

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA -USAC-
CENTRO DE ESTUDIOS DEL MAR Y ACUICULTURA -CEMA-**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**Producción de biogás y bioabono a partir de subproductos y residuos de
tilapia**



Presentado por:

T. A. José Roberto Portillo Pumay

**Para otorgarle el título de:
LICENCIADO EN ACUICULTURA**

Guatemala, mayo de 2016

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA -USAC-
CENTRO DE ESTUDIOS DEL MAR Y ACUICULTURA -CEMA-**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**Producción de biogás y bioabono a partir de subproductos y residuos de
tilapia**



Presentado por:

T. A. José Roberto Portillo Pumay

**Para otorgarle el título de:
LICENCIADO EN ACUICULTURA**

Asesor: Lic. Santiago Yee Melgar

Guatemala, mayo de 2016

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA -USAC-
CENTRO DE ESTUDIOS DEL MAR Y ACUICULTURA -CEMA-**

Consejo Directivo

Presidente

M.Sc. Héctor Leonel Carrillo Ovalle

Secretaria

M. Sc. Kathya Iturbide Dormon

Representantes Docentes

M. Sc. Erick Villagrán Colón

M. A. Olga Marina Sánchez Cardona

Representante del Colegio de Médicos

Veterinarios, Zootecnistas y Acuicultores

M. Sc. Adrián Mauricio Castro López

Representantes Estudiantiles

Lic. Francisco Emanuel Polanco Vásquez

T. A. María José Mendoza Arzu



El Director del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura -CEMA-, después de conocer el dictamen favorable del M.Sc. Luis Francisco Franco Cabrera, Coordinador Académico, sobre el trabajo de graduación del estudiante universitario, **José Roberto Portillo Pumay**, titulado “Producción de biogás y bioabono a partir de subproductos y residuos de tilapia” da por este medio su aprobación a dicho trabajo. IMPRIMASE.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Héctor Leonel Carrillo Ovalle



Guatemala, mayo 2016



El Coordinador Académico del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura –CEMA-, después de conocer el dictamen del asesor Lic. Santiago Yee Melgar y la aprobación de la Encargada de EPS M.Sc. Irene Franco Arenales, al trabajo de graduación del estudiante universitario **José Roberto Portillo Pumay**, titulado “Producción de biogás y bioabono a partir de subproductos y residuos de tilapia”, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


M.Sc. Luis Francisco Franco Cabrera



Guatemala, mayo 2016

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por su dirección, su cuidado y por proveerme todos los recursos necesarios para poder cruzar este camino y alcanzar este logro.

A mi familia, padres, hermanos, sobrinos y novia, que con esfuerzo y dedicación me han apoyado en este camino llamado vida.

A mis amigos, por ser el hombro del cual me pude apoyar en momentos difíciles para alcanzar la cima de este camino.

A la Universidad de San Carlos de Guatemala, por darme la oportunidad de poder estudiar y poder alcanzar este meta como profesional.

Al Centro de Estudios Del Mar y Acuicultura, porque en este Centro tuve el honor de ser alumno de distinguidos docentes que, con su orientación académica, tengo la oportunidad de alcanzar este logro.

A la empresa Paraíso Springs, por el espacio y el apoyo brindado para la ejecución de mi Ejercicio Profesional Supervisado.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la sabiduría y fortaleza para alcanzar este logro.

A mis padres, María Eusebia de Portillo y Rodolfo Portillo Gómez, quienes a pesar de que ellos no tuvieron esta oportunidad, con esfuerzo me dieron todo el apoyo para alcanzar este título.

A mi novia, por ser una leal compañera y una inspiración en cada momento a mi lado.

A mis hermanos, Diego, Carlos, Ale, Julio y Eva, por ser parte de la motivación para poder alcanzar este logro.

A mis amigos, Sara Leal, Marco Elías, Juan Carlos Tejeda, David Valle, Estefany Rueda, Clelia de Vásquez, Adela Cruz, Rita Díaz y Melisa Ochoa, por ser el hombro del cual me pude apoyar en momentos difíciles para alcanzar la cima de este camino.

RESUMEN

En Guatemala, los subproductos y residuos generados de actividades en granjas de producción de tilapia no son aprovechados debido al escaso conocimiento generado sobre la tecnología apropiada para la disposición de estos sub-productos. Esta investigación tuvo como fin evaluar y cuantificar la cantidad de productos (biogás y abono orgánico) obtenidos en biodigestores, a partir de subproductos y residuos de tilapia, para ello se diseñó un área experimental, con nueve unidades experimentales, estableciendo tres tratamientos con tres repeticiones.

Se determinó la producción total de biogás de los tres tratamientos y tres repeticiones con base en los registros diarios obtenidos de cada contador y los resultados fueron: 12313 m³, 15514 m³, 24181 m³; los siguientes, para las siguientes cargas de subproductos y residuos de tilapia: 1250 kg, 1875 kg y 2500 kg respectivamente. Se analizaron las medias de los datos por grupo de carga (1250, 1875 y 2500k g) aplicando un ANOVA al 95% de confianza, por medio de este análisis de varianza se determinó que existe diferencia significativa entre los grupos de digestores con un valor de significancia de 502.33, esto sugiere que la diferencia en la producción de biogás en metros cúbicos en biodigestores no se atribuye a situaciones de azar si no a la relación de los siguientes parámetros monitoreados: pH, con un registro de lectura de un mínimo de 6.07 y máximo de 7.36; cantidad de materia orgánica ingresada, 1250 kg, 1875 kg y 2500 kg; temperatura, registrando una mínima de 28.2 °C y una máxima de 30 °C; y, tiempo de retención hidráulica de 25 días.

ABSTRACT

In Guatemala by-products and waste generated from activities in tilapia production farms they are not exploited due to poor knowledge generated on appropriate technology for the disposal of these by-products. This research was aimed at assessing and quantifying the amount and quality of products (biogas and compost) in biodigesters from tilapia by-products and residues, to do an experimental area; with nine units of establishing three treatment experiment with three replications was designed.

The total production of biogas from the three treatments and three repetitions based on the daily records obtained from each meter and the results were 12313 m³ 15514 m³ 24181 m³ these for the following products and waste loads of 1250 kg of tilapia was determined, 1875kg and 2500 kg respectively. The means of the data were analyzed load group (1250, 1875 and 2500 kg) using ANOVA 5% confidence by this analysis of variance determined that there are significant differences between the groups digesters with a value of significance of 502.33, this suggests that the difference in the production of biogas digesters in cubic meters is not attributed to random situations if the relation of the following parameters monitored; pH with a record of reading a minimum of 6.07 and maximum of 7.36), entered amount of organic matter, 3 loads 1250 kg, 1875 kg and 2500 kg, temperature, recording a low of 28.2 ° C and maximum 30 ° were applied C. and using a hydraulic retention time of 25 days.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ANTECEDENTES	3
3	MARCO TEÓRICO	4
3.1	Biodigestor	4
3.1.1	De fermentación continua	4
3.1.2	De fermentación semicontinua	4
3.1.3	De fermentación discontinua o por lotes	4
3.1.4	Fermentación mesófila	5
3.1.5	Fermentación psicrófila o a temperatura ambiente	5
3.2	Biogás	5
3.2.2	Producción de metano	5
3.2	Digestión Anaerobia	6
3.3.1	Proceso biológico	6
3.3.2	Etapas de hidrólisis	6
3.3.3	Etapas acidogénicas	6
3.3.4	Etapas metanogénicas	7
3.3.5	Fase del proceso metanogénico	7
3.4	Propiedades básicas de la materia orgánica	9
3.5	pH	9
3.6	Nutrientes	11
3.7	Tóxicos e inhibidores	12
3.8	Temperatura	12
3.9	Agitación	13
3.10	Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)	13
3.11	Material de carga del biodigestor	13
3.12	Clases de materia orgánicas	14
3.12.1	Materias primas ricas en Nitrógeno	14
3.12.2	Materias primas ricas en Carbono	14
3.12.3	Relación de carbono-nitrógeno	15

3.12.4	Potenciales y rendimientos	15
3.13	Productos/Subproductos obtenidos	16
3.13.1	Ventajas	16
3.14	Dimensionamiento del Sistema de Digestión Anaerobia	16
3.15	Estiércol disponible y carga diaria al digestor	17
3.16	Cálculo del volumen del digestor	17
3.17	Volumen líquido	18
3.18	Volumen gaseoso	18
3.19	Cálculo de las dimensiones del digestor	18
3.20	Sección eficaz	19
3.21	Relación L/D óptima del digestor	19
3.22	Cálculo del tamaño de la zanja del digestor	19
3.23	Equilibrio hidráulico del digestor	21
4	OBJETIVOS	23
4.1	Objetivo general	23
4.2	Objetivos específicos	23
5	HIPÓTESIS	24
5.1	Biogás	24
5.2	Bioabono	24
6	MATERIALES Y MÉTODOS	25
6.1	Municipio de San Luis	25
6.1.1	Ubicación geográfica	25
6.1.2	Condiciones climáticas	26
6.2	Definición de variable	26
6.2.1	Variable independiente	26
6.2.2	Variable dependiente	26
6.3	Diseño experimental	26

6.3.1	Descripción de los tratamientos	26
6.3.2	Modelo estadístico	26
6.3.3	Hipótesis estadísticas	27
6.3.4	Número de repeticiones	27
6.3.5	Tamaño y forma de las unidades experimentales	27
6.3.6	Variable respuesta	29
6.3.7	Manejo del experimento	29
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
8	CONCLUSIONES	55
9	RECOMENDACIONES	56
10	BIBLIOGRAFÍA	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1.	Composición del biogás en función del pH de la mezcla de materias primas	10
Figura No. 2.	Ubicación geográfica y colindancias del municipio de San Luis, Peten	25
Figura No. 3.	Selección de la ubicación del terreno	30
Figura No. 4.	Excavación de zanja con retroexcavadora	31
Figura No. 5.	Acabado en zanja de biodigestor	31
Figura No. 6.	Corte de triple manga	32
Figura No. 7.	Instalación de accesorios en la manga para la conducción de biogás	33
Figura No. 8.	Salida de biogas en manguera de ½” ubicada en el centro del biodigestor	33
Figura No. 9.	Inflado de manga tres capas	34
Figura No. 10.	Instalación de 3 digestores	34
Figura No. 11.	Tubo de salida de 4” de un digestor	35
Figura No. 12.	Válvula de seguridad	36
Figura No. 13.	Contador mecánico de biogás	36
Figura No. 14.	Subproductos y residuos de tilapia previo a ingresar a digestores	37
Figura No. 15.	Construcciones de techado	38
Figura No. 16.	Toma de pH y temperatura con sonda multiparamétrica	38
Figura No. 17.	Croquis de campo del área de biodigestores	49
Figura No. 18.	Producción de biogás m ³ /día de 3 cargas	45
Figura No. 19.	Comportamiento del pH en digestores	47
Figura No. 20.	Valores de pH antes de mediodía y después de mediodía en la producción de biogás en m ³ de la carga No. 1	48
Figura No. 21.	Valores de pH antes de mediodía y después de mediodía en la producción de biogás en m ³ de la carga No. 2	49
Figura No. 22.	Valores de pH antes de mediodía y después de mediodía en la producción de biogás en m ³ de la carga No. 3	50
Figura No. 23.	Producción de biogás m ³ /día vs Temperatura promedio	51

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro No. 1.	Resumen medidas biodigestor	29
Cuadro No. 2.	Características de los biodigestores construidos	40
Cuadro No. 3.	Resumen de caracterización de macronutrientes de subproductos y residuos de tilapia	41
Cuadro No. 4.	Producción de biogás en m ³	42
Cuadro No. 5.	Resumen análisis de varianza	43
Cuadro No. 6.	Comparación de medias TUKEY biogás	44
Cuadro No. 7.	Comparación de medias emparejadas	44
Cuadro No. 8.	Producción de litros de abono en digestores	53
Cuadro No. 9.	Resumen de análisis de varianza	53
Cuadro No. 10.	Prueba múltiple de medias TUKEY bioabono	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1.	Bacterias en un biodigestor según su temperatura de operación	8
Tabla No. 2.	Tiempos de retención en función a las bacterias existentes	8
Tabla No. 3.	Fórmulas para calcular el volumen gaseoso, volumen líquido y su relación	18
Tabla No. 4.	Profundidad, ancho superior y ancho inferior en función del ancho del rollo	20
Tabla No. 5.	Dimensión de la zanja del biodigestor en base a la carga	20
Tabla No. 6.	Tiempo de retención hidráulica según la temperatura	21
Tabla No. 7.	Tiempo de retención hidráulico de estiércol en distintas regiones	22
Tabla No. 8.	Dimensión de la zanja del biodigestor en base a la carga	22

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, pese al deterioro del medio ambiente se han adoptado en algunas empresas productivas criterios de aprovechamiento de desechos orgánicos de actividades agropecuarias, los cuales constituyen entre un 20% a 60% de desechos de sus actividades y procesos. Una de las causas principales del no aprovechamiento de éstos, es la fundamentación científica y el desconocimiento sobre la tecnología apropiada para la transformación en subproductos y desechos, que generaría valor agregado a los cultivos. Dentro de las alternativas de manejo y aprovechamiento de desechos se han diseñado sistemas de biodigestión anaerobia en biodigestores, de los cuales se obtiene biogás con una composición de 60% -70% metano (CH₄), y 20%-30% dióxido de carbono (CO₂). Este biogás puede ser utilizado como cualquier otro combustible para la generación de energía, calefacción, alumbrado, etc.; cuando existe una mezcla de biogás y aire forman un gas detonante altamente explosivo, lo cual permite que también sea empleado como combustible en motores de combustión interna adaptado. El otro producto obtenido es el abono, con excelentes propiedades fertilizantes que se pueden utilizar para cultivos agrícolas o forestales (Avedaño, 2010).

La Empresa Paraíso Springs Aquaculture Guatemala, cuenta con una producción proyectada de 6000 toneladas de tilapia viva al año y una planta procesadora para ofrecer al mercado internacional filetes frescos, el producto final representa únicamente el 33 % del peso total de la biomasa producida, teniendo un 67 % de subproductos. Estos desechos representan el 67 % del costo de producción que debe ser absorbido por el precio del filete en el mercado internacional. Actualmente esta disposición de desechos genera gastos adicionales a esta empresa, al recurrir a prácticas ambientales para la degradación de ellos, sin que se haga ningún aprovechamiento de los mismos. El mismo problema de generación de subproductos a partir del engorde y comercialización de tilapia sufren otros productores, al no tener opciones sobre la tecnología apropiada para la disposición de los mismos, debido a que a los sistemas de producción de tilapia en Guatemala son de tipo extensivos, semi-intensivos e intensivos, con una demanda cíclica o estacional, por lo que la mayoría de estas granjas requieren cosechas parciales generando así subproductos y residuos de forma discontinua.

El objetivo de esta investigación fue cuantificar la cantidad de biogás y bioabono de tres cargas de subproductos y desechos del procesamiento de tilapia en un sistema experimental de digestión anaerobia y determinar si las propiedades de los productos obtenidos son aptos a ser explotados a diferentes escalas y empleados en alguna etapa del proceso productivo, adoptando este procedimiento como alternativa de mitigación ambiental de la disposición de residuos del procesamiento de tilapia y reducción de gases de efecto invernadero.

El sistema de biodigestión utilizado en la evaluación, se adaptó a las condiciones reales de las granjas del país en generación discontinua de desechos, lo cual servirá de información base para futuros estudios y aprovechamientos de desecho de tilapia, tomando en cuenta la variabilidad de los parámetros para cada región y sistema. Los datos fueron analizados mediante el análisis de varianza ANOVA y prueba múltiple de medía TUKEY, donde se realizaron tres tratamientos con tres repeticiones.

2. ANTECEDENTES

En la Universidad Nacional del Nordeste Argentina, se realizó un proyecto que buscó reducir el impacto ambiental que genera un frigorífico mediante la caracterización de los parámetros físico-químicos de residuos orgánicos provenientes de frigoríficos de peces, datos útiles para el diseño de un sistema generador de gas metano. Algunos de los parámetros que fueron evaluados son: pH, sólidos sedimentables, sólidos fijos, sólidos totales, sólidos volátiles, demanda química de oxígeno, ácido graso, cantidad de biogás generado periódicamente en función de la temperatura, entre otros. Para diseñar un biodigestor es necesario saber la naturaleza de la materia orgánica que se degradará y la cantidad de materia orgánica disponible por día. La naturaleza de la materia orgánica a degradar indicará los metros cúbicos de biogás por kg de materia orgánica disponible (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2007).

La Universidad Tecnológica de Gdansk, Polonia experimentó la producción de biogás a partir de desechos de pescado en codigestión con lodos residuales para mejorar la producción de biogás a partir de desechos de pescado. La investigación da respuestas útiles para determinar las proporciones más adecuadas de diferentes co-sustratos que proporcionan un potencial de biodegradación optimizado o mejoran potencial metano. Este trabajo examinó el potencial de producción de metano a partir de desechos de pescado co-digestión anaerobia y lodos de depuradora (primaria y secundaria). Diferentes tipos de inóculo se utilizaron (SRT diferente). Los experimentos se llevaron a cabo en la temperatura mesofílica con el uso de metano automático y sistema de Prueba de Potencial (AMTPS II). Los resultados obtenidos fueron que después de 24 días se observó el mayor volumen de metano, dos de las muestras (+ intestinos de lodos; lodos + intestinos + carne). Se obtuvieron los peores resultados para la mezcla de hierba. Las vísceras de pescado contienen gran cantidad de enzimas, que mejoran la hidrólisis que es la primera etapa de la fermentación. El lodo primario es una buena fuente de fácil carbono biodegradable, Por lo tanto, dicha mezcla será la mejor solución para utilizar los desechos de pescado. Los resultados de este estudio han demostrado que la composición de sustrato más adecuado es mezcla con los intestinos de pescado y lodo de aguas residuales (Tomczac, y Levlin, 2012).

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Biodigestor

Un biodigestor, es una planta productora de biogás y abono, donde se realiza un proceso anaeróbico de descomposición (proceso de fermentación anaeróbica). La materia prima está constituida por materia orgánica, como desechos agrícolas, residuos animales, residuos humanos, es decir, en el biodigestor tal como indica su nombre sucede una digestión de la materia prima (International City/County Management Association [ICMA], 2011).

3.1.1 De fermentación continúa

Cuando comienza la digestión normal y la producción del biogás después de cierto periodo a partir de una carga inicial, se agregan materiales continuamente al digestor y el efluente se descarga en forma simultánea en la misma cantidad en que entra el material (IDAE, 2007).

3.1.2 De fermentación semicontinua

La primera carga consta de gran cantidad de materiales. Cuando va disminuyendo gradualmente el rendimiento de gas, se agregan nuevas materias primas y el efluente se va descargando gradualmente en la misma cantidad (IDAE, 2007).

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). Aquí el concepto de tiempo de retención no tiene sentido y se hablaría de tiempo de digestión (IDAE, 2007).

3.1.3 De fermentación discontinua o por lotes

Los digestores se cargan con material en un solo lote. Cuando el rendimiento de gas decae a un bajo nivel después de un periodo de fermentación, se vacían los digestores por completo y se alimentan una vez más (IDAE, 2007).

3.1.4 Fermentación mesófila

Es este caso la fermentación necesita una temperatura menor, comparada con la fermentación mesofílica, la descomposición de la carga es más lenta, pero presenta otras bondades (IDAE, 2007).

3.1.5 Fermentación psicrófila o a temperatura ambiente

La temperatura de fermentación varía según las condiciones atmosféricas, por lo cual el rendimiento de gas fluctúa marcadamente según la estación. Este proceso requiere poca inversión (IDAE, 2007).

3.2 Biogás

Producto gaseoso de la digestión anaerobia de compuestos orgánicos. Su composición, que depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada, puede ser la siguiente:

-50-70% de metano (CH₄).

-30-40% de anhídrido carbónico (CO₂).

-5% de hidrógeno (H₂), ácido sulfhídrico (H₂S), y otros gases (Ministerio de Energía de Chile [MINENERGIA], Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], Food and Agriculture Organization [FAO], y Global Environment Facility [GEF], 2011).

Debido a su alto contenido en metano, tiene un poder calorífico 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/Nm³ (6,4 kWh/Nm³). Es decir, salvo por el contenido en H₂S, es un combustible ideal (MINENERGIA, PNUD, FAO, y GEF, 2011).

3.2.2 Producción de metano

Para un sistema anaerobio, la DQO (Demanda Química de Oxígeno) puede considerarse un parámetro conservativo, es decir, la suma de las DQO de entrada debe ser igual a la suma de las DQO de salida:

$DQO_{influyente} = DQO_{efluente} + DQO_{biogás}$ (MINENERGIA, PNUD, FAO, y GEF, 2011).

3.3 Digestión Anaerobia

La digestión anaeróbica consiste en la descomposición de material biodegradable en ausencia de oxígeno para dar como resultado dos productos principales: biogás (compuesto mayoritariamente por metano) y el lodo estabilizado, conocido como digerido. Esta tecnología utiliza reactores

(digestores) cerrados donde se controlan los parámetros para favorecer el proceso de fermentación anaeróbica, un proceso muy conocido ya que también se produce de un modo natural y espontáneo en diversos ámbitos, como por ejemplo en pantanos, en yacimientos subterráneos o incluso en el estómago de los animales (IDAE, 2007).

3.3.1 Proceso biológico

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar, como por la cantidad de grupo de bacterias involucradas en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea. El proceso de degradación de la materia orgánica se divide en cuatro etapas:

- a) Hidrólisis.
- b) Etapa fermentativa o acidogénica.
- c) Etapa acetogénica.
- d) Etapa metanogénica (ICMA, 2011).

3.3.2 Etapa de hidrólisis

Las bacterias de fermentación secretan exoenzimas que hidrolizan las materias orgánicas (las descomponen). Durante este proceso existen diversas variedades de bacterias facultativas, las cuales cumplen funciones catabolizantes (descomponiendo y degradando) de celulosa, grasas o proteínas para producir monosacáridos, pépticos aminoácidos, glicerol y ácidos grasos (ICMA, 2011).

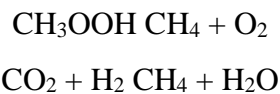
3.3.3 Etapa acidogénica

En esta fase las bacterias catabolizan los ácidos superiores, además de los ácidos grasos o de cadena Larga y aminoácidos aromáticos producto de la fase anterior, produciendo hidrógeno y ácido acético. Las bacterias protagónicas de esta fase son facultativas, es decir, viven con presencia y ausencia de oxígeno (ICMA, 2011).

3.3.4 Etapa metanogénica

La metanogénesis, última etapa, consiste en la transformación bacteriana del ácido acético y del ácido fórmico en dióxido de carbono y metano y la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno (ICMA, 2011).

La formación de metano se realiza a partir de dos vías: Por fermentación de ácido acético (A) y por reducción de CO_2 (B) (principalmente). Las siguientes ecuaciones representan las mismas.



3.3.5 Fase del proceso metanogénico

Cabe señalar, además que las fases no son estrictamente consecutivas, es decir, una fase se puede estar desarrollando paralelamente a otra. Durante el proceso de digestión la materia prima se vuelve líquida en un gran porcentaje (ICMA, 2011).

Establece que una variable, de gran importancia, en el proceso de digestión, es la temperatura de trabajo del digestor, la cual marca la fermentación (digestión), es decir, el tipo de bacterias productoras de ácidos y metano existentes predominantemente durante el proceso (Avedaño, 2010).

Las bacterias responsables de este proceso son anaeróbicas estrictas. Se distinguen dos tipos de microorganismos, los que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y los que reducen el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas). La clasificación de las bacterias según la temperatura ambiente en que se reproduzcan, se describe en la Tabla No.1 (Avedaño, 2010).

La principal vía de producción de metano es la correspondiente a la transformación del ácido acético, con alrededor del 70% del metano producido. Este es un proceso lento y constituye la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica (Cueva, 2012).

Tabla No. 1. Bacterias en un biodigestor según su temperatura de operación

°T del Biodigestor	Tipo de Bacterias
De 10-20 °C	Bacterias Psicrófilas
De 20-45 °C	Bacterias mesófilas
De 45-60 °C	Bacterias Termófilas

Fuente: Avedaño, 2010.

Así también, según las bacterias de operación, se puede definir el tiempo de retención del mismo (tiempo de digestión), con su correspondiente producción (Tabla No. 2) (Avedaño, 2010).

Tabla No. 2. Tiempos de retención en función a las bacterias existentes

Tipo de Bacteria	Tiempo de Retención	Descripción
Bacterias Psicrófilas	Más de 100 días	-Se considera que la digestión por las bacterias es estables -La producción de gas es menor, debido a que la digestión es lenta
Bacterias mesófilas	Más de 20 días	-se considera como ideal. Las bacterias son más estables -Producen sedimentos de alta calidad como fertilizantes
Bacterias Termófilas	Más de 8 días	-Son muy sensibles a cualquier cambio en el digestor. -Los sedimentos que producen son de baja calidad como fertilizantes. -Digestión es más rápida.

Fuente: Avedaño, 2010.

En el diseño de biodigestores anaerobios, se definen las siguientes propiedades (Avedaño, 2010):

3.4 Propiedades básicas de la materia orgánica

Durante la digestión se encuentra que no toda materia prima se digiere, si no que parte se convierte en metano, otra en sedimento y habrá también una porción que no se digiere.

3.5 pH

El rango de pH óptimo es de 6,6 a 7,6. Los ácidos grasos volátiles y el acetato tienden a disminuir el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los ácidos grasos volátiles a medida que lo producen las bacterias acetogénicas, estos se acumulan y disminuyen el pH en el biodigestor. Sin embargo, el equilibrio CO_2 bicarbonato opone resistencia al cambio de pH (Avedaño, 2010).

Existen dos métodos prácticos para corregir los bajos niveles de pH en el biodigestor. El primero es parar la alimentación del biodigestor y dejar que las bacterias metanogénicas asimilen los ácidos grasos volátiles; de esta forma aumentará el pH hasta un nivel aceptable. Deteniendo la alimentación disminuye la actividad de las bacterias fermentativas y se reduce la producción de los ácidos grasos volátiles. Una vez que se haya restablecido el pH se puede continuar la alimentación del biodigestor pero en pocas cantidades, después se puede ir aumentando gradualmente para evitar nuevos descensos (Avedaño, 2010).

Una disminución del pH puede traer como resultado la inhibición del crecimiento de las bacterias metanogénicas, ello hace que disminuya la producción de metano y aumente el contenido de dióxido de carbono y se produzcan olores desagradables por el aumento del contenido de sulfuro de hidrógeno (Avedaño, 2010).

De manera general, el pH se mantiene bastante estable a pesar de la producción de ácidos por las bacterias, ya que en el medio fermentativo se generan sustancias tampones que garantizan un rango de pH adecuado; además, la velocidad de formación de ácido depende de la velocidad de la conversión a biogás. Se acepta generalmente que los valores óptimos del pH oscilen entre 5.5 y 8.0, sin embargo en el sistema de dos etapas el pH recomendado depende de la fase anaeróbica (Avedaño, 2010).

Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El óptimo es entre 5.5 y 6.5 para acidogénicos y entre 7.8 y 8.2 para metanogénicos. El pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal. Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0. 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 (Figura No. 1) por tanto, tiene menores cualidades energéticas. Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad. Los acidogénicos son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH (MINENERGIA, PNUD, FAO, y GEF, 2011).

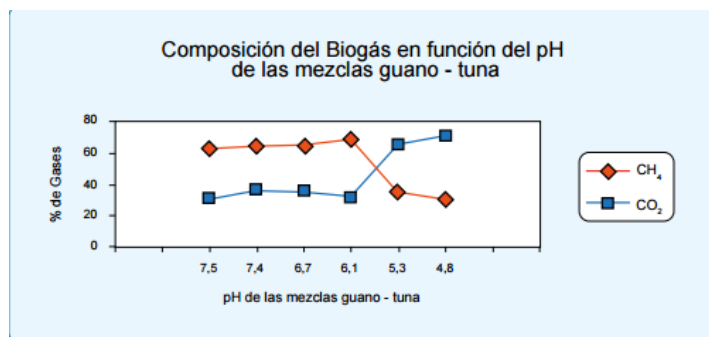


Figura No. 2. Composición del biogás en función del pH de la mezcla de materias primas (MINENERGIA, PNUD, FAO, y GEF, 2011)

Los valores de pH bajos reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético y H₂. Al aumentar la presión parcial del H₂, 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, los cual disminuirá la producción de ácido acético, generando una disminución del pH. Si la situación no se corrige, el proceso eventualmente fallará. 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 (MINENERGIA, PNUD, FAO, y GEF, 2011).

En los procesos anaeróbicos, la caída del pH es causada frecuentemente por la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) y/o por la excesiva acumulación de dióxido de carbono. Una de las primeras opciones para resolver el problema es reducir la tasa de carga orgánica volumétrica, hasta el punto en el cual los AGV se consuman más rápido de lo que se generan. Una vez que el exceso de AGV se ha agotado, el pH del sistema retorna a los rangos de operación normales y la metanogénesis comienza a repuntar. La carga orgánica volumétrica puede incrementarse gradualmente a medida que el proceso se recupera, hasta completar la capacidad de carga. En circunstancias extremas, además de la disminución de la carga orgánica volumétrica se puede suplementar algún químico para ajustar el pH. Otra opción recientemente explorada consiste en la dosificación periódica de oxígeno en el sistema anaeróbico. La oxigenación limitada contribuye a eliminar drásticamente el exceso de AGV a través de los microorganismos facultativos. Estos microorganismos son menos susceptibles a cambios en el pH. Debido a que los metanogénicos son vulnerables a cambios bruscos en el pH fuera del rango óptimo, el sistema anaeróbico requiere una capacidad buffer suficiente (alcalinidad) para mitigar los cambios en el pH. El pH de un sistema anaeróbico, operando dentro de los rangos aceptables, es controlado principalmente por la alcalinidad natural del sistema (Cueva, 2012).

3.6 Nutrientes

Con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos. Una de las ventajas inherentes al proceso de digestión anaerobia es su baja necesidad de nutrientes como consecuencia de su pequeña velocidad de crecimiento. El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimento de las bacterias formadoras de metano. Por tanto, la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) tiene una gran importancia para el proceso fermentativo recomendándose un rango 20-30 como el óptimo (Cueva, 2012).

3.7 Tóxicos e inhibidores

Las sustancias inhibidoras son compuestos que bien están presentes en el residuo antes de su digestión o bien se forman durante el proceso fermentativo anaerobio. Estas sustancias reducen el rendimiento de la digestión e incluso pueden llegar a causar la desestabilización completa del

proceso. A determinados niveles los AGV generan serios problemas de inhibición sobre todo en combinación con niveles bajos de pH (Cueva, 2012).

Los problemas de inhibición son los causados por el amonio, el ácido sulfhídrico, o los ácidos grasos de cadena larga. Los pesticidas, desinfectantes o antibióticos presentes en algunos subproductos también pueden llegar a afectar el proceso según su concentración. Y parámetros operacionales que hacen referencia a las condiciones de trabajo de los digestores (Cueva, 2012).

3.8 Temperatura

Los niveles de reacción química y biológica normalmente aumentan con el incremento de la temperatura. Para los biodigestores de biogás esto es cierto dentro de un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos. Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo, debido a la degradación de las enzimas; y esto es crítico para la vida de las células. Los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y metabolismo dentro de un rango de temperatura bien definido, particularmente en los niveles superiores, los cuales dependen de la termoestabilidad de la síntesis de proteínas para cada tipo particular de microorganismo. Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el biodigestor. Esto se debe a que los demás grupos crecen más rápido, como las acetogénicas, las cuales pueden alcanzar un catabolismo sustancial, incluso a bajas temperaturas (Cueva, 2012).

Existen tres rangos de temperatura para la digestión de residuales, el primero es el mesófilo (de 20 a 45 °C), el segundo es el termófilo (por encima de 45 °C). El óptimo puede ser de 35 °C a 55°C. La ventaja de la digestión termófilo es que la producción de biogás es aproximadamente el doble que la mesófilo, así que los biodigestores termofílicos pueden ser la mitad en volumen que los mesofílicos, manteniendo su eficiencia general (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México [SAGARPA], y Fideicomiso de Riesgo Compartido [FIRCO], 2013).

Se han realizado numerosos trabajos sobre la digestión termofílica en países templados. Sin embargo, se requieren considerables cantidades de energía para calentar los residuales hasta 55°C. El tercer rango (psicrofílico) ocurre entre los 10 y 25 °C. Existen algunas restricciones para el uso de esta temperatura en la digestión anaerobia, como son la necesidad de utilización de:

reactores anaerobios de cama fija, inóculos mesofílicos, un tiempo de retención alto y mantener una acidificación baja (SAGARPA, y FIRCO, 2013).

3.9 Agitación

En función de la tipología de reactor debe transferirse al sistema el nivel de energía necesario para favorecer la transferencia de sustrato a cada población de bacterias, siendo necesario un equilibrio entre la buena homogeneización y la correcta formación de agregados bacterianos (SAGARPA, y FIRCO, 2013).

3.10 Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

Existen dos parámetros para identificar el tiempo de retención de las sustancias en el biodigestor:

- El tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRSB) que se determinan dividiendo la cantidad de MO o SV que entra al biodigestor entre la cantidad de MO que sale del sistema cada día. El TRSB es asumido para representar la media del tiempo de retención de los microorganismos en el biodigestor.

- El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la relación entre el volumen del biodigestor (VD) y la media de la carga diaria (MINENERGIA, PNUD, FAO, y GEF, 2011).

Estos parámetros son importantes para los biodigestores avanzados de alto nivel, los cuales han alcanzado un control independiente del TRSB y del TRH a través de la retención de la biomasa. La medición del TRH es más fácil y más práctica que el TRSB a nivel de las granjas.

Velocidad de carga orgánica, OLR en inglés. Es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención. El incremento en la OLR implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida, debiendo encontrar un valor óptimo técnico/económico para cada instalación y residuo a tratar.

3.11 Material de carga del biodigestor

Cada material de carga o materia se compone de:

-Sustancias sólidas orgánicas.

-Sustancias sólidas inorgánicas

-Agua

El biogás se produce a partir del material orgánico. Los materiales inorgánicos (minerales y metales) son lastre no aprovechable y no son modificados durante el proceso de fermentación anaeróbica (MINENERGIA, PNUD, FAO, y GEF, 2011).

En presencia de agua, aumenta la fluidez del material de fermentación (dilución de la carga), lo cual es importante para el funcionamiento de una planta de biogás, puesto que en un medio líquido las bacterias de metano llegan más rápidamente al material de fermentación fresco acelerándose así el proceso de fermentación, pero disminuyendo la productividad de la masa fermentada (rendimiento). La dilución de la carga expresa el contenido de sólidos totales en la misma, usualmente expresado en porcentaje; depende del tipo de fermentación con la que estemos trabajando (continua, semicontinua o por lotes). Para sistemas de fermentación continua el porcentaje de sólidos totales aconsejables es de 6 a 10 % y en sistemas discontinuos o por lotes los valores recomendados varían entre 25 a 35 % de sólidos totales (SAGARPA, y FIRCO, 2013).

3.12 Clases de materia orgánicas

Para el caso de las materias orgánicas, debido al requerimiento, pueden subdividirse en dos tipos:

3.12.1 Materias primas ricas en Nitrógeno

Este tipo de materias principalmente está integrado por los residuos humanos y animales. Se caracterizan por estar constituidos por partículas finas, contener compuestos de baja masa molecular, alto contenido de nitrógeno y mayor velocidad de biodegradación y generación de gas durante la fermentación (ICMA, 2011).

3.12.2 Materias primas ricas en Carbono

Está integrada básicamente por residuos agrícolas, como diversos tallos y hojas; se componen generalmente de compuestos de estructura compleja o cadena larga (celulosa, lignina ceras y otros), se caracterizan por tener una lenta pero mayor producción de biogás en el proceso de fermentación (ICMA, 2011).

Es muy importante la categorización de la materia orgánica, Un factor muy importante en la generación de gas del digestor, es la relación carbono-nitrógeno (C/N) de la materia orgánica con que alimentamos al mismo (ICMA, 2011).

3.12.3 Relación de carbono-nitrógeno

Desde el punto de vista biológico los digestores se pueden considerar como un cultivo de bacterias que se alimentan con los desechos orgánicos, transformándolos. Los alimentos principalmente de las bacterias anaeróbicas son el carbono (en la forma de carbohidratos) y el nitrógeno (en proteínas, nitratos, etc.) (ICMA, 2011)

El carbono se utiliza para obtener energía y el nitrógeno para la construcción de estructuras celulares. Esas bacterias utilizan carbono con una rapidez aproximada de 25-30 veces más que del nitrógeno. Es por ello que la relación adecuada de C/N es de 25 a 30, sin la cual se tendría un desequilibrio en el proceso, si la relación es mayor a 30 (mayor cantidad de carbono), el ritmo de producción disminuirá debido a que el nitrógeno se consumirá más rápido que el carbono, acidificando la masa de fermentación (El valor del pH desciende); pero si la relación es menor (menos cantidad de carbono), el proceso consumirá rápidamente el carbono y al agotarse este, el proceso parara, elevando el valor de pH (la masa de digestión se vuelve alcalina), y el nitrógeno sobrante se perderá en forma de amoníaco (NH_3) (ICMA, 2011).

3.12.4 Potenciales y rendimientos

La producción de metano o biogás que se obtendrá de un residuo determinado depende de su potencial (producción máxima), del tiempo de retención, de la velocidad de carga orgánica, de la temperatura de operación y de la presencia de inhibidores. En ésta se aprecia el efecto negativo del nitrógeno amoniacal, sobre todo en régimen termofílico. Una variable adicional en el sector ganadero es el tiempo de almacenaje de los purines antes de su digestión. Tiempos de almacenaje superiores a 3 meses pueden reducir su potencial de producción en más del 70%, ya que durante el almacenaje tiene lugar un proceso de fermentación incontrolado con emisión del metano a la atmósfera (Royal Institute of Technology [KTH], 2012).

3.13 Productos/Subproductos obtenidos

El biogás es el principal producto obtenido en el proceso, pero como ya se ha comentado también se genera el denominado digerido, que se puede decir que es la mezcla del residuo orgánico ya digerido y la biomasa microbiana producida (KTH, 2012).

El biogás debe ser refinado previamente en cualquiera de sus aplicaciones energéticas. En este sentido, las operaciones de depuración varían en función del uso del biogás; los requerimientos de calidad son mayores cuando se utiliza como combustible de automoción, se inyecta en las líneas de distribución del gas natural o se utilizan en pilas de combustible. La purificación del biogás incluye la eliminación de CO₂, SH₂, NH₃, agua y partículas sólidas.

3.13.1 Ventajas

Las siguientes, son las ventajas de la utilización de biodigestores:

- El biogás, con un alto poder calorífico, puede ser utilizado en la propia instalación para generación de electricidad y/o calor (co-generación); con el consiguiente beneficio económico.
- Cumplimiento de los objetivos del protocolo de Kyoto, objetivos europeos de producción de energía renovable.
- Posibilidad de subvenciones a innovación y demostración en aplicaciones concretas.
- Posibilidad de subvenciones e incentivos para la inversión en instalaciones de biometanización.
- La materia orgánica resultante final (digerido) está bastante estabilizada.
- Los digestores trabajan dentro de un rango de humedad que se acerca al de la mayoría de materiales orgánicos aptos para su biodegradación.
- Se puede trabajar conjuntamente con varios subproductos (Cueva, 2012).

3.14 Dimensionamiento del Sistema de Digestión Anaerobia

Los factores ligados a la producción de biogás, podrán utilizarse para realizar estimaciones adecuadas para el dimensionamiento volumétrico del sistema, los cuales deberán quedar registrados en las memorias de cálculo que determinen el potencial de producción de biogás en el

sistema de digestión anaerobia (Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona [ETSEIB], 2012).

Los factores base que deberán considerarse en el dimensionamiento de biodigestores serán:

- Tipo y disponibilidad de la biomasa.
- Características fisicoquímicas y microbiológicas de la biomasa.
- Aspectos geográficos de la zona.

3.15 Estiércol disponible y carga diaria al digestor

La materia prima que puede ser empleada en un digestor anaerobio es muy diversa: purines, estiércol, residuos agrícolas, excedentes de cosechas, aguas residuales con alta carga orgánica, etc. (Avedaño, 2010). En todo caso, debe evitarse alimentar residuos con cáscara dura o vísceras, ya que estos requerirían un tiempo para ser digeridos mucho mayor del esperable. Los estiércoles que mayores cantidad de biogás producen son los del cerdo y los humanos, pero tienen algunas particularidades: el fertilizante que resulta es muy ácido como para ser aplicado directamente a los campos; y, en el caso de emplear excrementos humanos, existen bacterias presentes en el efluente que podrían pasar de nuevo al organismo en caso de que se usara este fertilizante sobre los cultivos de productos destinados a consumo humano. El estiércol más equilibrado es el que proviene del ganado vacuno; además, se produce en grandes cantidades a lo largo del día y es fácil de recoger. Otro parámetro será, por lo tanto, la cantidad de estiércol fresco que se pueda recoger diariamente. En caso de que el ganado esté estabulado o pase un tiempo apreciable a lo largo del día en el interior del establo dicha recogida será rápida y fácil. En caso contrario, es decir, que no se cuente con establo o que el ganado permanezca en el establo únicamente un tiempo determinado durante el día, se podrá suponer un porcentaje de recogida de estiércol del 25% del total producido diariamente por el animal. En caso de no contar con establo, habrá que considerar el tiempo y el esfuerzo que habría que invertir en su recogida diaria.

3.16 Cálculo del volumen del digestor

El digestor comprende dos zonas bien diferenciadas: una gaseosa, donde se acumula el biogás antes de salir del interior de la manga de plástico; y otra líquida, donde se deposita el estiércol líquido. La parte gaseosa comprende un 25% del volumen total del digestor; la líquida un 75% del mismo (Avedaño, 2010). Así, el volumen total será la suma de ambos.

Tabla No. 3. Fórmulas para calcular el volumen gaseoso, volumen líquido y su relación

Descripción	Formula
Volumen líquido	$VL (L)=carga (L/día)* THR$
Volumen gaseoso	$VG(L)= VL/3(L)$
Volumen Total	$VT=VL+VG$

Fuente: Avedaño, 2010.

3.17 Volumen líquido

Para calcular el volumen líquido del digestor habrá que multiplicar el tiempo de retención (estimado a partir de la temperatura) por la carga diaria de estiércol. Si se supone el digestor vacío en un principio y se comienza a cargarlo diariamente tardará en producirse la digestión tantos días como se hayan estimado en el tiempo de retención. En el día 'tiempo de retención + 1 día' saldrá el primer efluente líquido del digestor (Avedaño, 2010).

3.18 Volumen gaseoso

Una vez que dentro del digestor comienza a producirse el biogás este tiende a acumularse en la parte superior del digestor, formándose una campana en la manga de polietileno. El volumen gaseoso se calcula a partir del volumen líquido, siendo una tercera parte de este último (Avedaño, 2010).

3.19 Cálculo de las dimensiones del digestor

Una vez que se conocen los volúmenes del digestor se procederá a calcular sus dimensiones principales: la longitud y la sección eficaz. Selección del ancho de rollo de manga de polietileno: El polietileno tubular es el plástico que normalmente se emplea en las carpas de los invernaderos en varios colores; para ello, suele cortarse la manga longitudinalmente y se crea una lámina con un ancho del doble de la manga. En las ferreterías suelen encontrarse anchos de manga de 1, 1,25, 1,50, 1,75 y 2 metros, los cuales suelen venderse por rollos de 50 metros o cortados con la longitud deseada. Tamaños mayores del ancho de manga pueden conseguirse generalmente por encargo, por lo que no se contemplan en esta memoria (Avedaño, 2010).

En la construcción del digestor se emplearon las mismas mangas pero sin ser cortadas. Teniendo en cuenta que el digestor será una manga amarrada a ambos extremos que adoptará una forma

cilíndrica una vez que se cargue y comience a producirse el biogás, no interesa cortarla; en caso de necesitar tamaños de manga superiores a dos metros, podrían pegarse varias mangas cortadas longitudinalmente empleando cintas aislantes de adhesivo según la medida deseada (Food and Agriculture Organization [FAO], 2001).

3.20 Sección eficaz

El volumen total del digestor obtenido anteriormente se empleará en el cálculo de la sección eficaz (Avedaño, 2010). El digestor, una vez cargado y con biogás generado, adoptará una forma cilíndrica. El volumen de un cilindro es:

$$V_r (m^3) = S (m^2) \cdot L (m) = \pi \cdot \frac{D^2 (m)}{4} \cdot L (m)$$

Donde S es la sección eficaz, L la longitud del digestor y π una constante que toma un valor de $\pi = 3,14$.

Una vez que se conoce el volumen total del digestor y la sección eficaz se calcula la longitud del digestor como:

$$L (m) = \frac{V_r (m^3)}{S (m^2)}$$

3.21 Relación L/D óptima del digestor

Existe una relación óptima entre la longitud y el diámetro del digestor, de cara a no trabajar con digestores demasiado largos y de poca sección eficaz, o digestores cortos y anchos. El valor óptimo de L/D debe estar comprendido entre 5 y 10, con un óptimo de 7. Así, una vez que se tienen los valores de longitud y diámetro del digestor, se divide uno sobre el otro, y se obtiene un valor. Se deberá seleccionar aquel ancho de manga que proporcione un valor de L/D adecuado (Avedaño, 2010).

3.22 Cálculo del tamaño de la zanja del digestor

El digestor irá alojado en el interior de una zanja con forma de talud excavada en el terreno. Esto se hace así para proporcionar un soporte de la estructura y para mantener constante la temperatura. Los rayos del sol durante el día calientan el terreno y ese calor se libera a medida que la temperatura ambiente desciende, proporcionando una temperatura que tiende a ser homogénea en

el interior del digestor. La longitud de la zanja vendrá determinada por la longitud del digestor; el resto de dimensiones, es decir, el ancho superior, el ancho inferior y la profundidad de la zanja, se determinan a partir del ancho de rollo empleado (Tabla No. 4) (Avedaño, 2010).

Tabla No. 4. Profundidad, ancho superior y ancho inferior en función del ancho del rollo

Ancho del rollo (m)	Profundidad, H(m)	Ancho superior, AS (m)	Ancho inferior, AI (m)
1	0.60	0.70	0.60
1.25	0.70	0.90	0.70
1.50	0.80	1.00	0.90
1.75	0.95	1.25	1.00
2.00	1.00	1.45	1.15

Fuente: Avedaño, 2010.

Se está considerando en todo momento que el volumen ocupado por el biogás será el 25% del volumen total del digestor. En caso de que la zanja se dimensionara mal podría ocurrir que este volumen fuera mayor o menor, lo cual disminuiría o aumentaría el tiempo de retención en el digestor, respectivamente (Avedaño, 2010). Las dimensiones de la zanja se pueden realizar en función de la carga orgánica ingresada como se observa en la Tabla No. 5.

Tabla No. 5. Dimensión de la zanja del biodigestor en base a la carga

Ancho del rollo (m)	Diámetro (m)	Sección eficaz ($\pi \cdot D^2/4$) (m ²)	Longitud (m)	Relación L/D
1	0.64	0.32	24.00	37.50
1.25	0.80	0.50	15.36	19.20
1.50	0.96	0.72	10.66	11.10
1.75	1.12	0.97	7.92	7.10
2	1.28	1.27	6.05	4.73

Fuente: Avedaño, 2010.

3.23 Equilibrio hidráulico del digestor

El digestor que se propone funciona de forma continua, es decir, se alimenta diariamente y no suele ser vaciado a lo largo de su vida útil. El equilibrio hidráulico viene determinado, por tanto,

por la alimentación al digestor y la colocación de las tuberías de entrada y salida del mismo. Al introducir la mezcla cada día esta irá desplazando el volumen líquido existente en el interior del digestor, rebosando por la salida la misma cantidad de estiércol ya digerido. Así, para asegurar dicho equilibrio hidráulico y que el digestor se mantenga en condiciones de ausencia de oxígeno es necesario fijar la altura a la que estará colocada la tubería de salida del lodo. Será la boca de salida de esta conexión la que determine el nivel del líquido existente en el digestor. El nivel corresponderá con la profundidad de la zanja, que era la dimensión que determinaba el volumen de líquido en el interior del digestor. Por lo tanto, el rebase de la conexión de salida deberá coincidir con la profundidad de la zanja calculada; en caso contrario, los volúmenes gaseoso y líquido serían distintos, variando también el tiempo de retención (FAO, 2001).

Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogás. Si se toma como ejemplo típico el uso de estiércol de ganado, los TRH varían con la temperatura media de cada región, con la variación diaria estacional como se puede observar en las Tablas No. 6. y No. 7.

Tabla No. 6. Tiempo de retención hidráulica según la temperatura

Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días) sin mejora de fertilizante	Tiempo de retención (días) con mejora de fertilizante
10	70	87
15	51	63
20	32	40
25	27	34
30	20	25

Fuente: Avedaño, 2010.

Tabla No. 7. Tiempo de retención hidráulico de estiércol en distintas regiones

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

Fuente: Avedaño, 2010.

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. En un sistema de carga diaria (régimen semicontinuo), el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga que será necesario para alimentar al digestor (FAO, 2001).

Es decir que para un tiempo de retención de 30 días, cada día se carga 1/30 del volumen total del digestor, y en promedio los residuos orgánicos y la masa microbiana permanecen 30 días dentro del sistema. La cantidad de biogás producido por un digestor dependerá, entre otros, de la cantidad de residuo cargado diariamente. Generalmente se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días y con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digestor. Por lo tanto, mientras menor sea el tiempo de retención, el tamaño del digestor se reduce y también los costos (FAO, 2001).

Tabla No. 8. Dimensión de la zanja del biodigestor en base a la carga

Ancho del rollo (m)	Diámetro (m)	Sección eficaz ($\pi \cdot D^2/4$) (m ²)	Longitud (m)	Relación L/D
1	0.64	0.32	24.00	37.50
1.25	0.80	0.50	15.36	19.20
1.50	0.96	0.72	10.66	11.10
1.75	1.12	0.97	7.92	7.10
2	1.28	1.27	6.05	4.73

Fuente: Avedaño, 2010.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General:

Establecer un sistema de biodigestión anaerobia utilizando residuos y desechos del procesamiento de tilapia.

4.2 Objetivos Específicos:

- Evaluar el proceso de producción de biogás mediante la toma de parámetros de pH, temperatura y tiempo de retención hidráulica.
- Determinar cuál de las tres cargas de residuos y desechos del procesamiento de tilapia (1250, 1875 y 2500 kg) presenta el mayor potencial para la producción de biogás.
- Determinar la mejor carga de residuos y desechos de tilapia para la generación de bioabono.

5. HIPÓTESIS

5.1 Biogás

H^o = La producción de biogás en biodigestores es igual aplicando una carga de materia orgánica de 1250, 1875 y 2500 kg.

H1 = En al menos una de las cargas de 1250, 1875 y 2500 kg la producción de biogás en los biodigestores es diferente.

5.2 Bioabono

H^o = La producción de abono orgánico líquido en biodigestores es igual aplicando una carga de materia orgánica de 1250, 1875 y 2500 kg.

H1 = En al menos una de las cargas de 1250, 1875 y 2500 kg la producción de abono orgánico líquido en los biodigestores es diferente.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Municipio de San Luis

6.1.1 Ubicación geográfica

Se ubica en el extremo sur del departamento de Petén con una extensión territorial de 3,000 kilómetros cuadrados, a 118 kilómetros de la cabecera departamental de Petén. La cabecera municipal se localiza a una elevación de 475 metros sobre el nivel del mar, a una longitud oeste de $89^{\circ}26'35''$ del meridiano de Greenwich y latitud norte de $16^{\circ}11'55''$ con relación al ecuador. Sus límites y colindancias son: al norte con el municipio de Poptún, al oeste con los municipios de Sayaxché y Dolores ambos del departamento de Peten, al este con Belice y al sur con el municipio de Livingston, departamento de Izabal (Figura No. 2) (García, 2013).

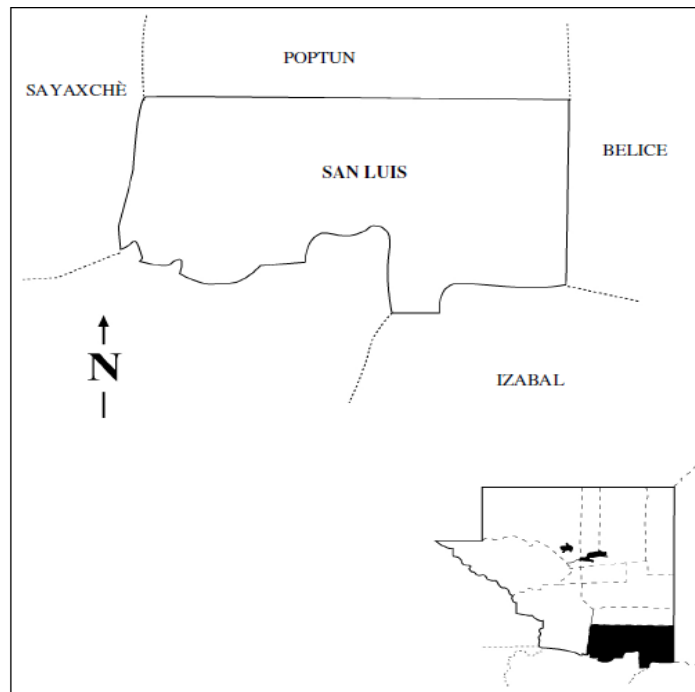


Figura No. 2. Ubicación geográfica y colindancias del municipio de San Luis, Peten
(García, 2013)

6.1.2 Condiciones climáticas

EL caserío los Ángeles se encuentra entre los 25 grados centígrados y máxima de 40 grados centígrados y la precipitación pluvial de 1,500 a 1,550 milímetros anuales (García, 2007).

La época de invierno inicia los primeros días de junio y se prolonga hasta parte de febrero, pero debido a la deforestación ilegal que en la actualidad se presenta en el municipio de San Luis, se ha venido presentando cierta variabilidad y cambio en el clima. La fuente de humedad más importante la constituye el Mar Caribe y por su relativa cercanía da lugar a precipitaciones asociados con ciclones y tormentas tropicales. Los vientos predominantes se desplazan del noroeste a suroeste, con velocidades ligeras. Durante los meses de mayo a octubre aparecen esporádicamente en el Caribe y Golfo de México tormentas tropicales y huracanes formados por lluvias torrenciales y vientos de 75 Km/h (García, 2007).

6.4 Definición de variable

6.2.1 Variable independiente: Temperatura (tomada en grados °C en cada digestor)

6.2.2 Variable dependiente: Producción de biogás y abono orgánico (biogás cuantificado en m³ producido diariamente por digestor y bioabono cuantificado en litros de abono producido diariamente por digestor).

6.5 Diseño experimental

6.3.1 Descripción de los tratamientos

En esta evaluación se realizaron tres tratamientos a partir de subproductos y desechos de tilapia (1250 kg, 1875 kg y 2500 kg) con tres repeticiones. Las dimensiones del tratamiento y las repeticiones fueron en función de la cantidad de materia ingresada al biodigestor (ver procedimiento) estos fueron de material lyner, cada unidad contó con un medidor de biogás.

6.3.2 Modelo estadístico

Se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) de un factor, se compararon las medias de los tres tratamientos con la variable respuesta biogás, así también se aplicó el mismo análisis de varianza

para los valores de los grupo de bioabono producido, como la segunda variable respuesta, en ambos se realizó una comparación múltiple de medias TUKEY.

6.3.3 Hipótesis estadísticas

- Hipótesis Biogás

Ho $T_1=T_2=T_3$

H1 $T_1 \neq T_2 \neq T_3$

- Hipótesis Bioabono

Ho $T_1=T_2=T_3$

H1 $T_1 \neq T_2 \neq T_3$

Donde T = tratamiento

6.3.4 Número de repeticiones

Se realizarán tres tratamientos con tres repeticiones.

6.3.5 Tamaño y forma de las unidades experimentales

La dimensión de los 9 biodigestores se determinó mediante el siguiente procedimiento:

Materia orgánica disponible

50 Kg /día

La cantidad de agua que se aplicó para diluir la mezcla fue de 1:2, $50 \times 2 = 100$ Litros resultando una carga de alimentación de:

$$\text{Carga diaria (L/día)} = 50 + 100 = 150/d$$

El digestor se implementó en un área que cuenta con una temperatura media de 35°C a lo largo del año, de acuerdo a la tabla No. 4, se obtuvo de 25 días de retención hidráulica.

Se calculó entonces el volumen líquido del digestor como el producto de la carga por el tiempo de retención:

$$Vl (L) = (L/día) TRH (días)$$

$$150 * 25 = 3750 \text{ Litros}$$

Con el volumen líquido del digestor se obtuvo el volumen que ocupará el biogás:

$$Vg (L) = Vl / 3 (L) = 3750 / 3 = 1250 \text{ Litros}$$

Por lo que el volumen total del digestor fue la suma del volumen gaseoso y líquido:

$$VT = Vl + Vg$$

$$VT = 3750 + 1250 = 5000 \text{ Litros} = 5.000 \text{ m}^3$$

En base a la tabla de distintos anchos de rollo de plástico para manga de nylon (tabla No. 7) y el volumen total estimado se calcularon las dimensiones del digestor.

Se buscó en el cuadro No.5 valores de L/D entre 5 y 10, con un óptimo de 7. El ancho de manga comercial que se empleó fue de 1,75 metros; la longitud que establece esta es de 7.92 m; para la zanja la longitud de la manga fue de 7.92 m más 2 m que se requirieron para amarrar tuberías de entrada y salida de la manga, es decir la manga tuvo una longitud de 9.92m. Las medidas entonces se resumen en el Cuadro No. 1.

Cuadro No. 1. Resumen medidas biodigestor

Carga diaria: 50 Kg de desechos y sub productos de tilapia	
Temperatura media de trabajo: 30 °C	
Tiempo de retención hidráulica (THR): 25 días	
Volumen líquido	3.75 m ³
Volumen gaseoso	1.87 m ³
Volumen total	5.62 m ³
Ancho del rollo	1.75 m
Longitud del biodigestor y zanja	7,90 m
	7.10
Relación L/D	0.95 m
Ancho inferior de la zanja	1.00 m
Ancho superior de la zanja	1.25 m
Profundidad de la zanja	0.50 m

Fuente: Trabajo de campo, 2015.

6.3.6 Variable respuesta

-Biogás (se realizó un registro diario de la producción de biogás en m³ según lo registrado en los contadores mecánicos de cada digestor)

-Abono orgánico (medido en litros de abono producido diariamente por cada digestor)

6.3.8 Manejo del experimento

- Selección de la ubicación del biodigestor

Se ubicó en un punto donde cumplió con las siguientes condiciones; evitó la interferencia del paso de animales o personas, estuvo alejado de árboles para evitar la caída de ramas que pudieran dañarlo (Figura No 3). El digestor se ubicó en una zanja con el fin de aprovechar el suelo como aislante térmico y para que este proporcionara protección a los materiales. Se construyó un techado sobre el mismo para protegerlo de la luz directa del sol, de la lluvia y de los objetos que pudieran dañarla.



Figura No. 3. Selección de la ubicación del terreno para ubicación de digestores (Trabajo de campo, 2015)

- Construcción de la zanja

La construcción de la zanja fue en función del ancho de rollo seleccionado en el dimensionamiento (Cuadro No. 8). Durante la construcción se tuvo en cuenta una serie de consideraciones: La pendiente de la zanja fue de 0.05 con bordas 2:1, esto evitó el derrumbe de las mismas. La zanja tubo, por lo tanto, un volumen definido por un ancho inferior y otro superior del perfil, una longitud superior e inferior, y una profundidad determinada. Para la entrada de materia prima y la salida de la materia orgánica se dispusieron dos tubos PVC de 4” con una inclinación entre 45° a 60° para facilitar dicha entrada y salida por gravedad; se evitó la presencia piedras y otros elementos cortantes, como raíces esto con el fin de evitar el deterioro del lyner . Como un segundo método de protección se cubrió el suelo y las paredes con costales. La excavación de la zanja se efectuó con dos horas de operación de una retroexcavadora como se observa en la Figura No. 4 y los acabados se realizaron con palas y azadones (Figura No. 5).



Figura No. 4. Excavación de zanja con retroexcavadora (Trabajo de campo, 2015)



Figura No. 5. Acabado en zanja de biodigestor (Trabajo de campo, 2015)

- Construcción del Biodigestor

Para la construcción del digestor se extendió la manga de polietileno sobre una superficie libre de piedras o raíces esto evitó que la manga se dañara durante su manipulación ya que la más mínima rasgadura hubiera alterado las condiciones deseadas del biodigestor.

La manga polietileno fue cortada de acuerdo a las dimensiones del digestor calculadas en los pasos anteriores dejando un metro más de manga para el posterior amarre de las tuberías de entrada y salida, a efectos de investigación se creó una manga de triple capa (Figura No. 6). Fue importante que no se produjeran torsiones cuando se introdujo la manga una dentro de la otra ya que cargado el digestor, esto no hubiera podido realizarse.



Figura No. 6. Corte de triple manga (Trabo de campo, 2015)

- Colocación de la salida de biogás

Para realizar la salida del biogás se cortaron 4 círculos de caucho blando de tubo de neumático usado como se observa en la Figura No. 7; posteriormente con una navaja se realizó un agujero de un centímetro de diámetro. El sistema de tuberías desde el interior al exterior se denominó tipo pasa muros. Se colocó una manguera de $\frac{1}{2}$ " de 3 metro de longitud desde el sistema tipo pasa muros hasta el contador mecánico de biogás. La salida de biogás se colocó a cuatro metros y medio medido desde el punto de alimentación del digestor, esto para que el biogás no se acumulara en la parte final del digestor y pudiera ser evacuado (Figura No. 8).



Figura No. 7. Instalación de accesorios en la manga para la conducción de biogás
(Trabajo de campo, 2015)



Figura No. 8. Salida de biogas en manguera de ½” ubicada en el centro del biodigestor
(Trabajo de campo, 2015)

- Instalación del digestor

Una vez que se tuvo la manga extendida y con los accesorios para la conducción del biogás se inflo por medio de un blower (Figura No. 8) para corroborar que no existiera algún rompimiento del polietileno, se amarraron las tuberías de entrada y salida. Esto se realizó cerca del lugar donde se cortó la manga, posteriormente con 9 personas se instaló en la zanja cubierta de costales, esto se observa en la Figura No. 9.



Figura No. 9. Inflado de manga tres capas (Trabajo de campo 2015)



Figura No. 10. Instalación de 3 digestores (Trabajo de Campo, 2015)

- Tuberías de entrada y salida del biodigestor

Se colocó una tubería de PVC de 4” de diámetro y 1 metro de longitud, esta se amarro a las tres mangas del biodigestor mediante hule y pita (Figura No. 11); el tubo se colocó a una inclinación entre 45° a 60° esto favorece a la entrada de materia al sistema e impide la salida de biogás generado esto fue tanto en la entrada y salida del biodigestor.



Figura No. 11. Tubo de salida de 4” de un digestor (Trabajo de campo, 2015)

- Válvula de seguridad

La válvula de seguridad permitió que, en caso de que no se consumiera el biogás, este tuviera una ruta de escape, evitando también la entrada de oxígeno al proceso (Figura No. 12).



Figura No. 12. Válvula de seguridad (Trabajo de campo 2015)

La manguera que provenía del digestor se le acoplo un reductor de 1/2" al contador mecánico de biogás como se observa en la Figura No. 13. La conformación del sistema quedo de la siguiente forma: en un extremo, la entrada de biogás que salió del digestor; en el otro extremo, la tubería de 1/2" que entró a la válvula de seguridad; y, en el tercer extremo, una nueva conducción que permitió que el biogás se liberara después de ser cuantificado.



Figura No. 13. Contador mecánico de biogás (Trabajo de campo, 2015)

- Caracterización de los subproductos y residuos de tilapia

Antes de ingresar la primera carga se realizó una medición del pH, esto mediante la trituración de todos los desechos (vísceras, piel, retazos de músculo de tilapia) (Figura No.14) y medidos con un potenciómetro, al finalizar el tiempo de retención hidráulica se realizó una mezcla de todos los efluentes de los biodigestores para analizar el contenido de macronutrientes en los mismos.



Figura No. 14. Subproductos y residuos de tilapia previo a ingresar a digestores
(Trabajo de campo, 2015)

- Primera carga del digestor

La primera carga consistió en la alimentación del sistema con los residuos de tilapia y agua, en una proporción de 1:2, por cada porción de subproductos y residuos se ingresó dos porciones de agua ; una vez instalada toda la estructura de conducción de biogás, se realizó la primera alimentación al sistema, esta se realizó con las tres cargas establecidas para cada digestor (50, 75 y 100 kg) y se alimentaron las tres repeticiones de cada carga; el procedimiento de alimentación de los digestores se replicó durante 25 días, con las cargas de alimentación de materia establecidas a las respectivas replicas.

- Construcción del techado

El techo se construyó de palma seca, y postes de pino de 3 metros de altura, con la colaboración de 6 personas, el diseño fue de tipo caída de una agua, esto se realizó con el fin de proteger cada unidad experimental de ramas, lluvia u otro objeto.



Figura No. 15. Construcciones de techado (Trabajo de campo)

- Toma de parámetros

Se tomaron lecturas diarias de temperatura y pH en la salida de cada biodigestor mediante una sonda multiparamétrica, como se observa en la Figura No. 16, así también se registró la lectura diaria del contador del biogás de todos los biodigestores.



Figura No. 16. Toma de pH y temperatura con sonda multiparamétrica
(Trabajo de campo, 2015)

- Croquis de campo

La ubicación del área experimental de los biodigestores, fue un área que cumplió con todos los elementos para su selección, su ubicación dentro de la granja se observa en la Figura No. 17.

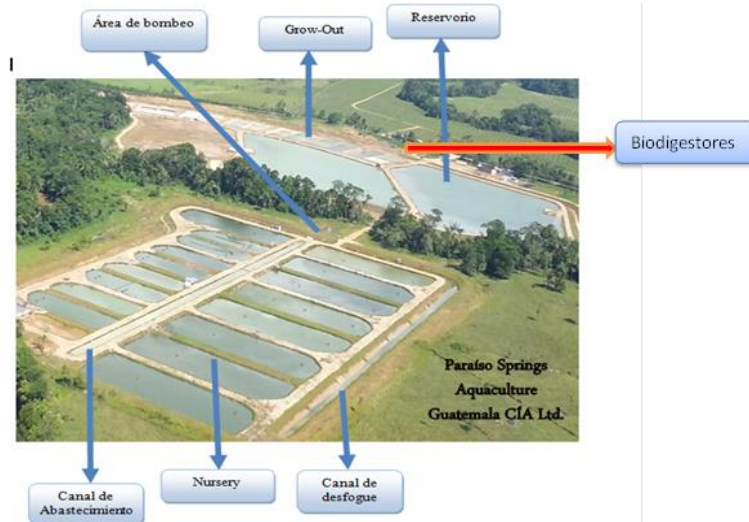


Figura No. 17. Croquis de campo del área de biodigestores (Trabajo de campo, 2015)

- Análisis de la información

Se determinó la producción total de biogás en base a los registros diarios obtenidos de cada contador, posteriormente se analizaron las medias de los datos por grupo de carga que se aplicó en los biodigestores (1250, 1875 y 2500 kg) aplicando un ANOVA al 95 % de confianza para determinar si existió una diferencia en la producción de biogás entre grupos y una comparación múltiple de medias para determinar si existe significancia entre medias de todos los grupos; el comportamiento de los parámetros físicos pH y T° se analizaron mediante gráficas proyectadas en el tiempo de producción de biogás, se analizó la eficiencia de producción de biogás en base a la cantidad de materia orgánica ingresada y biogás generado, esto comparado con datos de revisión bibliográfica de la eficiencia de gas producido de otras materias primas. Así también se realizó una caracterización de los subproductos y residuos de tilapia antes de ingresar a los digestores.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron nueve biodigestores con las siguientes características

Cuadro No. 2. Características de los biodigestores construidos

Carga diaria: 50, 75 y 100 kg de desechos y sub productos de tilapia	
Temperatura de trabajo: 35 °C	
Tiempo de retención hidráulica: 25 días	
Volumen líquido	5 m ³
Volumen gaseoso	1.66 m ³
Volumen total	6.6 m ³
Ancho del rollo	1.75 m
Longitud del biodigestor	7,90 m
Longitud de la zanja	7.10 m
Relación L/D	0.95 m
Ancho inferior de la zanja	1.00 m
Ancho superior de la zanja	1.25 m
Profundidad de la zanja	0.50 m

Fuente: Trabajo de campo, 2015.

Se construyeron nueve biodigestores de triple capa de polietileno negro, cada digestor contó con los siguientes accesorios: conector tipo pasamuros para la conducción del biogás, manguera transparente de ½” por tres metros de longitud, dos tubos de cuatro pulgadas por un metro de longitud, adaptador de ½” para el contador mecánico, contador mecánico de biogás, válvula de seguridad. Los nueve biodigestores se agruparon en bloque de 3X3, la cantidad de biodigestores del área experimental fue calculada en función de los siguientes recursos disponibles: medidores mecánicos de biogás, cantidad de materia orgánica disponible, Lyner para las mangas de los biodigestores, apoyo humano.

- Caracterización macronutrientes

El análisis obtenido de macronutrientes de 60 peces (*Oreochromis niloticus*) comprendidos entre 1.8 a 2.3 libras se resumen en el Cuadro No. 3 (Trabajo de campo, 2015).

Cuadro No. 3. Resumen de caracterización de macronutrientes de subproductos y residuos de tilapia

Análisis	Cantidad	Unidad
Carbono (C)	510.11	g.Kg ⁻¹
Nitrógeno (N)	17.01	g.Kg ⁻¹
Fosforo (P)	6.02	g.Kg ⁻¹
Azufre (S)	20.05	g.Kg ⁻¹

Fuente: Trabajo de campo, 2015.

Seguido por el carbono, el nitrógeno es el nutriente (macro) más importante, esencial para la formación de enzimas que son responsables de acelerar el metabolismo en el sistema, así también es fundamental una adecuada relación para el proceso de fermentación entre el C / N (Soethe, 2014). La relación de macronutrientes para que exista un crecimiento de microorganismos en el reactor debe ser C: N: P: S con 600: 15: 5: 3 respectivamente (Soethe, 2014).

En base al resumen de caracterización de macronutrientes de subproductos y residuos de tilapia, se determinó un aporte de 510.10 g de carbono por cada kilogramo de subproductos y residuos ingresados al digestor, así también se observó un aporte de 17.01 gramos de nitrógeno por cada kilogramo de subproductos y residuos ingresados al digestor; por lo tanto según los requerimientos de macronutrientes anteriormente planteados para el crecimiento bacteriano, se puede cotejar en cuanto a la relación de carbono y nitrógeno, siendo esta la más condicional para el crecimiento bacteriano, una óptima relación con un valor de 29.98, esto indicó que por cada 29.98 gramos de carbono en el medio había disponibilidad de un gramo de nitrógeno para los procesos bacterianos, el rango de relación optimo se encuentra entre 20-30 (Soethe, 2014), con este rango se determinó que se logró el aporte óptimo de los elementos principales de alimento para el desarrollo de bacterias productoras de biogás, ya que si la relación C / N hubiese sido muy alta (< 30) la consecuencia hubiese sido una disminución en la actividad metabólica y si la

relación hubiese sido demasiado baja (>20), (alto contenido de nitrógeno), pudo haber formación excesiva de amoníaco (NH₃) y el crecimiento bacteriano se hubiera inhibido o incluso llegado a la ruptura y no se hubieran logrado obtener los valores de biogás producido resumidos en el Cuadro No. 4.

- Análisis estadístico biogás

Las cantidades totales de metro cúbicos de biogás producido en los digestores por carga y sus respectivos tratamientos, se resumen en el Cuadro No. 4.

Cuadro No. 4. Producción de biogás en m³

Tratamiento	Biogás carga 50 kg	Biogás carga 75 kg	Biogás carga 100 kg
I	4002 m ³	5050 m ³	8302 m ³
II	4202 m ³	5320 m ³	7890 m ³
III	4109 m ³	5144 m ³	7989 m ³
Total	12313 m ³	15514 m ³	24181 m ³

Fuente: Trabajo de campo 2015.

Los valores del Cuadro No. 4 se obtuvieron de la sumatoria de los registros diarios de la producción de biogás en metros cúbicos, durante cuarenta y cinco días, salvo para los tratamientos con carga de 100kg que se obtuvieron lecturas hasta el día número 50. Para la interpretación de los datos obtenidos por tratamiento se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) al 95% de significancia que se presenta en el Cuadro No. 5.

Según el Cuadro No. 4, el digestor uno del tratamiento tres produjo la mayor cantidad de biogás (8302 m³) con una producción promedio diaria de 192.6 m³ y el digestor que menor biogás produjo (4002 m³) fue el digestor uno del tratamiento uno, con una producción diaria de 102.6 m³, esta diferencia se atribuye a la cantidad de subproductos y residuos ingresados a los digestores, así también a una óptima relación entre la disponibilidad de nutrientes en el medio

propiciando un adecuado crecimiento bacteriano generadoras de biogás; los otros parámetros involucrados son el pH y la temperatura el efecto de estos sobre la producción de biogás se explicaron en las Figuras No. 19, No. 20, No. 21 y No. 23.

Cuadro No. 5. Resumen análisis de varianza

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p
Factor	2	25134746	12567373	502.33	5.14
Error	6	150108	25018		
Total	8	25284854			

Fuente: Trabajo de campo 2015.

Para este modelo se asumió que la variable respuesta biogás producido en cada grupo sigue una distribución Normal, la varianza es la misma en todos los grupos, teniendo grupos independientes. El análisis de varianza del Cuadro No. 5 nos indica que existió diferencia significativa entre los grupos de digestores (Valor F 502.33 > valor p5.14) esto no se atribuye a situaciones de azar si no a los siguientes factores monitoreados en este estudio (características de subproductos y desechos de tilapia ingresados, temperatura dentro del digestor, pH, tiempo de retención hidráulica), dado que existe una diferencia estadística significativa y se obtiene un valor de significancia de 502.33 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, es decir que en al menos una de las cargas de 1250,1875 y 2500 kg la producción de biogás en los biodigestores fue diferente.

La prueba múltiple de medias nos indica que existe significancia entre la variable respuesta producción de biogás entre las tres cargas de alimentación (1250 kg, 1875 kg y 2500 kg), es decir ningún grupo comparte medias similares que el otro; siendo la media más alta (8060) de digestores con la carga de 2500 kg y la media más baja (1250) de digestores con carga de 2250 kg, esto se puede observar en el siguiente cuadro:

Cuadro No. 6. Comparación de medias TUKEY biogás

Factor	N	Media	Agrupación
carga 2500kg	3	8060	A
carga 1875 kg	3	5171.3	B
carga 1250 kg	3	4104.3	C

Fuente: Trabajo de campo 2015.

El cuadro No. 7 nos ayuda a visualizar el significado del valor F entre medias emparejadas para poder determinar la aceptación de la hipótesis nula o la aceptación de la hipótesis alterna por grupo.

Cuadro No. 7. Comparación de medias emparejadas

Diferencia entre cargas	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95 %	Valor de T	Valor p ajustado
1875kg-1250kg	1067	129	(671, 1463)	8.26	0.000
2500kg-1250kg	3956	129	(3560, 4352)	30.63	0.000
2500kg-1875kg	2889	129	(2493, 3285)	22.37	0.000

Fuente: Trabajo de campo 2015.

Según el Cuadro No. 7 en la comparación entre el nivel de 75kg-50kg existe una diferencia entre medias de 1067 m³ de biogás producido con un valor de significancia de 8.26, mayor al nivel de confianza de 0.05; en el nivel 100kg-50kg existe una diferencia de medias de 3956 m³ de biogás producido con un valor de significancia de 30.63 mayor al nivel de confianza de 0.05; en el nivel 100kg-75kg existe una diferencia de medias de 2889 m³ de biogás producido mayor al nivel de confianza de 0.05. Las medias que más se acercan son las del nivel 1 sin embargo la significancia estadística es de 8.26 mayor al nivel de confianza establecido, dado los valores de significancia entre medias emparejadas se establece que en todos los niveles existe alta significancia estadística se acepta la hipótesis alterna en al menos una de las cargas de 1250,1875 y 2500 kg la

producción de biogás en los biodigestores es diferente, y se rechaza la hipótesis nula, la producción de biogás en biodigestores es igual aplicando una carga de materia orgánica de 1250, 1875 y 2500 kg.

- Análisis de parámetros en la producción de biogás

Dado que la diferencia estadísticamente significativa de la producción de biogás entre las tres cargas de los digestores no se atribuye a efectos del azar, si no a la interacción de parámetros medidos en el estudio, se presentan a continuación 3 graficas donde se relaciona la cantidad de biogás producido en metros cúbicos en el tiempo, la cantidad de biogás producido en metros cúbicos en función de la temperatura dentro de los digestores y la cantidad de biogás producido en metros cúbicos y su relación con el pH.

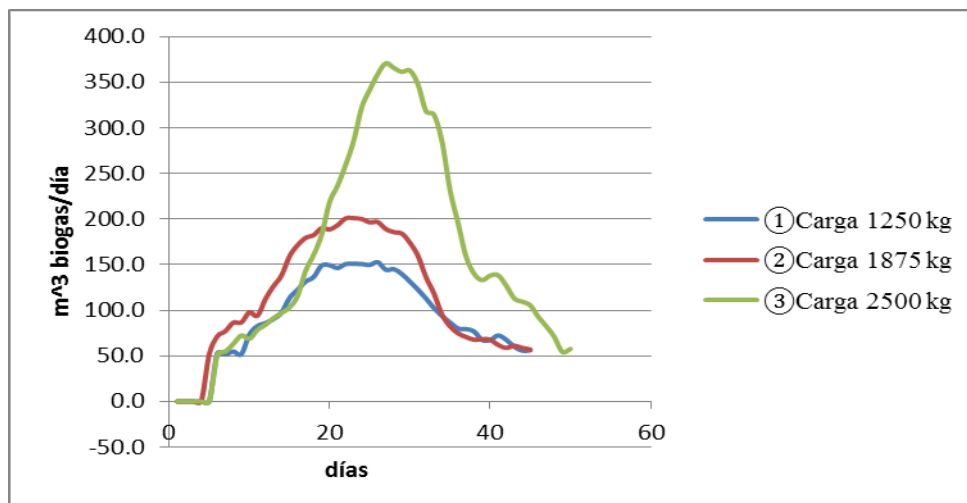


Figura No. 18. Producción de biogás m³/día de 3 cargas (Trabajo de campo, 2015)

En la Figura No. 18 se observa la producción diaria promedio de biogás expresada m³/día de tres cargas de desechos de pescado (1250, 1875 y 2500 kg) en digestores, medido en 50 días, se puede observar que la máxima producción diaria de biogás la presenta la curva de la carga No. 3 siendo esta 370.7 m³ en el día 25, y la mínima producción de biogás se presenta en la misma curva, con un registro de 51 m³ en el día No. 1. La mayor producción de biogás la presento la carga No. 3 para todo el proceso, esto se atribuye a una óptima relación de cantidad de nutrientes, subproductos y residuos de tilapia con agua, al optimo valor de pH y temperatura en el digestor.

Para la carga No. 1 y 3 la producción de biogás inicia en el 6to día mientras que para la carga 2 inicia en el 5to día, esto se atribuye a que la disponibilidad de materia orgánica y agua en el medio de fermentación estuvieron en una proporción adecuada en el digestor, esto contribuyo al alcance de la fase de adaptación bacteriana más rápida, obteniendo una producción de biogás en menor tiempo, por lo tanto se puede sugerir que una relación óptima para una producción de biogás anticipada o bien una carga de arranque es la relación de 375 kg de subproductos y residuos de tilapia por 750 litros de agua, que fueron los valores que poseía los digestores de la carga No. 2 en el quinto día. Dado que la tendencia de la producción de biogás en digestores está regida por la actividad de crecimiento bacteriano, en la gráfica anterior se observan cuatro etapas: fase adaptación, fase exponencial, fase estacionaria y fase de declive; la fase de adaptación para la carga No. 2 fue alcanzada veinticuatro horas antes que las otras dos cargas, como resultado se obtuvo un registro de producción de biogás de 52.7 m³ veinticuatro horas antes que las otras dos cargas.

Las bacterias de un biodigestor cuya temperatura de operación comprende entre 25-40 °C son bacterias mesófilas, con un alto grado de estabilidad y aporte de sedimentos con adecuadas propiedades como fertilizantes (Avedaño, 2010); según la temperatura media registrada durante el estudio (27 °C) se sugiere que el tipo de bacterias involucradas en la producción de biogás fueron bacterias mesófilas, ya que fueron bacterias muy estables, como se puede observar en el comportamiento de las primeras tres fases del crecimiento bacteriano.

En la Figura No.18 se observan pequeñas variaciones en la producción de biogás en la fase exponencial y en la fase estacionaria, esto se puede atribuir a varias situaciones, en función a la temperatura, las bacterias en digestores son altamente susceptibles a cambios térmicos, provocando el descenso de la población de las mismas (Cueva, 2012); la temperatura contenida en el biodigestor está directamente relaciona a la temperatura ambiente y a la capacidad termica que pose el material del cual esta fabricado el digestor. Otro factor al que se pudo atribuir los descensos en la producción de biogás es el pH, el efecto y comportamiento de este parametro se menciona mas adelante.

En la Figura No. 18 se puede observar que la curva de producción de biogas de las carga 1 y dos presentan una fase exponencial y estacionaria mucho más estable y prolongada que la curva de la carga 3, esto se puede relacionar a la velocidad de carga orgánica es decir la cantidad de desechos de pescado ingresada y la capacidad de estabilización de la población bacteriana (SAGARPA, y FIRCO, 2013), ya que el incremento en la velocidad de carga orgánica implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida debido al alto contenidos de elementos degradables por las bacterias.

- Tendencia en el pH

En la Figura No. 19 encontramos los registros promedios de pH obtenidos en los digestores durante el proceso de digestion.

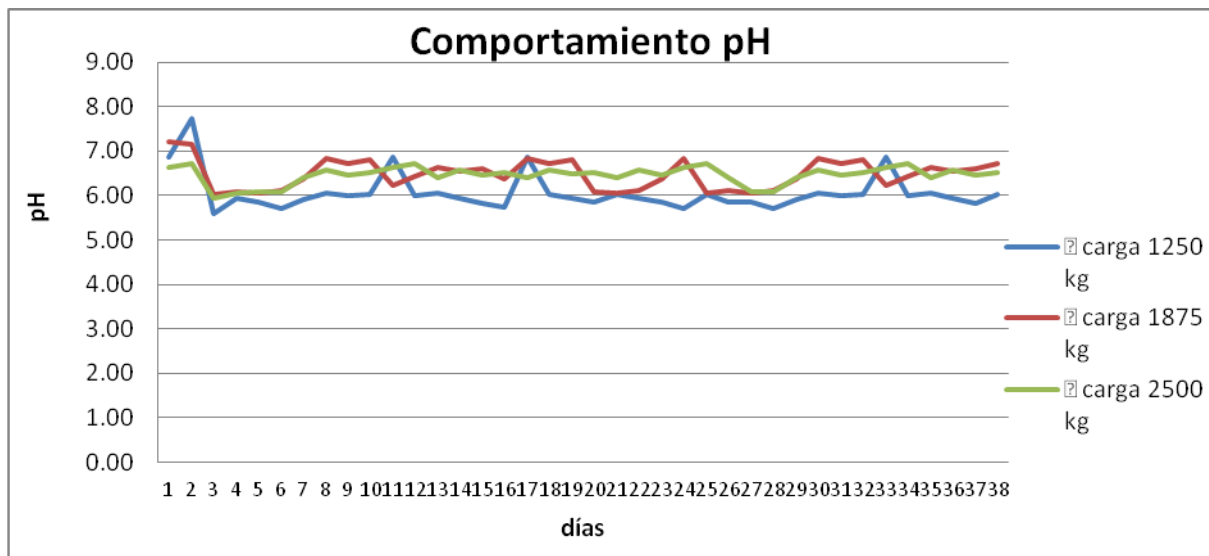


Figura No. 19. Comportamiento del pH en digestores (Trabajo de campo, 2015)

En la Figura No. 19 se observa que el comportamiento de los valores de pH de la carga 1 (mínimo de 5.68 de y máximo de 7.29) y carga 2 (mínimo de 6.07 y máximo de 7.36) presenta mayores picos y descensos en el pH en comparacion con los valores de la carga 3 (mínimo de 5.93 y máximo de 6.73). Los promedios de pH por carga son los siguientes carga 1 pH de 6.10, carga

dos 6.30 y carga 3 pH de 6.46; vários autores difieren en el rango de pH óptimo para la producción de biogas, el rango de pH óptimo es de 6,1 a 7,6 (MINENERGIA, PNUD, FAO, y GEF, 2011), pero si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los ácidos grasos volátiles a medida que lo producen las bacterias acetogénicas, estos se acumulan y disminuyen el pH si disminuye el pH este puede llegar a inhibir la producción de biogás, es por ello que los descensos de producción de biogás observados en la Figura No. 18 se sugiere que puede atribuirse a una variación de pH. El pH medido de los subproductos y residuos de tilapia ingresados al digestión presentan un promedio de 6.30, según lo mencionado anteriormente se encuentra dentro del rango óptimo.

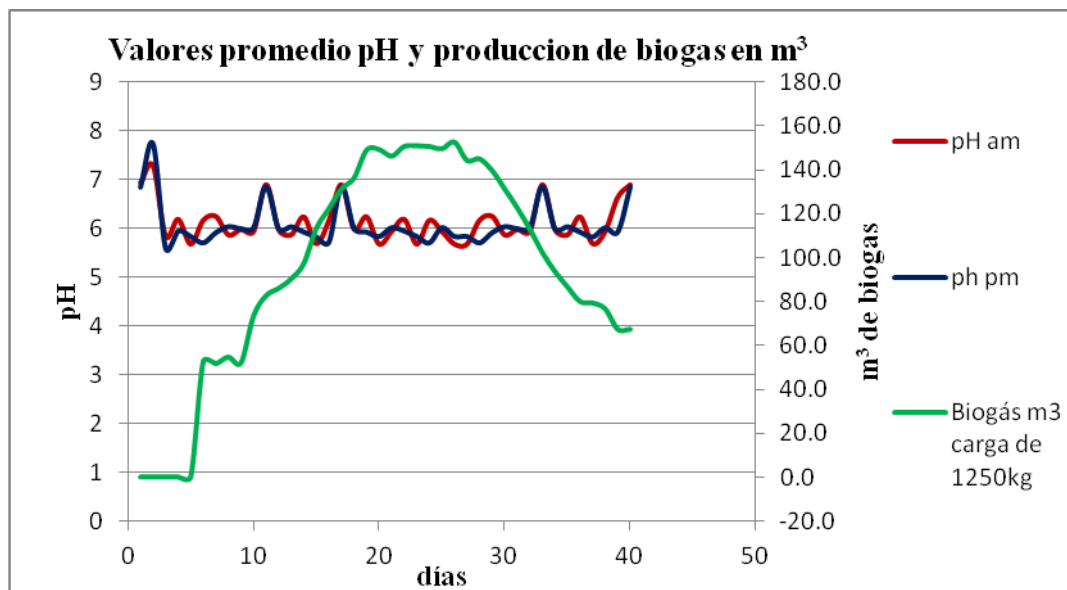


Figura No. 20. Valores de pH antes de mediodía y después de mediodía en la producción de biogás en m³ de la carga No. 1 (Trabajo de campo, 2015)

En la Figura No. 20 se observa el comportamiento de la producción promedio de biogás de digestores de la carga de 1250 kg y los valores de pH presentes durante la digestión; dentro de los valores de pH tenemos una lectura mínima de 5.68 y una lectura máxima de 7.29 con un promedio de 6,10. Los descensos de pH tanto antes como después de mediodía se pudieron atribuir a una baja eficiencia de las bacterias metanogénicas en procesar los ácidos grasos volátiles a medida que las bacterias acetogénicas los produjeron, acumulándose estos y disminuyendo los valores de pH, sin embargo esta acumulación no fue lo suficientemente

prolongada para inhibir la población bacteriana e inhibir la producción de biogás, y estas alcanzaron nuevamente la eficiencia de procesar los ácidos grasos volátiles en el medio. Por lo tanto las variaciones en la curva de producción de biogás se relacionan con los desequilibrios no prolongados de pH y con la temperatura.

En la Figura No. 20 podemos observar que durante la fase exponencial en la producción de biogás, comprendidos entre el día 17 al día 33, se presentaron variaciones menos drásticas en los valores de pH, por lo tanto se sugiere que durante la etapa exponencial, las bacterias lograron una mayor eficiencia y estabilidad en el procesamiento de los ácidos grasos volátiles, como resultado se registraron los valores más altos en la producción de biogás.

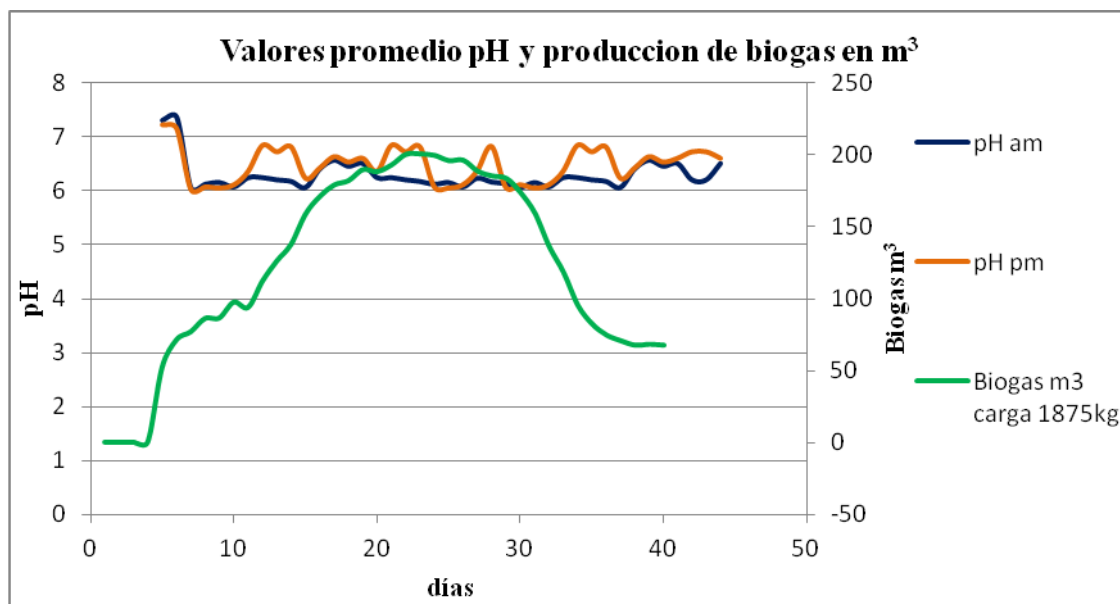


Figura No. 21. Valores de pH antes de mediodía y después de mediodía en la producción de biogás en m³ de la carga No. 2 (Trabajo de campo, 2015)

En la Figura No. 21 se observa el comportamiento de la producción promedio de biogás de digestores de la carga de 1875 kg y los valores de pH presentes durante la digestión; dentro de los valores de pH tenemos una lectura mínima de 6.02 y una lectura máxima de 7.32 con un promedio de 6.39. Los valores de pH de am presentan menor variación que los datos de pH de pm, esto radica en una inestabilidad en la eficiencia de las bacterias metanogénicas en procesar

los ácidos grasos volátiles a medida que las bacterias acetogénicas los produjeron, acumulándose estos y disminuyendo los valores de pH, sin embargo las variaciones no fueron influyentes en la producción de biogás dado que el valor mínimo registrado de pH fue de 6.02 en comparación al dato mínimo de pH 5.68 de la carga de 1250 kg, presentando variaciones en su producción de biogás. Por lo tanto según los datos anteriores de pH de la Figura No. 21 los valores de pH se encontraron en un rango óptimo no presentando descenso por debajo de 6.02 esto influyo directamente en una estabilidad por parte de la población bacteriana productora de biogás.

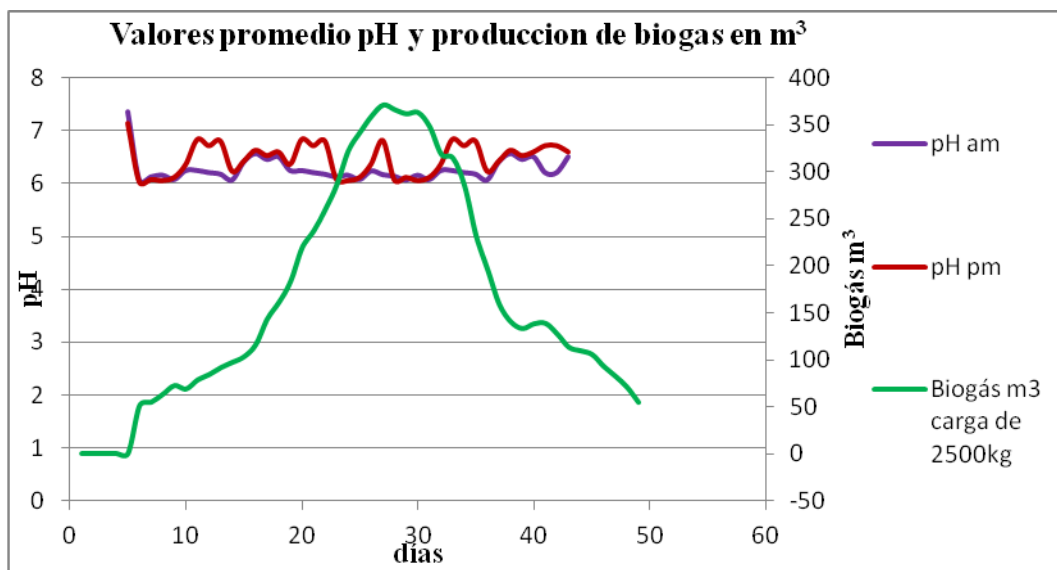


Figura No. 22. Valores de pH antes de mediodía y después de mediodía en la producción de biogás en m³ de la carga No. 3 (Trabajo de campo, 2015)

En la Figura No. 22 se observa el comportamiento de la producción promedio de biogás de digestores de la carga de 2500 kg y los valores de pH presentes durante la digestión; dentro de los valores de pH tenemos una lectura mínima de 6.03 y una lectura máxima de 7.29 con un promedio de 6.35. Los valores de pH se encuentran dentro de un rango óptimo, esto se reflejó en la eficiencia de las bacterias metanogénicas en procesar los ácidos grasos volátiles a medida que las bacterias acetogénicas los produjeron, de lo contrario se hubiera presentado una acumulación de estos disminuyendo los valores de pH, pese a las variaciones de los valores de pH en la figura No. 22 se puede determinar que las acumulación de ácidos grasos no fueron representativas o lo

suficientemente prolongadas para inhibir la población bacteriana y por consecuencia la producción de biogás.

Dado que la reacción bioquímica en un proceso de biodigestión anaerobia es altamente compleja y dispone una sinergia entre una serie de elementos y factores para lograr una producción de biogás, se determina que los valores medios de pH de las 3 cargas evaluadas durante el proceso de digestión se encontraron dentro de los rangos óptimos y que las bacterias metanogénicas alcanzaron una conversión eficiente de los ácidos grasos volátiles a medida que lo producían las bacterias acetogénicas esto incidió en que no se presentará una inhibición total durante el proceso de producción de biogás, dando como resultado los valores de producción de biogás resumidos en el Cuadro No. 4.

- Temperatura

En la Figura No. 23 se presenta la producción de biogás en m^3 y la temperatura promedio alcanzada dentro de los digestores.

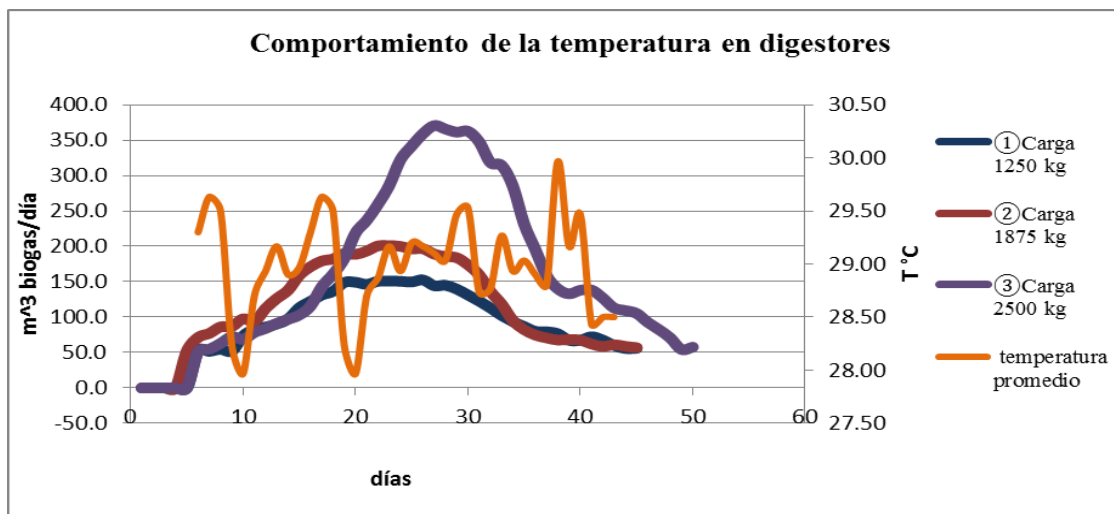


Figura No. 23. Producción de biogás m^3 /día vs Temperatura promedio

(Trabajo de campo, 2015)

En la Figura No. 23 se observa que el comportamiento de la temperatura presenta varios picos y descensos durante el periodo de digestión, registrando una temperatura mínima de $28.2^{\circ}C$ y una máxima de $30^{\circ}C$. Pese a las variaciones y los valores mínimos de temperatura observados durante el día 10 y el día 20, no se aprecia una variación notable en la producción de biogás, esto

se atribuyó a la resistencia sobre la variación térmica del grupo bacteriano en los digestores. Existen tres rangos de temperatura para la digestión de materia orgánica, el primero es el mesófilo (de 20 a 45 °C), el segundo es el termófilo (por encima de 45 °C) y el tercero es el extremófilo (35 °C a 55 °C), según el rango de temperaturas alcanzadas en esta investigación el nivel de digestión fue el mesófilo comprendido entre 20 a 45 °C) (SAGARPA, y FIRCO, 2013). Usualmente se busca que se aumente la temperatura ya que es proporcional a la tasa de hidrólisis, la velocidad de crecimiento de las bacterias y a su vez la producción de biogás (Avedaño, 2010). Es decir, que la temperatura lograda dentro de los digestores es directamente proporcional con la producción de biogás e inversamente proporcional al tiempo de retención hidráulico.

Por lo tanto se determina que según la temperatura alcanza durante la digestión el tipo de bacterias alojadas en los tratamientos fueron bacterias mesófilas; para una óptimo funcionamiento del digestor no debe presentarse una variación térmica que no exceda 0.6 – 1.2 °C al día (MINENERGIA, PNUD, FAO, y GEF, 2011); el promedio de variación térmica para este estudio fue de 0.61, por lo que se comprueba que la temperatura para este estudio estuvo dentro de los rangos óptimos para la producción de biogás de bacterias mesófilas con una rango de variación térmica óptimo y dado que la temperatura es directamente influyente en los procesos físico-químicos, se puede determinar que debido al rango óptimo de variación térmica alcanzado no se produjo algún desplazamiento en el equilibrio en relación al pH y a la producción de biogás.

- Abono orgánico

Las cantidades totales en litros de bioabono producido en los digestores por carga y sus respectivos tratamientos, se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro No. 8. Producción de litros de abono en digestores

Tratamiento	litros de abono carga 1	litros de abono carga 2	litros de abono carga 3
I	2225	4898	6350
II	2150	4598	6225
III	2345	5012	6890
Total	6720	14508	19465

Fuente: Trabajo de campo 2015.

Los valores del Cuadro No. 8 se obtuvieron de la sumatoria de los registros diarios de la producción abono orgánico, durante cuarenta y cinco días, salvo para los tratamientos con carga de 100kg que se obtuvieron lecturas hasta el día número 50. Para la interpretación de los datos obtenidos por tratamiento se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) al 5% de significancia, los resultados se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro No. 9. Resumen de análisis de varianza

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p
		Ajuste.	Ajust.		
factor	2	27517758	12758879	228.91	0
Error	6	360631	60105		
Total	8	27878388			

Fuente: Trabajo de campo 2015.

Para este modelo se asumió que la variable respuesta en cada grupo sigue una distribución Normal, la varianza es la misma en todos los grupos, teniendo grupos independientes. El análisis de varianza nos indica que existe diferencia significativa entre los grupos de digestores (Valor f 228.91 > valor p 5.14) en relación a la cantidad de litros de bioabono producido esto no se atribuye a situaciones de azar si no está relacionado directamente con la cantidad de desechos de pescado ingresada en cada digestor y la cantidad de agua ingresada necesaria para la digestión de los desechos, dicha alimentación fue en una relación 1:2, por cada kilogramos de alimento se ingresaban (conversión

de masa a volumen) 1.99 litros de agua. Dado que existe una diferencia estadística significativa y se obtiene un valor de significancia de 228.91 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna $H_1 =$ En al menos una de las cargas de 1250,1875 y 2500 kg la producción de abono orgánico líquido en los biodigestores es diferente, para determinar si existe diferencia entre medias por grupos, se realizó una prueba múltiple de medias Cuadro No. 10.

Cuadro No. 10. Prueba múltiple de medias TUKEY bioabono

Factor	N	Media	Agrupación
1. litros de abono carga 2500kg	3	6488	A
2. litros de abono carga 1875kg	3	4836	B
3. litros de abono carga 1250kg	3	2240	C

Fuente: Trabajo de campo, 2015.

La prueba múltiple de medias indica que existe significancia entre la variable respuesta producción de bioabono entre las tres cargas de alimentación (1250 kg, 1875 kg y 2500 kg), la diferencia entre las medias de la carga 1 y la carga 2 es de 1652, la diferencia entre la carga 2 y la carga 3 es de 2596 y la diferencia entre la carga 1 y 3 es de 4248, es decir todos los valores sobrepasan el valor P (5.14) el cual es el valor de significancia permitido a un nivel de confianza del 5 % , por lo tanto ningún grupo comparte medias similares que el otro; siendo la media más alta (6488) de digestores con la carga de 2500 kg y la media más baja (2240) de digestores con carga de 1250 kg.

8. CONCLUSIONES

1. Se determinó que la carga de subproducto y desechos de tilapia que presenta mayor potencial para la generación de biogás es de 2500 kg, presentando una producción promedio diaria de 196.6 m³ y una producción total de 8302 m³, y la carga que presenta menor potencial para la generación de biogás es de 1250 kg, presentando una producción promedio diaria de 102.6 m³ y una producción total de 42002 m³.
2. Se estableció que la carga de subproductos y desechos de tilapia que presenta mayor potencial para la generación de bioabono es 2500 kg presentando una producción promedio diaria de 153.11 litros y una producción total de 6890 litros, y la carga que presenta menor potencial para la generación de bioabono es de 1250 kg, presentando una producción promedio diaria de 47.77 y una producción total de 2150 litros.
3. Se Comprobó que una variación térmica que no exceda 0.6 – 1.2 grados centígrados cada día permite un óptimo desarrollo de digestión; el promedio de variación térmica para esta investigación fue de 0.61, y los rangos de temperatura fueron de 28.2- 30 °C, por lo que se comprueba que la temperatura para este estudio estuvo dentro de los rangos óptimos para la producción de biogás de bacterias mesófilas.
4. Se establece que la manifestación prolongada de valores de pH fuera del rango de 5.68- 7.39 inhibe el crecimiento bacteriano, incidiendo directamente en la producción de biogás.

9. RECOMENDACIONES

1. Se sugiere para una obtención de biogás óptima la implementación de una carga de desechos y residuos de tilapia de 2500 kg, con una alimentación diaria del digestor de 100 kg, durante un tiempo de retención hidráulica de 25 días con una relación de materia orgánica y agua de 2 a 1 respectivamente.
2. El pH y temperatura son parámetros físicos influyentes directamente en la producción de biogás, por lo que se sugiere un monitoreo diario en digestores anaerobios; recomendado un rango óptimo de digestión de pH de 6- 7 y un rango de variación térmica óptimo entre 0.6-.12 °C/día.
3. Se sugiere emplear membrana en la construcción de biodigestores en ambientes donde se presenten fluctuaciones bruscas de temperatura, ya que dependiendo el tipo de bacterias alojadas, estas pueden ser sensibles a estos cambios bruscos e inhibir el crecimiento de las mismas.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. Aparcana Robles, S., y Jansen, A. (2010). *Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso “fermentación anaeróbica” para producción de biogás* [en línea]. Recuperado abril 5, 2015, de http://www.german-profec.com/cms/upload/Reports/Estudio%20sobre%20el%20Valor%20Fertilizante%20de%20los%20Productos%20del%20Proceso%20Fermentacion%20Anaerobica%20para%20Produccion%20de%20Biogas_ntz.pdf
2. Avedaño Allen Perkins, D. (2010). *Diseño y construcción de un digestor anaerobio de flujo pistón que trate los residuos generados en una explotación ganadera de la localidad de Loja, Ecuador, empleando tecnologías apropiadas* [en línea]. Recuperado abril 25, 2015, de http://www.gessa-ex.es/documentos/publicaciones/guia_odt.pdf
3. Bautista Buhigas, A. (2010). *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos (Estelí, Nicaragua)* [en línea]. Recuperado enero 6, 2016, de <http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/id/45617/PFC/?jsessionid=FFCC47C5C94B7BEEDD2B06283EBF2703>
4. Caldera, Y. A., Madueño, P. I., Griborio, A. G., Gutiérrez, E. C., y Fernández, N. M. (2003). Efecto del tiempo de retención hidráulica en el funcionamiento de un reactor UASB tratando efluentes cárnicos [en línea]. *Multiciencias*, 3 (1). Recuperado enero 5, 2016, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90430105>
5. Canales Rivas, R. J. (2011). *Producción de biogás a partir de aguas residuales y residuos agrícolas* [en línea]. Recuperado enero 6, 2016, de <http://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/404/1/T3088.pdf>
6. Cueva Ancalla, B. L. (2012). *Obtención de biogás de estiércol porcino y restos vegetales, por fermentación semicontínua* [en línea]. Tesis Biólogo Microbiológico. Recuperado abril 15, 2015, de http://tesis.unjbg.edu.pe:8080/bitstream/handle/unjbg/128/22_Cueva_Ancalla_BL_FACI_Biologia_Microbiologia_2012.pdf?sequence=1
7. Elizondo, D. (2005). *El biodigestor* [en línea]. Recuperado enero 4 2016, de http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_animal/brochure-biodigestor.pdf
8. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona [ETSEIB]. (2012). *Estudio de alternativas y dimensionamiento de biodigestores para aplicaciones domésticas en la*

- zona rural de Nwadjahane en Mozambique* [en línea]. Recuperado mayo 5, 2015, de <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/14508/4/ANEXO%20C.pdf>
9. Food and Agriculture Organization [FAO]. (2001). *Directrices para ensayos y demostraciones de nutrición vegetal y manejo de suelos a nivel de finca* [en línea]. Recuperado mayo 5, 2015, de <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/misc26s.pdf>
 10. García Hernández, G. A. (2007). *Diagnóstico socioeconómico, potencialidades productivas y propuestas de inversión*. Tesis Licenciada Administración de Empresas. Universidad de San Carlos de Guatemala [USAC].
 11. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial [ICAITI]. (1983a). *Manual de construcción y operación planta de biogás*. Guatemala: Autor.
 12. ICATI. (1983b). *Manual de construcción y operación planta económica de biogás*. Guatemala: Autor.
 13. ICAITI. (1984). *Informe técnico de biogás*. Guatemala: Autor.
 14. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE]. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios* [en línea]. Recuperado abril 25, 2015, de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf
 15. International City/County Management Association [ICMA] (2011). *Novedoso sistema de producción de energía / Municipios interesados en instalar biodigestores: Fue aplicado en el matadero de La Candelaria, con óptimos resultados* [en línea]. Recuperado abril 30, 2015, de http://www.poderlocal.net/leer_noticias.asp?ID=60795
 16. Ministerio de Energía de Chile [MINENERGIA], Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], Food and Agriculture Organization [FAO], y Global Environment Facility [GEF]. (2011). *Manual de biogás* [en línea]. Recuperado mayo 5, 2015, de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
 17. Rodríguez, J. C., El Atrach, K., Rumbos, E., y Delepiani, A. G. (1995). *Resultados experimentales sobre la producción de biogás a través de la bora y el estiércol de ganado* [en línea]. Recuperado enero 7, 2016, de http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at4704/arti/rodriguez_j.htm
 18. Royal Institute of Technology [KTH]. (2012). *Biogas supply chain dynamics* [en línea]. Recuperado abril 20, 2015, de https://www.kth.se/social/upload/507d4ef4f2765452e4000000/MID_TERM_REPORT_Biogas_Supply_Chain.pdf

19. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México [SAGARPA], y Fideicomiso de Riesgo Compartido [FIRCO] (2013). *Especificaciones técnicas para biodigestores pequeños tipo laguna* [en línea]. Recuperado abril 15, 2015, de <http://proyectedeenergiarenovable.com/Descargas/EspTecnicasBiodigestoresPequenos.pdf>
20. Silva Vinasco, J. P. (2010). *Tecnología del Biogás* [en línea]. Recuperado abril 5, 2015, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/biogas.pdf>
21. Soethe, G. C. (2014). *Aproveitamento da massa visceral da tilapia (Oreochromis niloticus) para produção de biogás* [en línea]. Recuperado diciembre 10, 2015, de http://200.201.88.199/portalpos/media/File/energia_agricultura/Dissertacao_Geovan_C_Soethe.pdf
22. Sorribas Roca, S., y Martínez Sánchez, V. (2009). *Biogas production from the waste of the shrimp manufacture in Sisimiut* [en línea]. Recuperado abril 2, 2015, de <http://www.climatic.org/documents/2010%20docs/Biogas%20Production%20from%20the%20waste%20of%20the%20shrimp%20manufacture.pdf>
23. Souza, E. G. de, Mota, F. S. B., y Carioca, J. O. V. (2014). *Geração de biodiesel e biogás a partir dos resíduos do processamento de tilápia do Nilo (Oreochromis niloticus)* [en línea]. Recuperado enero 7, 2016, de <http://www.repositorio.ufc.br/ri/handle/riufc/11340>
24. Tomczak Wandzel, R. Levlin, E. (2012). *Biogas production from fish wastes in codigestión with sewage sludge* [en línea]. Recuperado diciembre 5, 2015 de http://rymd.lwr.kth.se/forskningsprojekt/polishproject/rep18/wandzel_levlin.pdf
25. Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2003). *Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión: Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás* [en línea]. Recuperado enero 5, 2016, de http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/normalizacion/GUIA_PARA_LA_IMPLEMENTACION_DE_SISTEMAS_DE_PRODUCION_DE_BIO.pdf