015	4,69
13/04/2015	4,71
14/04/2015	4,44
15/04/2015	4,58
16/04/2015	4,31
17/04/2015	4,38
20/04/2015	4,50
21/04/2015	4,36
22/04/2015	4,44
23/04/2015	4,42
24/04/2015	4,35

Elaborado por: Pazmiño, 2015

Gráfico 6. Potencial Hidrógeno dentro del Biodigestor en la Primera carga



Elaborado por: Pazmiño, 2015

El Potencial Hidrógeno fue la variable de mayor fluctuación dentro del ensayo, el valor del pH del primer día de la primera carga fue de 4.66, un valor menor al recomendable entre 6,5 y 7,5 que es el óptimo, este valor fue ascendiendo hasta llegar un valor de 5.87, en donde volvió a descender. El descenso se produjo entre los días 21 y 45 (último día), en estos días la variación de pH fue desfavorable, sin embargo no se aplicó ninguna medida correctora para elevarlo.

El proceso anaeróbico es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH (que se encuentran fuera del rango óptimo). Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica.

Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas, por tal motivo y debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad (FAO, 2011).

Además, los valores de pH bajos reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético e  $H_2$ . Al aumentar la presión parcial del  $H_2$ , las bacterias que degradan el ácido propiónico serán severamente inhibidas, causando una excesiva acumulación de ácidos grasos volátiles de alto peso molecular, particularmente ácidos propiónico y butírico, lo cual disminuirá la producción de ácido acético, generando una disminución del pH. Si la situación no se corrige, el proceso eventualmente fallará (FAO, 2011).

Por otra parte, el pH afecta a los diferentes equilibrios químicos existentes en el medio, pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia

en el proceso. Este es el caso de los equilibrios ácido-base del amoníaco y del ácido acético: al aumentar el pH se favorece la formación de amoníaco que, en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano y a valores de pH bajos se genera mayoritariamente la forma no ionizada del ácido acético, que inhibe el mecanismo de degradación del propionato (FAO, 2011).

La fluctuación de este parámetro puede atribuirse a la mezcla inicial suministrada al digestor, ya que las comunidades bacterianas en determinadas fases de la digestión anaeróbica generan sustratos más ácidos o más básicos, si bien hay otras variables como temperatura, sustancias inhibidores, etc, que pueden afectar al pH, la composición del sustrato y su modificación a lo largo del proceso tiene una relación directa con la variación de los valores de pH (Barriga, 2014).

En cuanto a la segunda carga, el Potencial Hidrógeno tuvo en el primer día un valor de 4.68, igualmente un valor menor al recomendable, dicho rango no sufría variaciones, por lo que se decide poner al tercer día de iniciado el proceso una solución de cal, para de esa manera elevar los datos obtenidos; a continuación se presentan el cambio de pH en relación a la solución de cal depositada en el interior del biodigestor.

Tabla 27. Prueba en la muestra de lixiviado del cambio sufrido del Potencial Hidrógeno vs Lechada

Intervalo de tiempo (min)	Cantidad de lechada (ml)	pH
4,57		
1	0,5	4,57
1	0,5	4,57
1	0,5	4,58
1	0,5	4,59
1	1	4,6
1	1	4,61
1	1	4,63
1	1	4,64
1	3	4,68
1	3	4,72
1	3	4,76
1	3	4,81
1	3	4,85
1	3	4,9
1	3	4,94
1	6	5,04
1	6	5,15

1	3	5,23
1	3	5,33
1	3	5,45
1	3	5,58
1	3	5,8
1	3	6,19
1	1	6,44
1	1	6,67
1	1	6,84
1	1	7,09
1	1	7,33
1	1	7,48
<b>TOTAL</b>	29	63

Elaborado por: Pazmiño, 2015

Tabla 28. Prueba en el biodigestor del cambio sufrido del Potencial Hidrógeno vs Lechada

<b>Intervalo de tiempo (min)</b>	<b>Cantidad de lechada (ml)</b>	<b>pH</b>
		4,05
3	500	4,52
3	1000	4,55
3	1500	4,61
3	1500	4,62
3	1500	4,63
3	2000	5
3	3000	5,82
3	3000	6,45
3	2000	6,86
3	1000	6,92
3	1000	7,36
<b>TOTAL</b>	<b>33 min</b>	<b>18000 L</b>

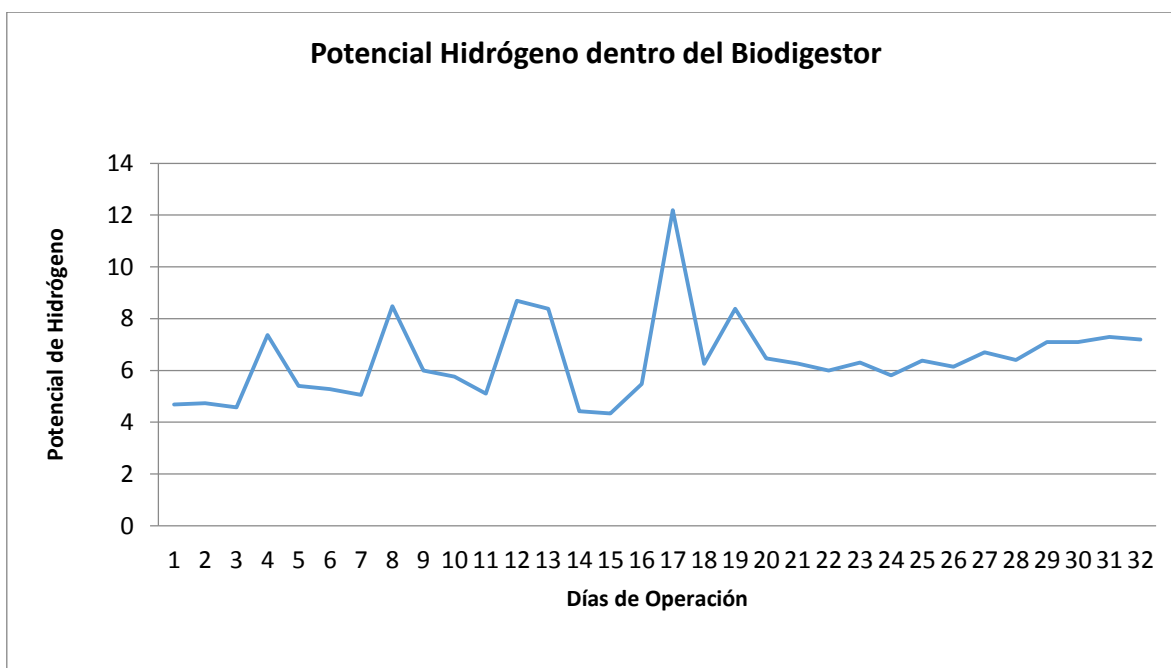
Elaborado por: Pazmiño, 2015

Tabla 29. Potencial Hidrógeno en el interior del biodigestor en la segunda carga

<b>Día</b>	<b>Potencial de Hidrogeno</b>
02/05/2015	4,68
04/05/2015	4,74
05/05/2015	4,57
06/05/2015	7.36
07/05/2015	5,40
08/05/2015	5,28
11/05/2015	5,05
12/05/2015	8,48
13/05/2015	6,00
14/05/2015	5,76
15/05/2015	5,11
18/05/2015	8,69
19/05/2015	8,38
20/05/2015	4,42
21/05/2015	4,34
22/05/2015	5,48
25/05/2015	12,19
26/05/2015	6,25
27/05/2015	8,38
28/05/2015	6,47
29/05/2015	6,27
1/06/2015	6,00
2/06/2015	6,30
3/06/2015	5,81
4/06/2015	6,38
5/06/2015	6,15
8/06/2015	6,7
9/06/2015	6,4
10/06/2015	7,1
11/06/2015	7,1
12/06/2015	7,3
15/06/2015	7,2

Elaborado por: Pazmiño, 2015

Gráfico 7. Potencial Hidrógeno dentro del Biodigestor



Elaborado por: Pazmiño, 2015

La cal adicionada implicó riesgos considerables para la estabilidad del proceso, ya que los valores del pH a partir de la adición del químico sufrieron un cambio, pero lamentablemente no el esperado ya que se desestabilizó este parámetro llegando a valores de 4,34 hasta valores de 12,19

#### 4.2.3. Presión

La variable presión fue monitoreada de forma diaria, con el instrumento de medición destinado para este fin (manómetro), y reflejo el valor de la presión del biogás que se depositó en el gasómetro integrado. De acuerdo a las mediciones realizadas en campo se pudo determinar que:

Tabla 30. Valores de Presión registrados en la primera carga

Día	Presión (psi)
13/03/2015	0
16/03/2015	0
17/03/2015	0
18/03/2015	0

19/03/2015	0
20/03/2015	0
23/03/2015	0
24/03/2015	0
25/03/2015	0
26/03/2015	0
27/03/2015	0
30/03/2015	0
01/04/2015	0
02/04/2015	0
06/04/2015	0
07/04/2015	0
08/04/2015	0
09/04/2015	0
10/04/2015	0
13/04/2015	0
14/04/2015	0
15/04/2015	0
16/04/2015	0
17/04/2015	0
20/04/2015	0
21/04/2015	0
22/04/2015	0
23/04/2015	0
24/04/2015	0

Elaborado por: Pazmiño, 2015

Tabla 31. Valores de Presión registrados en la segunda carga

<b>Día</b>	<b>Presión (psi)</b>
02/05/2015	0
04/05/2015	0
05/05/2015	0
06/05/2015	0
07/05/2015	0
08/05/2015	0
11/05/2015	0

12/05/2015	0
13/05/2015	0
14/05/2015	0
15/05/2015	0
18/05/2015	0
19/05/2015	0
20/05/2015	0
21/05/2015	0
22/05/2015	0
25/05/2015	0
26/05/2015	0
27/05/2015	0
28/05/2015	0
29/05/2015	0
1/06/2015	0
2/06/2015	0
3/06/2015	0
4/06/2015	0
5/06/2015	0
8/06/2015	0
9/06/2015	0
10/06/2015	0
11/06/2015	0
12/06/2015	0
15/06/2015	0

Elaborado por: Pazmiño, 2015

La variable presión fue la que menor fluctuaciones presentó, ya que se mantuvo desde el inicio hasta el final en el mismo valor, es decir 0 psi. Es importante mencionar que, la presión depende del volumen de gas generado, esto significa que no se produjo la generación de gas, esto puede atribuirse a que la producción de biogás, bajo las condiciones de operación que se mantuvieron dentro del reactor, no fueron favorables para la generación del mismo.



#### 4.2.4. Crecimiento bacteriano

Todas las fotos tomadas por: Pazmiño, 2015, en la Unidad de titulación Especial (UTE)

Gráfico 8. Crecimiento bacteriano de las cuatro muestras

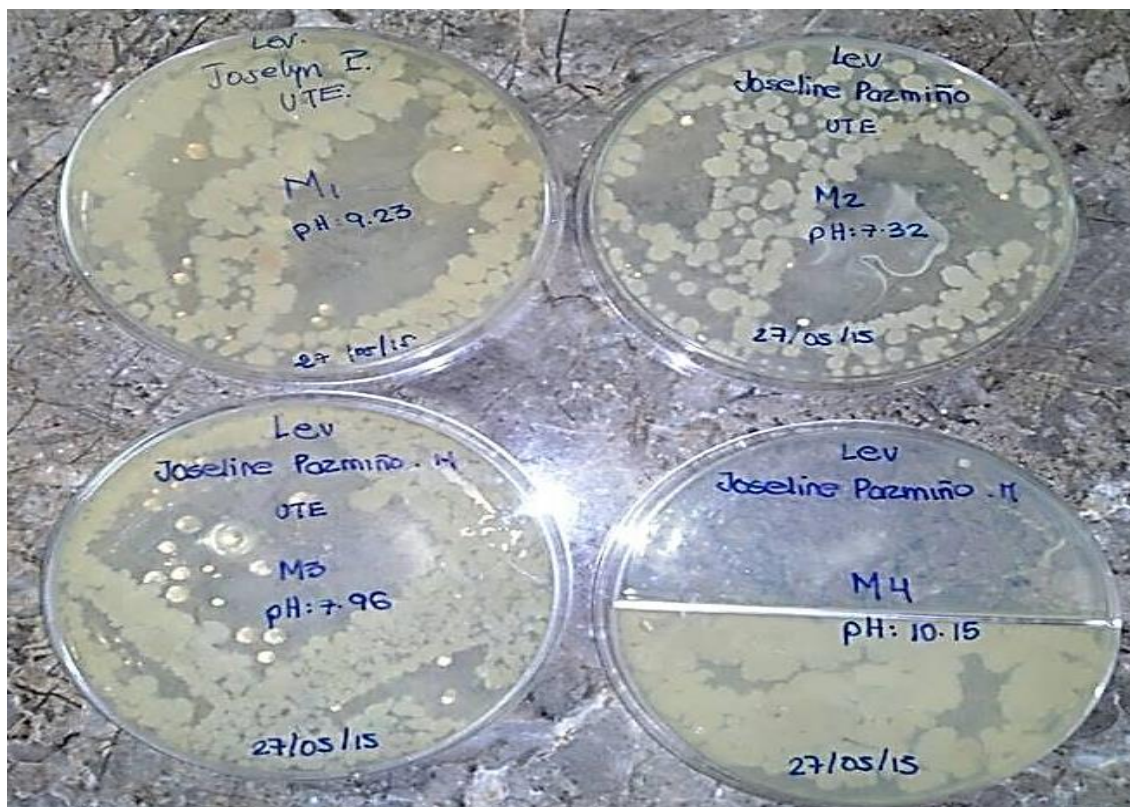


Gráfico 9. Crecimiento bacteriano de la muestra uno y dos



Gráfico 10. Crecimiento bacteriano de la muestra tres y cuatro

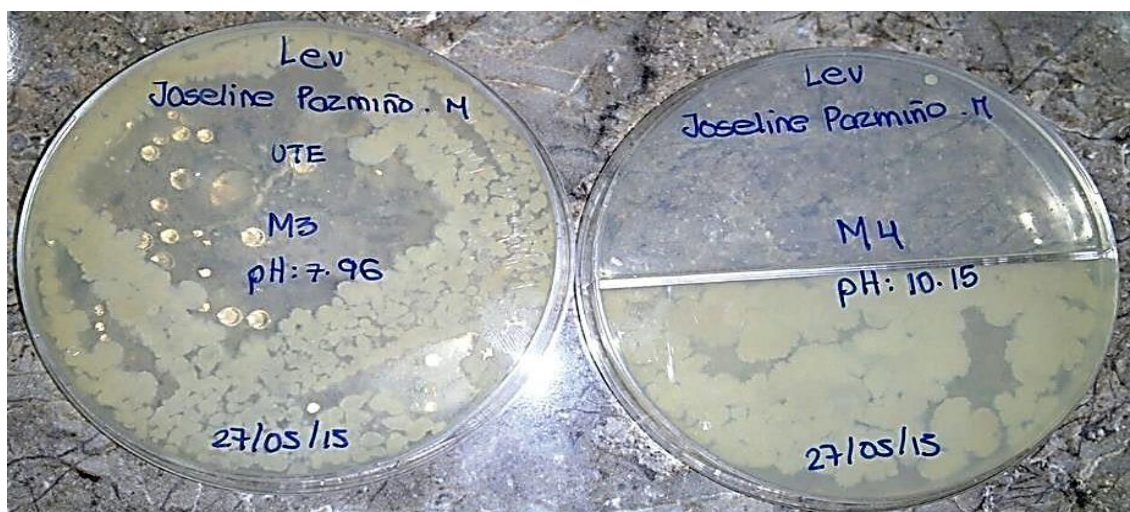


Gráfico 11. Crecimiento bacteriano de las cuatro muestras



Como se puede visualizar en las fotografías anteriores, acerca del ensayo general que se realizó para comprobar la flora bacteriana presente en el biodigestor, se puede decir que si se detectó la presencia de microorganismos en las cuatro muestras tomadas, a pesar de cada una de ellas tenían un valor de potencial de hidrógeno diferente.

Entonces se puede determinar que en el sustrato encontrado en el interior del biodigestor aún existían bacterias, a pesar de los cambios bruscos de pH sufridos por la ya mencionada adición de cal.

#### 4.2.5. Protocolo de uso del biodigestor

A continuación se describe las características y los principios de funcionamiento:

##### 4.2.5.1. Preparación del equipo

- Cambiar el plástico ubicado alrededor de la instalación, esto con el objetivo de mantener el calor.
- Revisar el funcionamiento de los instrumentos y elementos que permiten el control de variables dentro del biodigestor: manómetro, termómetro y medidor de pH (equipo que cuenta con la garantía del fabricante y que ha estado en permanente mantenimiento para asegurar su correcto funcionamiento).
- Realizar pruebas de fugas dentro del biodigestor, la misma que tiene como fin determinar si es que existe algún escape de biogás, para este propósito existen dos maneras de comprobar su buen funcionamiento:
  1. Prueba hidráulica: Se realizará el llenado del digestor hasta su nivel de servicio con agua y se comprobará que se mantiene el nivel durante una semana, debe bajar por evaporación de 20 a 30 cm el nivel de agua en estos días.
  2. Prueba de gas: Previo al inicio de las operaciones dentro del digestor es fundamental la realización de una prueba de fugas, esta prueba puede realizarse, cubriendo las válvulas y tuberías del digestor con jabón y llenando el tanque con aire a través de una bomba u otro dispositivo para este fin, si es que si existiese burbujeo se puede afirmar que tiene una fuga (Barriga, 2014).
- Tapar las fugas existentes en el biodigestor, en el caso de haberlas.
- Realizar el cálculo de tiempo de retención, se recomienda escoger el tiempo de retención apropiado de acuerdo a la temperatura promedio del sitio en el cual se va operar. Como se han realizado varias pruebas previas en el biodigestor, ya se tienen datos acerca de temperatura, es por ello que se podría utilizar el promedio de la temperatura, de la base de datos generadas hasta el momento.

Ecuación 11. Cálculo del tiempo de retención

$$TR = (-51.227 * \ln(T^{\circ}C) + 206.72)$$

Unidad de Planeación Minero Energética, 2003, p.36.

Donde,

TR= Tiempo de retención en días

Ln= Logaritmo natural

T°C= Temperatura promedio en grados centígrados del sitio donde se instalará el biodigestor.

#### 4.2.5.2. Preparación de la carga

Antes de introducir los residuos orgánicos dentro del reactor hay que realizar una serie de operaciones de acondicionamiento. Dependiendo del tipo de reactor, el grado de pretratamiento será diferente. La finalidad de estas operaciones es introducir el residuo lo más homogéneo posible, para de esta manera conseguir una eficiencia y rendimiento elevado de metano.

- Es necesario la evaluación de la producción de biogás a partir de diferentes mezclas, se debe variar la composición del sustrato, esto implica que a la cantidad de residuos sólidos urbanos se agregue diferentes inóculos que sirvan como nutrientes para el metabolismo bacteriano (Unidad de Planeación Minero Energética, 2003).  
A continuación se presentan tablas acerca del rendimiento de algunos sustratos, esto con el objetivo de ver que material es el más conveniente para el biodigestor.

Tabla 32. Producción de residuos humanos y animales (Estimado)

Productor	Peso (kg.)	Producción diaria de estiércol (kg.)	Producción anual de estiércol (kg.)	Producción anual de estiércol (kg.)
Cerdo	50	6	15	2,190
Vaca	500	34	34	12,410
Caballo	500	10	15	3,650
Oveja	15	1,5	2	548,000
Ave	1,5	0,1	0	36,500
Humanos	50	0,5	1	182,500

Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética, 2003, p. 11.

Tabla 33. Velocidad de generación de gas a partir de materiales de uso común

Días de fermentación	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Tasa de generación (m <sup>3</sup> /kg. TS)
Materiales	Porcentaje del volumen total de gas generado (%)									
Excretas humanas	40.7	81.5	94.1	98.2	98.7	100				0.478
Estiércol de cerdo	46.0	78.1	93.9	97.5	99.1	100				0.405
Estiércol de vaca	34.4	74.6	86.2	92.7	97.3	100				0.300
Pasto verde	-	-	-	98.2	-	100				0.410
Paja de trigo	8.8	30.8	53.7	78.3	88.7	93.2	96.7	98.7	100	0.435

Fuente: Rivas, 2010, p. 29.

Tabla 34. Muestra de la producción de KWh por m<sup>3</sup> de biogás.

Aprovechamiento Energético del Estiércol		
Animal	Producción de biogás (m <sup>3</sup> )	Energía Eléctrica (KWh)
Vacas	20	40
Cerdos	30	60
Gallinas-Pollos	40	80

Fuente: Ortega, 2006, p. 18.

- Reunir el material suficiente días antes de empezar el proceso aproximadamente 4 quintales de residuos orgánicos.
- Los residuos deben estar libres de sólidos y otros materiales como arena, rocas y piedras (Cabrera, 2011).
- Establecer la composición de la materia prima en términos generales. Se deberá establecer que categoría de residuo orgánico es: Plantas leguminosas, Frutas en descomposición, podas de jardín (quicuyo), tejidos animales, entre otros. Esto permitirá establecer por medio de los resultados de laboratorio la posible concentración inhibitoria de que residuo proviene.
- Pesarse cada una de las categorías
- Se realiza la trituración de la muestra, es decir se disminuye el tamaño de partícula de los residuos, dicha reducción es importante ya que permite que la población bacteriana degrade el sustrato a mayor velocidad, necesitando menor tiempo para cumplir con el proceso degradativo, además es necesaria por las características de diseño que presenta el equipo.

Se ha comprobado, que el tamaño de partícula del residuo tiene una fuerte influencia sobre el proceso metanogénico, tanto en lo que se refiere a rendimiento en metano, como en la disminución del contenido en sólidos volátiles, sobre todo si el residuo se utiliza tal cual. Por lo tanto, los residuos deben ser reducidos a pequeño tamaño y homogeneizados para facilitar la digestión.

Tabla 35. Efecto del tamaño de partícula sobre el proceso metanogénico

Residuo	Tamaño (mm)	Rendimiento m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV	Reducción de SV (%)
Piel de plátano (Musa Paradisiaca)	0,09	0,41	51,00
	0,40	0,41	51,20
	1,00	0,40	49,60
	6,00	0,37	46,80
	30X10	0,27	34,00
Hojas de coliflor (Brassica oleracea)	0,09	0,42	57,80
	0,40	0,42	57,80
	1,00	0,42	57,30
	6,00	0,41	55,50

	150X100	0,36	48,90
--	---------	------	-------

Fuente: Vereda, 2006, p. 118.

- Se realiza la mezcla de los residuos orgánicos (cortados), con el inóculo (material de arranque).
- Se extraerá una muestra del sustrato, y se determinará la densidad de la muestra.
- Se realiza la caracterización fisicoquímica de los residuos sólidos orgánicos. Esto incluye la determinación de los siguientes parámetros: Potencial Hidrógeno, Temperatura, Sólidos Totales, Sólidos Orgánicos Volátiles, y nutrientes como N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn, Ba.
- Se calcula la relación carbono/nitrógeno, en términos generales se considera que una relación C/N óptima que debe tener el material “fresco o crudo” que se utilice para iniciar la digestión anaeróbica, es de 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno, es decir, C/N = 30/1. Por lo tanto, cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptimas.  
Sobre la base del contenido de carbono y de nitrógeno de cada una de las materias primas, puede calcularse la relación C/N de la mezcla aplicando la siguiente fórmula.

Ecuación 12. Relación Carbono/ Nitrógeno

$$K = \frac{C1*Q1 + C2*Q2 + \dots + Cn*Qn}{N1*Q1 + N2*Q2 + \dots + Nn*Qn}$$

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

C = % de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

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

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

(FAO, 2011, p. 34).

#### 4.2.5.3. Llenado del biodigestor

Figura 7. Preparación de carga



Fuente: FAO, 2011, p. 43.

- **Inclusión de inoculantes.**- La primera etapa puede ser acortada mediante la inclusión de un determinado porcentaje de material de otro digestor rico en bacterias que se encuentran en plena actividad. Esto es particularmente importante en los digestores discontinuos que deben ser arrancados frecuentemente.

Los dos factores a tener en cuenta en la inoculación de un digestor son la proporción en que se agrega y su edad. Cuanto mayor sea la proporción y menor la edad, mayor será la eficacia.

En algunos casos cuando no hay inóculo, se debe dejar fermentar la materia prima por espacio de 1 semana y luego se introduce al digestor. El inóculo debe ser el 10-15% del volumen que se va a llenar y del 30% cuando proviene del mismo digestor.

- **Inclusión de agua.**- El agua que se utilice en la mezcla no debe ser clorada. Si es suministrada a través de algún acueducto, se recomienda de la red, ya que en el proceso de digestión anaerobia hay colonias de microorganismos que pueden morir o disminuir su actividad metabólica por la acción del cloro. Además, esta agua no puede contener desinfectante alguno ni agente tóxico en concentraciones que dañen los microorganismos

Para calcular el contenido de agua que se debe mezclar con la materia prima para dar la proporción adecuada, es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales de la materia prima (FAO, 2011).

Las bacterias y otros microorganismos no pueden funcionar efectivamente cuando el contenido de agua de la mezcla es demasiado bajo, además la cantidad de biogás producido será pequeña. La actividad de mezclar, debe realizarse en forma adecuada y uniforme en el tanque del digestor para promover una digestión efectiva.

1. Cálculo de la masa de agua para la mezcla: solamente se calcula cuando el porcentaje de sólidos totales (%ST) es superior al 10%.

Ecuación 13. Masa de agua para la mezcla

$$MH_2O = \frac{MPC \times ST}{10} - MPC$$

(Unidad de Planeación Minero Energética, 2003, p.35).

Donde.

MH<sub>2</sub>O= Masa de agua para la mezcla que disminuye hasta un 10% los sólidos orgánicos contenidos en la materia prima, en kilogramos por día.

ST= Cantidad de sólidos orgánicos contenidos en la materia prima para carga, en kilogramos por día.

MPC= Materia prima para carga, en kilogramos por día

- Se ingresa la materia orgánica, así como inóculo y agua dentro del digestor, por medio de la boca de alimentación de cuatro pulgadas de diámetro, ubicada en la parte superior del tanque de alimentación.
- Si no fuera posible el mezclado como tratamiento previo, se puede cargar el digestor por capas alternas y no muy gruesas de materias primas e inóculo.
- Es muy importante que durante el proceso de llenado, a partir del nivel referido, se mantenga abierta la válvula de salida del gas, de manera que escape todo el aire contenido en su interior, en la medida que se va llenando hasta alcanzar su nivel máximo, para evitar de esta manera el agrietamiento de la cúpula por la acción de las cargas de choque (llenado brusco). Después de esta operación se cierra la válvula de salida y se espera unos días, periodo en el cual se acumulara biogás en el gasómetro.
- Si el llenado se produjo con excretas de vacuno o inóculo (residual extraído de un proceso de digestión anaeróbica), durante más de una semana, la válvula se podrá abrir a las 24 horas. De lo contrario habrá que esperar a que la presión dentro del digestor se eleve.
- Cerrar el biodigestor, tanto la boca de alimentación, como la válvula de salida fertilizante orgánico líquido.

#### 4.2.5.4. Puesta en marcha

- Se conecta el Sistema de Mantenimiento de la temperatura y se inicia el proceso de digestión.
- Se realiza el control de los parámetros establecidos como variables independientes y dependientes, estos son: Temperatura, pH, Presión y Producción de metano. El control de estos parámetros debe ser diario y desde el inicio de operación del digestor.



- Realizar la agitación manual, por medio de una manivela en media luna, ubicada en la parte superior del tanque de digestión, esta actividad se hará a diario, por un periodo de tiempo de 10 minutos, con la finalidad que los elementos del fondo recirculen y se pueda activar a las poblaciones bacterianas que lo habitan.

#### 4.2.5.5. Cuantificación de los Productos

Como se ha establecido, los productos en la digestión anaerobia son: Biogás, cuya composición es Metano y Dióxido de Carbono, y fertilizante orgánico sólido.

- El caso del biosol (sólido o lodo), su extracción se realiza usando el sitio de desfogue principal, y debe hacerse una vez que el periodo de retención establecido haya culminado.
- Para el caso del componente gaseoso se puede realizar la prueba de gas, útil para verificar la generación del biogás en condiciones de baja productividad. Además para el caso del componente gaseoso, biogás, la cuantificación del metano, el componente que puede ser aprovechado energéticamente como combustible, se ha establecido el método de volumen desplazado. Sin embargo previa la cuantificación es necesario revisar la presión marcada en el manómetro principal, si la presión sobrepasa de los 2 psi es factible la aplicación del método (Barriga, 2014).

#### 4.2.5.6. Mantenimiento del biodigestor

El digestor, una vez en fase normal de operación, tiene un mantenimiento muy simple, que ocasiona muy poco trabajo. Se refiere más a tareas de control, limpieza y verificación del funcionamiento.

- Realizar inspecciones periódicas del estado de la cubierta, buscando detectar fugas, rasgaduras y daños en general.
- Realizar una remoción de basura y escombros arrastrados por el viento.
- Eliminar cualquier acumulación de agua de la cubierta.
- Hacer una inspección diaria de tuberías, válvulas, conexiones y equipo de medición para detectar a tiempo cualquier daño que presenten y en caso de haberlo, instrumentar las acciones necesarias para su inmediata reparación.
- En el momento de hacer la limpieza en el interior del digestor es necesario evitar que el lavado en el interior del biodigestor se realice con jabón o detergentes. Puesto que la presencia de estos residuos pueden destruir los microorganismos. El digestor (de estructura sólida fija y de estructura sólida móvil) debe limpiarse internamente cada dos años. Para efectuar una buena limpieza: Lavar las paredes, el fondo y el almacenamiento de gas con un cepillo de cerdas duras (no metálicas) y agua. Al final se retira el agua de lavado.

#### 4.2.5.7. Procedimientos de seguridad

- Restricción del acceso

Se deberá restringir el acceso al digestor a personas no autorizadas, así como también de los animales, dado que se produce biogás y este es un gas altamente tóxico e inflamable, por su gran contenido de metano, por esta razón es necesario poner este anuncio visible con la siguiente leyenda (Achundia, 2012).

“PELIGRO: GAS ALTAMENTE INFLAMABLE” Y “SE PROHIBE FUMAR”

- No dejar materiales inflamables alrededor del equipo. Colocarlos en un lugar seguro (Achundia, 2012).

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Con la realización de los ensayos operativos en el biodigestor, se pudo gestionar los parámetros físico-químicos, y además se pudo encontrar las proporciones adecuadas de la mezcla del sustrato, es decir de 10-15% del volumen que se va a llenar en el caso del inóculo y en el caso del agua solamente se calcula cuando el porcentaje de sólidos totales (%ST) es superior al 10%.  
Sabido dichas proporciones se puede optimizar la calidad y el tiempo de generación de metano. Es así que se puede afirmar que se ha cumplido con el objetivo específico número uno y dos.
- Con la experiencia del funcionamiento en las dos pruebas del digestor discontinuo, se pudo elaborar un protocolo acerca del procedimiento operacional para el funcionamiento del biodigestor, por lo tanto se puede decir que igualmente se cumple con el tercer objetivo específico planteado en el presente proyecto de investigación.
- A pesar de la importancia de esta tecnología, en el mejoramiento de las condiciones sanitarias de la población, la preservación del medio ambiente y la producción de gas, en el país muy poco se conoce de ella.
- Para el llenado del biodigestor con la materia orgánica es importante conocer la densidad de los residuos, ya que de dicho resultado depende que cantidad es introducida para el proceso.
- El análisis de los parámetros fisicoquímicos de los residuos sólidos orgánicos, permitió conocer las características iniciales de la mezcla.
- Se pudo determinar cualitativamente que no existió la producción de metano. Este parámetro fue determinado a través de la prueba de gas, además que se relacionó estrechamente con la variable presión y pH.
- Se determinó que la presencia de agua e inóculo en la mezcla inicial es de gran importancia para poder realizar el proceso de generación de metano satisfactoriamente.
- Antes de llevar a cabo la adición de algún elemento en el sustrato contenido en el digestor, para elevar los valores de pH, es necesario conocer los riesgos que implica el agregar este material al proceso.
- Es indispensable pesar cada categoría perteneciente a los residuos orgánicos que van a ser introducidos en el digestor, esto con el fin de poder realizar la fórmula de relación Carbono Nitrógeno, la cual permite tener mayor confiabilidad en los resultados obtenidos y de igual manera da la posibilidad de realizar un mejor análisis sobre el proceso.

- El sistema de mezclado no cumple con los propósitos establecidos, el cual es realizar la mezcla total del material contenido en el digestor.
- La presente investigación constituye como un aporte en el área de conocimiento de los residuos sólidos orgánicos, no es una prueba determinante de que la producción de metano a partir de RSU orgánico que debe incluirse dentro el sistema de gestión de residuos del DMQ. Es necesario replicar el número de ensayos del biodigestor para poder establecer si es que esta alternativa puede reproducirse a gran escala.

## 5.2. Recomendaciones

- Es necesario la evaluación de la producción de biogás a partir de diferentes mezclas, es decir a la cantidad de residuos sólidos urbanos se le podría agregar diferentes inóculos que sirvan como nutrientes para el metabolismo bacteriano.
- Como se utiliza un biodigestor discontinuo, es recomendable utilizar una buena inoculación, (10-15% en base al peso), para garantizar una buena fermentación, por lo que los residuos orgánicos (cortados) se deben mezclar con el inóculo (material de arranque). En el caso de que no exista inóculo, se debe dejar fermentar la materia prima por un espacio de tiempo de 1-2 semanas y luego se introduce al digestor.
- No calcular la densidad del residuo orgánico mediante la compresión de la muestra en un pellet, debido a que la muestra no es ingresada en el biodigestor de manera comprimida.
- Durante la alimentación del digestor con la materia orgánica es importante que el equipo sea llenado hasta el 50% del volumen total.
- Cuando se realice la descarga, y se proceda a la limpieza, se debe dejar del 10% -30% del material el cual servirá como inóculo.
- La determinación inicial del valor de pH es fundamental ya que permite determinar el comportamiento de la variable a lo largo del ensayo y también establecer las medidas de corrección si es que hay demasiada fluctuación de los valores.
- En caso de no subir el pH al rango óptimo, es necesario ajustar la acidez agregando un compuesto orgánico debido a que permite una mejor adaptación de las bacterias, y los cambios de pH generados no son tan bruscos como los que provocan los compuestos inorgánicos.
- Las bacterias formadoras de metano son muy sensibles a un mezclado rápido, por lo que es recomendable hacerlo de manera lenta.
- Se recomienda mejorar el sistema de mezclado, ya que el que posee el equipo actualmente no logra el propósito esperado, esto debido a que solo se mezcla la parte central del biodigestor.
- Diseñar un sistema o dispositivo que permita la adición de sustancias al tanque donde se efectúa el proceso, esto con el objetivo de no abrir la boca de alimentación, ya que de esa manera no se permite la entrada de oxígeno al proceso.

- Resultaría importante conocer la cinética de las poblaciones bacterianas en cada una de las fases de digestión anaerobia, ya que permiten conocer el inicio y culminación de cada fase y que valores de pH, temperatura y presión son los característicos.
- Una vez detectada la presencia de materiales tóxicos, mediante la caracterización físico química realizada, se puede remover dicho elemento que se encuentre en concentración inhibitoria antes de que ingrese al biodigestor.
- Realizar el cálculo del tiempo de retención de manera exacta, es decir mediante la fórmula estipulada en el protocolo del uso del biodigestor, expuesta en el presente proyecto de investigación.
- Se recomienda no dejar sin uso el biodigestor, ya que afecta tanto a los microorganismos que se encuentran en el proceso, como también en los resultados obtenidos, esto debido a que dicho proyecto es para una realización continúa.

## CAPÍTULO VI

### REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Achundia, Gerónimo. (2012). *Implementación de un biodigestor, para la utilización y aprovechamiento de los residuos generados en las actividades productivas del camal municipal de Manta* (Tesis de Pregrado). Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí. Manabí-Ecuador.
- Aguilar, Gustavo. (2013). Control de Temperatura y pH aplicado en biodigestores modulares de estructura flexible con reciclado de lodos a pequeña escala. México. 98 pg.
- Agrowaste. (2010). Digestión Anaerobia. Recopilado el 11 de diciembre del 2014. Disponible en: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/DIGESTION-ANAEROBIA.pdf>
- Aguilar, Enrique. (2014). Determinación del estado sanitario de las plantas, suelo e instalaciones y elección de los métodos de control. AGAH0108 - Horticultura y floricultura. IC Editorial. Primera Edición. 206 pg.
- Arce, Jimmy. (2011). *Diseño de un Biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del Litoral* (Tesis de Pregrado). Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil. Guayaquil- Ecuador.
- Barriga, Ana. (2014). *Rediseño de un biodigestor tipo Batch alimentado con residuos sólidos orgánicos urbanos producidos en el distrito Metropolitano de Quito en el año 2014* (Tesis de Pregrado). Universidad Internacional SEK. Facultad de ciencias ambientales. Quito.
- Botanical. (2015). Dieta para la osteoporosis. Botanical online. Recopilado el 5 de junio del 2015. Disponible en: <http://www.botanicalonline.com/medicinalsosteoporosisalimentacion.htm>.
- Burgos, Aitor. (2013). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia)* (Tesis de Master). Escola de Camins.
- Castillo, Marcelo. (2012). “Consultoría para la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos domésticos y asimilables a domésticos para el distrito metropolitano de quito”. Informe Ejecutivo. Ecuador. 29 pg.
- Chang, R. (2008). Fisicoquímica. México D.F: Mc Graw Hill Interamericana
- Comisión Nacional de Energía. (2007). Potencial del Biogás. Proyecto Energías Renovables. Chile. 80 pg.
- Crisanto, Juan. (2013). Estudio de factibilidad para implementar una central eléctrica aprovechando el biogás generado por el relleno sanitario el Inga. Ecuador. 85 pg.
- EMGIRS. (2014). Recopilado el 15 de diciembre del 2014. Disponible en: <http://www.emgirs.gob.ec/index.php/operaciones/estacion-de-transferencia-norte>
- FAO. (2011). Manual de Biogás. Primera Edición. Santiago de Chile. 120 pg.

- Ferrer, Ivett. (2011). Producción de biogás a partir de residuos orgánicos en biodigestores de bajo coste. Barcelona. 10 pg.
- FIAB. (S.F). Energía renovable a partir de los residuos de la industria alimentaria: BIOGÁS. Primera Edición. España. Pg. 7.
- Foster, Tania. (2005). *Digestión Anaerobia termofílica seca de residuos sólidos urbanos: estudio de las variables del proceso en el arranque y estabilización del bio-reactor* (Tesis doctoral). Universidad de Cádiz.
- Gualoto, José. (2013). Diseño y construcción de interface para monitoreo y control de prototipos del laboratorio de energías alternativas y eficiencia energética del departamento de ingeniería mecánica de la escuela Politécnica Nacional. Ecuador. 151 pg.
- Guevara, Antonio. (1996). Fundamentos Básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos Rurales. Lima- Perú. 80 pg.
- Hernández, Francisco. (2014). Tratamiento de residuos y generación de energía renovable en el sector industrial. Primera Edición. 44 pg.
- Herrero, Jaime. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. Primera Edición. Bolivia. 85 pg.
- Huamán, Eduardo. (2001). Estudio del aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos para la obtención de biogás, en el Cantón la Libertad Provincia del Guayas. Primera Edición. Ecuador. 101 pg.
- IDEA. (2007). Biomasa: Digestores anaerobios. Primera Edición. Madrid. 48 pg.
- Instituto Nacional de Ecología. (1999). Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos. Primera Edición. 235 pg.
- Instituto Nacional de Ecología. (2002). Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero, 1990-2002. Primera Edición. 200pg.
- Jiménez, Elena. (2001). La Contaminación Ambiental en México. Primera Edición. Editorial Limusa. México. 200pg.
- López, S. (2013). Producción de metano en un biodigestor de residuos sólidos urbanos orgánicos y caracterización bioquímica de los microorganismos involucrados en el proceso. Universidad Internacional SEK, Facultad de ciencias ambientales. Quito
- López, Gerardo. (S.F). Tabla de alimentos ricos en calcio. Recopilado el 2 de junio del 2015. Disponible en: <http://www.neurocirugiamoderna.com/osteoporosis.pdf>.
- Martínez, Beatriz. (2012). evaluación de la digestión anaerobia como alternativa de estabilización de biosólidos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de la universidad tecnológica de Pereira. Pereira. 80 pg.
- Ministerio del Ambiente. (2014). Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos – PNGIDS ECUADOR. Recopilado el 14 de diciembre del 2014. Disponible en: <http://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>
- Morales, Martín. (2011). Estudio de la distribución de temperaturas para el diseño de un biodigestor enterrado. Argentina. 1630 pg.
- Moreno, Joaquín. (2008). Compostaje. Mundi Prensa Libros. 570 pg.
- NKDEP. (2012). El Potasio Consejos para personas con la enfermedad de los riñones. No. 12-74055. 4 pg.

- Observatorio Natural para la gestión de residuos Sólidos Urbanos. (2009). Qué es la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU). Recopilado el 14 de diciembre del 2014. Disponible en: [http://www.ambiente.gob.ar/observatoriorsu/informacion\\_general/que\\_es\\_la\\_gestion\\_integral.html](http://www.ambiente.gob.ar/observatoriorsu/informacion_general/que_es_la_gestion_integral.html)
- ONUDI. (2007). Guía para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos. Primera Edición. Cuba. 138 pg.
- Ortega, Nuria. (2006). Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. First Edition. Dissertation. USA. 25 pg.
- Rivas, Olga. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Primera Edición. Argentina. 50 pg.
- Rivas, S, Vargas, R & Watso, G. (2009). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Primera Edición. Vol 23 N°1. 8 pg.
- Rodríguez, Luis. (2014). Viabilidad técnica para producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos – Forsu. Bogotá. 50 pg.
- Rodríguez, Gerardo. (2011). Modalidades de la investigación científica. Attribution Non-commercial. Recopilado el 15 de diciembre del 2015. Disponible en: [http://es.scribd.com/doc/50045935/Modalidades-de-la-investigacion-cientifica#force\\_seo](http://es.scribd.com/doc/50045935/Modalidades-de-la-investigacion-cientifica#force_seo)
- Secretaria de Ambiente. (2014). Manejo de residuos sólidos: consumo responsable. Recopilado el 8 de Diciembre de 2014. Disponible en: [http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=72:manejo-de-residuos-s%C3%B3lidos-consumo-responsable&lang=es](http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php?option=com_k2&view=item&id=72:manejo-de-residuos-s%C3%B3lidos-consumo-responsable&lang=es)
- Unidad de planeación Minero Energética. (2003). Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Versión 01. Bogotá. 47 pg.
- Vereda, Alonso. (2006). Producción de biogás a partir de residuos vegetales, características, etapas y limitaciones. Número uno. 122 pg.
- Vida para Quito. (2014). Manejo de Residuos Sólidos. Recopilado el 6 de Diciembre de 2014. Disponible en: [http://viniciovasquez.com/vida/index.php?option=com\\_content&task=view&id=59&Itemid=50](http://viniciovasquez.com/vida/index.php?option=com_content&task=view&id=59&Itemid=50)





# ANEXOS

## ANEXO A: Concentración de sustancias contenidas en el biodigestor

Primera Carga

MC-LSAIA-2201-03

	<b>INSTITUTO NACIONAL AUTONOMO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS</b> <b>ESTACION EXPERIMENTAL SANTA CATALINA</b> <b>DEPARTAMENTO DE NUTRICION Y CALIDAD</b> <b>LABORATORIO DE SERVICIO DE ANALISIS E INVESTIGACION EN ALIMENTOS</b>	
	Panamericana Sur de Quito Km. 1. Cutuglagua Tifs. 2890691-3007134. Fax 3007134 Casilla postal 17-01-340	

### INFORME DE ENSAYO No: 15-075

<b>NOMBRE PETICIONARIO:</b>	Srta. Joseline Pazmiño	<b>INSTITUCION:</b>	
<b>DIRECCION:</b>	Real Audiencia y Destacamento La Bocana	<b>ATENCION:</b>	Srta. Joseline Pazmiño
<b>FECHA DE EMISION:</b>	06/04/2015	<b>FECHA DE RECEPCION.:</b>	25/03/2015
<b>FECHA DE ANALISIS:</b>	Del 26 de marzo al 6 de abril del 2015	<b>HORA DE RECEPCION:</b>	10H59
		<b>ANALISIS SOLICITADO</b>	Minerales

ANÁLISIS	HUMEDAD	Ca <sup>Ω</sup>	P <sup>Ω</sup>	Mg <sup>Ω</sup>	K <sup>Ω</sup>	Na <sup>Ω</sup>	IDENTIFICACIÓN	
MÉTODO	MO-LSAIA-01.01	MO-LSAIA-03.01.02	MO-LSAIA-03.01.04	MO-LSAIA-03.01.02	MO-LSAIA-03.01.03	MO-LSAIA-03.01.03		
METODO REF.	U. FLORIDA 1970	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980		
UNIDAD	%	%	%	%	%	%		
15-0336	89,60	0,18	0,56	0,18	6,35	0,11	Residuos orgánicos	
<small>Tabla No. 7 Porcentaje de Solubles Desechos Totales Desecho Casero</small>								
ANÁLISIS		Cu <sup>Ω</sup>	Fe <sup>Ω</sup>	Mn <sup>Ω</sup>	Zn <sup>Ω</sup>			
MÉTODO		MO-LSAIA-03.02	MO-LSAIA-03.02	MO-LSAIA-03.02	MO-LSAIA-03.02			
METODO REF.		U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980			
UNIDAD		ppm	ppm	ppm	ppm			
15-0336		3	272	9	9			

Los ensayos marcados con Ω se reportan en base seca.

OBSERVACIONES: Muestra entregada por el cliente

### RESPONSABLES DEL INFORME

  
**Dr. Armando Rubio**  
**RESPONSABLE DE CALIDAD**





  
**Dr. Ivan Samanlego, MSc**  
**RESPONSABLE TECNICO**

Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.

Los resultados arriba indicados solo están relacionados con el objeto de ensayo

NOTA DE DESCARGO: La información contenida en este informe de ensayo es de carácter confidencial, está dirigido únicamente al destinatario de la misma y solo podrá ser usada por este. Si el lector de este correo electrónico o fax no es el destinatario del mismo, se le notifica que cualquier copia o distribución de este se encuentra totalmente prohibida. Si usted ha recibido este informe de ensayo por error, por favor notifique inmediatamente al remitente por este mismo medio y elimine la información.

## Segunda Carga

	<b>INSTITUTO NACIONAL AUTONOMO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS</b> <b>ESTACION EXPERIMENTAL SANTA CATALINA</b> <b>DEPARTAMENTO DE NUTRICION Y CALIDAD</b> <b>LABORATORIO DE SERVICIO DE ANALISIS E INVESTIGACION EN ALIMENTOS</b> Panamericana Sur de Quito Km. 1, Cutuglagua Tifs. 3076004-3007134. Fax 3007134 Casilla postal 17-01-340	

## INFORME DE ENSAYO No: 15-0139

NOMBRE PETICIONARIO:	Srta. Joseline Pazmiño	INSTITUCION:	Particular
DIRECCION:	Real Audiencia	ATENCION:	Srta. Joseline Pazmiño
FECHA DE EMISION:	28/05/15	FECHA DE RECEPCION.:	19/05/15
FECHA DE ANALISIS:	Del 20 al 27 de mayo de 2015	HORA DE RECEPCION:	10H44
		ANALISIS SOLICITADO	Minerales

ANÁLISIS	HUMEDAD	Ca <sup>Ω</sup>	P <sup>Ω</sup>	Mg <sup>Ω</sup>	K <sup>Ω</sup>	Na <sup>Ω</sup>	IDENTIFICACIÓN	
MÉTODO	MO-LSAIA-01.01	MO-LSAIA-03.01.02	MO-LSAIA-03.01.04	MO-LSAIA-03.01.02	MO-LSAIA-03.01.03	MO-LSAIA-03.01.03		
METODO REF.	U. FLORIDA 1970	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980		
UNIDAD	%	%	%	%	%	%		
15-0612	77,31	0,72	0,33	0,20	5,30	0,07	Residuos orgánicos	
ANÁLISIS		Cu <sup>Ω</sup>	Fe <sup>Ω</sup>	Mn <sup>Ω</sup>	Zn <sup>Ω</sup>			
MÉTODO		MO-LSAIA-03.02	MO-LSAIA-03.02	MO-LSAIA-03.02	MO-LSAIA-03.02			
METODO REF.		U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980			
UNIDAD		ppm	ppm	ppm	ppm			
15-0612		10	3079	63	32			

Los ensayos marcados con Ω se reportan en base seca.

OBSERVACIONES: Muestra entregada por el cliente

## RESPONSABLES DEL INFORME

  
**Dr. Armando Rubio**  
**RESPONSABLE DE CALIDAD**



  
**Dr. Iván Samaniego, MSc**  
**RESPONSABLE TÉCNICO**

Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.

Los resultados arriba indicados solo están relacionados con el objeto de ensayo

NOTA DE DESCARGO: La información contenida en este informe de ensayo es de carácter confidencial, está dirigido únicamente al destinatario de la misma y solo podrá ser usada por este. Si el lector de este correo electrónico o fax no es el destinatario del mismo, se le notifica que cualquier copia o distribución de este se encuentra totalmente prohibido. Si usted ha recibido este informe de ensayo por error, por favor notifique inmediatamente al remitente por este mismo medio y elimine la información.

### ANEXO B: Nutrientes o inhibidores del biodigestor

Tabla 36. Frutas y vegetales con alto contenido de potasio

<b>Frutas y vegetales con alto contenido de potasio (más de 200 mg)</b>
<b>FRUTAS</b>
Albaricoques
Bananas (plátano)
Melones
Dátiles
Nectarinas
Kiwi
Ciruelas pasas
Naranjas
<b>VEGETALES</b>
Calabaza
Aguacate
Frijoles
Remolacha
Brócoli
Coles de Bruselas
Acelga
Chiles, pimiento rojo o verde
Hongos (setas, champiñones)
Papas
Espinaca
Arvejas, lentejas
Batata
Tomates

Fuente: NKDEP, 2012, p.3

Tabla 37. Alimentos con alto contenido de Calcio

<b>Alimentos con alto contenido de Calcio</b>
<b>Verduras</b>
Acelgas
Cardo
Espinacas
Puerro
Alcachofas

Coles
Repollo
Judía verde
Legumbres/otros
Almendras
Higo seco
Garbanzos
Judías blancas
Aceitunas
Lentejas
Frutas
Naranja
Plátano

Fuente: López, S.F, p.1.

Tabla 38. Alimentos con alto contenido de Magnesio

<b>Alimentos con alto contenido de magnesio</b>
Bananas
Higos
Aguacate
Habas blancas y negras
Espinacas
Acelgas
Brócoli

Fuente: Botanical, 2015, p.3.

Tabla 39. Alimentos con alto contenido de Zinc

<b>Alimentos con alto contenido de zinc</b>
Ajo
Garbanzos
Frijol Blanco y colorado
Espinaca

Fuente: Botanical, 2015, p.4.

## ANEXO C: Ensayos operativos en el biodigestor

Todas las fotos tomadas por: Pazmiño, 2015

### Preparacion del equipo

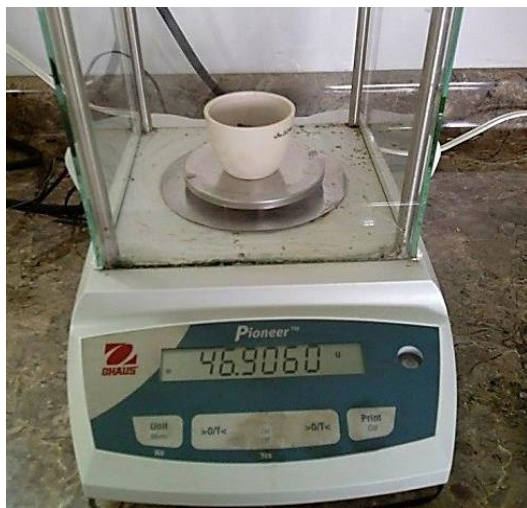


### Preparacion de la carga





Caracterización físico química







Adición de Cal



Crecimiento Microbiano





### Cuantificación del producto

