



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 13 de julio de 2018

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El suscrito:

Albert Yojan Barrera Bermeo con C.C. No.1004251871, autor trabajo de grado titulado: Diseño y montaje de un biodigestor prototipo para el tratamiento de los residuos piscícolas, presentado y aprobado en el año 2018 como requisito para optar al título de Ingeniero Agrícola, autorizo al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Albert Yojan Barrera Bermeo

Firma:

Vigilada Mineducación



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Diseño y montaje de un digestor prototipo para el tratamiento de los residuos piscícolas.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Barrera Bermeo	Albert Yojan

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Gutierrez Guzman	Nelson
Sánchez Ramírez	Javier Eduardo

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Sánchez Ramírez	Javier Eduardo

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Agrícola

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Agrícola

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2018 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 24

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías_x__ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general_x__ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___
Tablas o Cuadros_x_

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

Vigilada mieducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Digestión anaerobia	Anaerobic digestion	6. Dqo	Dqo
2. Digestor	Digester	7. Ntotal	Ntotal
3. Biogás	Biogas	8. Namoniaca	Namoniaca
4. Biol	Biol	9. Alk	Alk
5. Actividad Microbiana	Microbial activity	10. Agv	Agv

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Este proyecto fue financiado por PROCEAL S.A, empresa exportadora de tilapia, dando lugar a su preocupación por encontrar mejores soluciones al tratamiento de la mortalidad de peces. Por ello se realizó el diseño y el montaje de un digestor prototipo para el tratamiento de los residuos piscícolas debido a que ésta actividad aumentó considerable en los últimos años, cabe decir que durante todo el desarrollo de la misma se generan considerables cantidades de residuos, los cuales no tienen ningún tipo de tratamiento que disminuya su carga contaminante. Con el trabajo se trató de desarrollar un sistema de digestión anaerobia de bajo costo, que permita aprovechar dichos desechos; mediante la producción de biogás y biol. Se usó pescado en descomposición como materia prima, además se utilizó el estiércol vacuno como inóculo para acelerar la actividad microbiana sobre el residuo a tratar. El proyecto abarcó la comprensión de la digestión anaerobia, de esta forma se optó por un diseño apropiado. Se hizo la caracterización de la materia prima en términos de DQO, MS, MV, Ntotal, Namoniaca.

Posteriormente se diseñó y construyó el digestor, seguido de ello se realizó la metodología de arranque del digestor establecida, sin embargo se realizó el monitoreo de DQO, MS, MV, pH, Alk y AGV para cantidad de residuo ingresado como para el digestato y así llevar un control del proceso de producción del biogás el cual se realizó una vez en la semana durante 60 días, con ello se determinó el potencial de aprovechamiento del residuo.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This project was financed by PROCEAL S.A, exporter of tilapia, giving rise to its concern to find better solutions to the treatment of fish mortality. For this reason, the design and assembly of a prototype digester for the treatment of fish waste was carried out due to the fact that this activity increased considerably in recent years. It can be said that throughout the development of the same, considerable amounts of waste are generated, which do not have any type of treatment that diminishes its polluting load. The work was aimed at developing a low-cost anaerobic digestion system, which makes it possible to take advantage of such waste; through the production of biogas and biofertilizer. Decomposing fish was used as raw material, and cow manure was used as an inoculum to accelerate the microbial activity on the waste to be treated. The project included the understanding of anaerobic digestion, in this way an appropriate design was chosen. The characterization of the raw material was done in terms of COD, MS, MV, Notal, Namoniocal.

Afterwards, the digester was designed and built, followed by the starting methodology of the established digester, however the COD, MS, MV, pH, Alk and AGV monitoring was carried out for the quantity of waste entered as for the digestate and thus control of the biogas production process, which was carried out once a week for 60 days, thereby determining the potential for using the waste.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Nelson Gutiérrez Guzmán

Firma:


Ph. D. NELSON GUTIÉRREZ GUZMÁN
Director

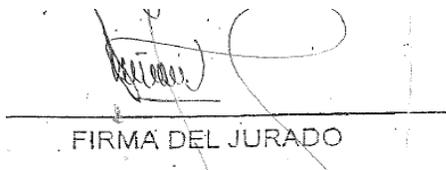
Nombre Jurado: Yaneth Lilibiana Ruiz Osorio

Firma:


FIRMA DEL JURADO

Nombre Jurado: Orlando Guzmán Manrique

Firma:


FIRMA DEL JURADO

*DISEÑO Y MONTAJE DE UN BIODIGESTOR PROTOTIPO PARA EL TRATAMIENTO
DE LOS RESIDUOS PISCICOLAS*



ALBERT YOJAN BARRERA BERMEO

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
NEIVA-HUILA
2018

DISEÑO Y MONTAJE DE UN BIODIGESTOR PROTOTIPO PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS PISCICOLAS

ALBERT YOJAN BARRERA BERMEO

Pasantía supervisada

Trabajo de grado presentado como requisito para optar a título de Ingeniero Agrícola

Codirector:

PhD. JAVIER EDUARDO SANCHÉZ

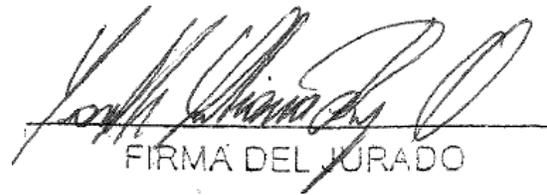
Director:

PhD. NELSON GUTIÉRREZ GUZMÁN



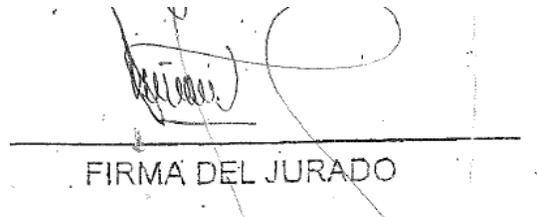
*UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE AGRICOLA
NEIVA - HUILA
2018*

NOTA DE ACEPTACIÓN



FIRMA DEL JURADO

YANETH LILIANA RUIZ OSORIO
Jurado



FIRMA DEL JURADO

ORLANDO GUZMAN MANRIQUE
Jurado



Ph. D. NELSON GUTIÉRREZ GUZMÁN
Director

NELSON GUTIÉRREZ GUZMÁN
Director

DISEÑO Y MONTAJE DE UN BIODIGESTOR PROTOTIPO PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS PISCICOLAS

Albert Yojan Barrera Bermeo¹, Nelson Gutiérrez Guzman², Javier Eduardo Sánchez³, Diana Bermudes Valderrama⁴

RESUMEN

Este proyecto fue financiado por PROCEAL S.A, empresa exportadora de tilapia como producto principal, ubicada en la ciudad de Neiva-Huila, dando lugar a su preocupación por encontrar mejores soluciones al tratamiento de la mortalidad de peces. Por ello se realizó el diseño y el montaje de un digestor prototipo para el tratamiento de los residuos piscícolas debido a que ésta actividad ha tenido un aumento considerable en los últimos años como consecuencia del aumento de la población mundial, además cabe decir, que durante todo el desarrollo de la misma se generan considerables cantidades de residuos, los cuales no tienen ningún tipo de tratamiento que disminuya la carga contaminante que éstos poseen. Con el trabajo se trató de desarrollar un sistema de digestión anaerobia de bajo costo, que permita aprovechar dichos desechos; mediante la producción de biogás y biol (fertilizante líquido). Se usó pescado en estado de descomposición como materia prima, además se utilizó el estiércol vacuno como inóculo para acelerar la actividad microbiana sobre el residuo a tratar. El proyecto abarcó la comprensión de la digestión anaerobia (procesos, parámetros, etc) junto con el estudio diseño de biodigestores existentes, de esta forma se optó por un diseño apropiado utilizando materiales de bajo costo y accesibles en el mercado. Se hizo la caracterización de la materia prima en términos de DQO, MS, MV, Ntotal, Namoniacal.

Posteriormente se diseñó y construyó el digestor, seguido de ello se realizó la metodología de arranque del digestor establecida, sin embargo se realizó el monitoreo de DQO, MS, MV, pH, Alk y AGV para cantidad de residuo ingresado como para el digestato y así llevar un control del proceso de producción del biogás el cual se realizó una vez en la semana durante 60 días, con ello se determinó el potencial de aprovechamiento del residuo.

Palabras clave: digestión anaerobia, digestor, biogás, biol, actividad microbiana, DQO, Ntotal, Namoniacal, pH, Alk y AGV.

SUMMARY

This project was financed by PROCEAL S.A, exporter of tilapia as a main product, in the city of Neiva-Huila, giving rise to its concern for the best solution to the treatment of fish mortality. For this reason, the design and assembly of a prototype digester for the treatment of fish waste was carried out, because this activity has had a considerable increase in recent years as a result of the increase in the world population. It can also be said that during all the development of it generates considerable amounts of waste, which do not have any type of treatment that reduces the pollution load that they have. The work was aimed at developing a low-cost anaerobic digestion system, which makes it possible to take advantage of such waste; through the production of biogas and biol (liquid fertilizer). Fish was used in a state of decomposition as a raw material, and cow manure was used as an inoculum to accelerate the microbial activity on the waste to be treated. The project included the understanding of anaerobic digestion (processes, parameters, etc.) together with the study design of existing

1 Ingeniería Agrícola Universidad Surcolombiana. Av Pastrana Borrero Neiva. E-mail: albertyoba_9001@hotmail.com

2 Ph.D. Docente Universidad Surcolombiana. Av Pastrana Borrero Neiva. Email: ngutierrezg@usco.edu.co

3 Ph.D. Investigador externo Valencia- España. Email: jesr18@hotmail.com

4 ProcealS.A Cra 1D N° 15 -12 Neiva – Huila – Colombia Email: gestioncalidad@proceal.com

biodigesters, in this way an appropriate design was chosen using low cost and accessible materials in the market. The characterization of the raw material was done in terms of DQO, MS, MV, Ntotal, Namoniacal.

Afterwards, the digester was designed and built, followed by the starter digester methodology, however, the DQO, MS, MV, pH, Alk and AGV monitoring was carried out for the amount of waste entered as for the digestate and thus carried out a control of the production process of the biogas which was carried out once a week for 60 days, with this the potential of the waste was determined.

Keywords: anaerobic digestion, digester, biogas, biol, microbial activity, DQO, Ntotal, Namoniacal, pH, Alk y AGV.

INTRODUCCIÓN

El departamento del Huila en el año 2017 fue el principal productor piscícola a nivel nacional (Diario del Huila, 2017), cuya producción estuvo alrededor de 125000 toneladas de las cuales 120230 toneladas son de la piscicultura y el resto corresponden a camarón; con un 46% de la producción nacional, seguido por Meta con un 13% y Antioquia, Tolima, Cundinamarca y Boyacá, cada uno con el 5%, cabe resaltar la producción de tilapia representó el 61%, seguida por la cachama con el 19%, la trucha 13%, y otras especies el 3%, por lo que entre el año 2007 y 2017 tuvo un crecimiento del 9% en el valor del Producto Interno Bruto (PIB) acuícola. Todo esto conlleva a una considerable generación de residuos durante la cadena productiva, como por ejemplo la mortalidad de peces la cual se presenta a diario en las empresas piscícolas, lo que genera olores nauseabundos, contaminación del agua, suelo, aire, entre otros, sin embargo lo que hacen muchas empresas para tratar éstos residuos, es transportar la mortalidad a unas canecas para ser enterradas en unas fosas cercanas al lugar de producción lo que también genera contaminación en el suelo, por lo que hace necesario encontrar nuevas tecnologías para dar un mejor manejo a éstos residuos (Diario del Huila, 2015).

Proceal S.A como exportador líder acuícola premium en Colombia dedicada a la producción, comercialización piscícola y avícola; que busca mejorar continuamente los procesos apoyados en el talento humano competente y capacitado, cuyo principal producto es la Tilapia cuenta con su certificación en todo el proceso productivo, además cuya actividad genera gran cantidad de empleos para las personas consolidándola como una gran familia que contribuye al desarrollo integral de las mismas, sin embargo la empresa está preocupada por mejorar la disposición de los residuos generados por dicha actividad con lo cual está buscando nuevas alternativas para disminuir el impacto sobre el medio ambiente, de ahí nace el proyecto del digestor para tratar los desechos de la empresa, contribuyendo al desarrollo sostenible y ecológico de la región.

Aunque a nivel nacional y departamental no se encontró que las empresas piscícolas tengan una mejor solución para tratar éstos residuos, la empresa brasileña llamada PISCIS aprovecha los residuos de la piscicultura mediante digestión anaerobia transformando en biogás éstos desechos que puede ser convertido en energía eléctrica y / o térmica. Actualmente, poseen un biodigestor con capacidad de 170 m³ y capaz de procesar diariamente hasta 4 ton / día de esos residuos y que puede generar hasta 23 m³ / h de biogás. La eficiencia energética de este biogás estimada en hasta 30.000 kcal / h de energía térmica. Esto acredita el potencial de generación de energía a partir de este biogás y su uso de forma sostenible, además que sacan otros productos como aceite de víscera de tilapia, compost orgánico y harina de pescado. De acuerdo a lo anterior es indispensable conocer el proceso de digestión anaerobia.

Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es el proceso natural que sucede bajo condiciones de ausencia de oxígeno. En este proceso trabajan una serie de microorganismos, los cuales son los encargados de transformar la materia orgánica en biogás (mezcla de gases compuesta por CH₄ y CO₂ principalmente) y produciendo un fertilizante llamado biol o bio-abono rico en nutrientes mineralizados y por tanto en disposición inmediata para las plantas. Para proporcionar una atmósfera de ausencia de oxígeno y facilitar la actividad microbiana se usan los digestores que son reactores cerrados. El ciclo anaerobio del carbono realiza la transformación de la biomasa sin oxígeno en compuestos volátiles como CO₂, NH₃, H₂S, N₂ y CH₄ (Moncayo, 2008).

PROCESO BIOLÓGICO

El proceso anaerobio es un proceso multi-etapa y de reacciones paralelas donde diferentes tipos de bacterias se encargan de degradar la materia orgánica sucesivamente. Cada fase interviene diferentes tipos de bacterias, las cuales operan coordinadamente con el resto, pues los subproductos de unas son el alimento para el desarrollo de las siguientes. Se identifican cinco grandes poblaciones bacterianas, las cuales actúan catalizando tres procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis (formación de ácidos) y metanogénesis (formación de metano), constituyendo cuatro etapas (Elías et al., 2012). En el proceso anaerobio se dan las siguientes etapas:

HIDRÓLISIS.

En esta fase los compuestos orgánicos complejos, como lípidos, proteínas e hidratos de carbono son transformados por enzimas extracelulares en productos solubles y fácilmente degradables, como azúcares, aminoácidos, alcoholes, etc. La hidrólisis es por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros para que las bacterias puedan asimilar la materia orgánica como alimento (Carrillo, 2004).

ACIDOGÉNESIS

Los productos intermedios resultantes de la hidrólisis, se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. En estas primeras fases realizan un primer grupo de bacterias, las hidrolíticas-acidogénicas y las acetogénicas que hidrolizan las cadenas complejas en ácidos orgánicos simples (acético mayormente). Son dos tipos de bacterias en este primer grupo: las anaerobias facultativas (que se adaptan a la presencia de oxígeno y lo consumen) y las estrictas (que no crecen en presencia de oxígeno). El crecimiento bacteriano en esta etapa es rápido. En esta primera etapa no hay una reducción significativa de la DQO del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas más complejas se transforman en cadenas más cortas, sin consumo o reducción de la materia orgánica presente (Moncayo, 2008).

ACETOGÉNESIS

Esta etapa es llevada a cabo exclusivamente por bacterias acetogénicas que degradan ácidos orgánicos donde los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos se degradan produciendo ácido acético ($\text{CH}_3\text{-COOH}$) y liberando como productos hidrógeno y dióxido de carbono que serán los sustratos de las bacterias metanogénicas. Esta reacción necesita energía para cumplirse y es posible gracias a la estrecha relación con las bacterias metanogénicas que sustraen los productos finales del medio minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacterias acetogénicas. La baja concentración de productos finales activa la reacción y actividad de estas bacterias haciendo posible la degradación manteniendo el equilibrio energético (López, 1989).

METANOGENÉNESIS.

El grupo de bacterias encargado de convertir los ácidos orgánicos (acético) en metano y dióxido de carbono, son las bacterias metanogénicas que son estrictamente anaerobias, además son las más importantes porque transforman los ácidos propiónico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclásticas. Sin embargo existe otro grupo de bacterias metanogénicas, las hidrogenófilas, consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás. Estas últimas bacterias son fundamentales para el equilibrio de las condiciones ambientales de la reacción, puesto que una acumulación de hidrógeno alteraría la biodigestión de la materia orgánica (Moncayo, 2008). Aproximadamente el 70 % del metano producido en esta etapa se genera por medio de las bacterias acetoclásticas, y el 30 % restante gracias a las hidrogenófilas.

Particularmente, las bacterias metanogénicas tienen un crecimiento más lento que las bacterias de las etapas anteriores, por lo que su crecimiento pasa a ser la etapa limitante del proceso (Rittmann y McCarty, 2001), sin embargo, para residuos en los que la materia orgánica esté particulada, la fase limitante es la hidrólisis, proceso enzimático cuya velocidad depende de la superficie de las partículas.

Para una producción adecuada de biogás es necesario mantener equilibradas las poblaciones de bacterias acidogénicas y las metanogénicas (Moncayo, 2008). En un digestor de bajo costo, esto se controla con la adecuada proporción de estiércol o biol en el afluente.

El siguiente esquema nos describe todo el proceso de la digestión anaerobia.

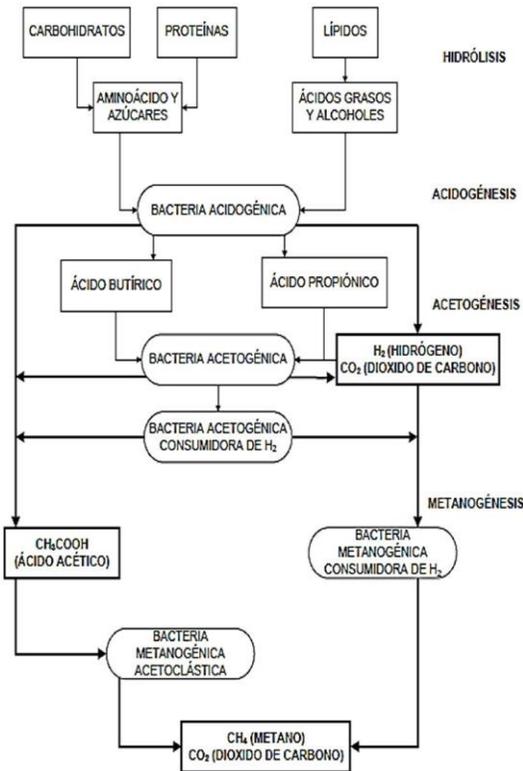


Figura 1: Esquema del proceso de digestión anaeróbica (Salamanca, 2009).

Parámetros importantes en el proceso

AUSENCIA DE OXÍGENO

Las bacterias metanogénicas solo pueden existir en ambientes anóxicos. Estas bacterias no se mueren inmediatamente en presencia de oxígeno, es porque viven en conjunto con otras bacterias que se formaron en procesos anteriores. Sin embargo, para minimizar el efecto inhibitor del oxígeno dentro de la diversidad bacteriana están las bacterias facultativas (adaptativas) que consumirán el oxígeno que pueda existir en el medio (Álvarez, 2004).

TIPO Y CALIDAD DEL SUSTRATO (BIOMASA).

Según el tipo de biomasa con la que se alimenta al digestor la producción de biogás puede variar, dependiendo de la cantidad de grasas, proteínas, hidratos de carbono y nutrientes que tenga esta biomasa. Para el proceso anaeróbico no solo se requieren de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también debe existir un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores) (Riofrío, 2010).

Lo más adecuado es equilibrar la mezcla de biomasa para alimentar al digestor (co- digestión), éste busca una mayor producción de biogás y una biomasa de alto contenido de nutrientes esenciales para el crecimiento de las bacterias involucradas en el proceso. Normalmente los estiércoles contienen estos elementos en proporciones adecuadas, sin embargo, en la digestión de algunos desechos agroindustriales, puede darse la situación donde sea necesaria la adición de otros nutrientes esenciales (Moncayo, 2008).

La biomasa debe cumplir ciertas características, por ejemplo, no se debe cargar con biomasa podrida y/o fermentada pues debido a su acidez, puede contribuir a inhibir el proceso anaeróbico hasta detenerlo (Salamanca, 2009).

No se debe cambiar de manera frecuente o repentina la mezcla con la que se alimenta al digestor. Dado el caso de que sea necesario cambiar el tipo de biomasa, debe realizarse paulatinamente y en un período de varios días para que las bacterias se adapten a la nueva biomasa. Por este motivo se debe controlar el pH de la biomasa de entrada para que sea similar (no tan diferente) al del biodigestor (Riofrío, 2010).

INÓCULO INICIAL. FASE DE ARRANQUE

Para algunos sustratos orgánicos que carecen de microorganismos adecuados se necesita contar con un inóculo de bacterias anaerobias que lleven a cabo la degradación. Sin embargo cabe decir que la baja velocidad de crecimiento de los microorganismos hace necesario utilizar un inóculo inicial que aporte la cantidad suficiente de bacterias. Los inóculos más utilizados consisten en biomasa procedente de otro digestor, como fangos de digestores anaerobios que tratan residuos urbanos o ganaderos, por lo tanto todos los microorganismos presentes deben aclimatarse a las nuevas condiciones de operación y con ello llevar a cabo el proceso anaeróbico.

TEMPERATURA

Uno de los parámetros más importantes en la digestión anaerobia es la temperatura, ya que determina la velocidad de degradación del proceso anaeróbico, principalmente las de las etapas de hidrólisis y metanogénesis. Existen tres rangos de temperatura en los que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo:

Tabla 1. Rangos de temperatura para la digestión (Fuente salamanca)

Materiales	Temperatura	Duración aproximada
Psicrófilos	< 25°C	30 - 60 días
Mesófilos	25°C – 45°C	20 - 25 días
Termófilos	>45°C	10 - 15 días

Al aumentar en el rango de temperaturas se incrementa la tasa de hidrólisis, la velocidad de crecimiento y con ello la velocidad en la producción de biogás (Elías et al., 2012).

Dentro de los rangos de temperatura, y a pesar de que el termófilo sea el más idóneo para obtener una rápida velocidad del proceso y mayor eliminación de patógenos, suele presentar más inestabilidad a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta además mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga. Por lo tanto es necesario realizar un mayor control y seguimiento del proceso en el rango termófilo, como también es necesario mantener la temperatura alta lo que trae un mayor gasto energético, mientras que el funcionamiento en el rango mesófilo es más estable y requiere un menor consumo de energía (Fernández et al., 2008).

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO Y VELOCIDAD DE CARGA ORGÁNICA

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la medida que describe el tiempo promedio que una sustancia reside en el reactor. Al aumentar el TRH, aumenta el grado de materia orgánica degradada así como la producción de metano.

Se calcula para sistemas de carga continua y es el valor del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria:

$$TRH = \frac{V_{digestor}}{V_{carga\ diaria}} \left[\frac{L}{L/d} \right] \text{ Ecuación 1}$$

La velocidad de carga orgánica (VCO) se define como la cantidad de materia orgánica alimentada por volumen de biodigestor en un determinado periodo de tiempo. En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones de metano aunque también aumenta el riesgo de sobrecargas puntuales que conllevan a la acidificación del reactor provocando un descenso del pH y el posible fallo del sistema.

Para seleccionar el TRH para cualquier biomasa depende de la degradabilidad de la materia orgánica, por ello, a mayor degradabilidad menor TRH, y por lo tanto, menor sería el tiempo que tendría que pasar la materia orgánica dentro del reactor. (Salamanca, 2009).

AGITACIÓN

Elías *et al.* (2012) citan las siguientes razones para mantener un cierto grado de agitación en el medio en digestión:

- Mezclado y homogeneizado del sustrato de alimentación con el inóculo
- Distribución uniforme de calor para mantener una isoterma suficientemente correcta
- Evitar la formación de espumas o la sedimentación.
- Favorecer la transferencia de gases, que pueden ser atrapados en forma de burbujas en el sustrato

Diferentes métodos de agitación son la recirculación de materia digerida, agitación mecánica y la inyección del gas producido, (Appels *et al.* 2008). La materia digerida se realiza una recirculación desde el centro del reactor y al mezclarse con el sustrato nuevo y calentarse se introduce de nuevo en el reactor. Ya para la agitación mecánica se lleva a cabo con turbinas de baja velocidad para no destruir los flóculos o agregados de bacterias, necesarios para mantener un proceso estable.

PH (ACIDEZ Y ALCALINIDAD).

El valor del pH es un importante indicador del funcionamiento del proceso dentro del biodigestor. Según Elías et al. (2012), durante las fases del proceso los microorganismos presentan máxima

actividad en un rango de pH establecido (Tabla 2). Dentro del proceso la mayor problemática que se puede encontrar es mantener el pH por encima de 6,6, ya que los ácidos orgánicos producidos como intermediarios en las primeras etapas debido a una sobrecarga o cualquier otro desequilibrio pueden provocar un rápido descenso del pH y el consiguiente cese de la producción de metano (Rittmann y McCarty, 2001). La alcalinidad y el pH en la digestión anaerobia pueden ajustarse añadiendo a la mezcla diferentes productos químicos que controlan la alcalinidad y el pH están: cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), cal virgen (CaO), carbonato de sodio (Na_2CO_3), bicarbonato de sodio (NaHCO_3), hidróxido de sodio (NaOH), y bicarbonato de amonio (NH_4HCO_3) (Salamanca, 2009).

Tabla 2. Rangos óptimos de pH para los diferentes microorganismos (adaptado de Elías et al., 2012)

Etapa	Tipo de bacterias	Rango óptimo pH
Hidrólisis	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 - 7,4
Acidogénesis	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 - 7,4
Acetogénesis	Acetogénicas y homo acetogénicas	7,0 - 7,2
Metanogénesis	Metanogénicas hidrogenófilas y acetoclásticas	6,5 - 7,5

Además de la temperatura y el tiempo de retención, el pH es un parámetro de control importante ya que las bacterias metanogénicas son muy sensibles a variaciones del mismo. Para promover la degradación y concentración de metano, el pH debe estar entre los 6,5 y 7,5 (UPME, 2003).

El pH es influenciado por sobrecargas orgánicas y presencia de inhibidores. Los ácidos grasos volátiles (AGV) como el acetato, disminuyen el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV como lo hacen las bacterias acetogénicas, éstos se acumulan y disminuyen el pH en el digestor. Normalmente la concentración de AGV no supera los 2-3 g/l, expresada como ácido acético. Si se sobrepasa este nivel, la digestión cesará en dos o tres días debido a que los metanógenos no pueden consumir los ácidos a la misma tasa con que se producen (Riofrío, 2010).

La alcalinidad es una medida de la capacidad tampón del medio. En el caso de biodigestores anaerobios, la alcalinidad corresponde a la suma de las concentraciones de ion carbonato y bicarbonato, expresado en mg/l de CaCO_3 . Mantener un valor óptimo de alcalinidad en el digestor es muy importante, ya que amortigua (o tampona) los repentinos cambios de pH producidos por la generación de ácidos grasos volátiles. El valor de la alcalinidad del bicarbonato debe estar en un rango entre 1500 y 5000 mg/l de CaCO_3 . La concentración de ácidos volátiles bajo condiciones estables suele estar entre 50 y 100 mg/l. Si se mantiene una relación constante ácidos volátiles/alcalinidad menor de 0,25, se asegura la capacidad tampón del sistema.

SUSTANCIAS INHIBIDORAS

En éste proceso se pueden encontrar inhibidores importantes de las bacterias metanogénicas como son el nitrógeno amoniacal, el ácido sulfhídrico y los ácidos grasos volátiles, así como metales pesados a altas concentraciones. Este tipo de sustancias pueden encontrarse como componentes del sustrato de alimentación o como subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos del reactor. Chen et al. (2008), que realizan una revisión de la bibliografía en la inhibición del proceso de digestión anaeróbica, hablan de la variación que existe en los niveles de inhibición/toxicidad reportados para la mayoría de sustancias.

ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES (AGV)

La acumulación de AGV en el digestor está relacionada con la disminución en la producción de biogás y éstos son los más importantes intermediarios para llevar a cabo proceso anaerobio. Los ácidos a considerar son: fórmico, acético, propiónico, butírico y valérico, aunque los más abundantes son el ácido acético y el propiónico. No es útil hacer una determinación total de ácidos mediante valoración, por lo que se deben cuantificar de manera individual mediante cromatografía de gases. Ahring *et al.*, concluyeron que las concentraciones de ácidos grasos volátiles por debajo de 3000 mg acético/l, no se produce disminución de la producción de metano (Van Lier, J.B., Hulsbeek, J., Stams, A.J., Lettinga, G. 1993).

NITRÓGENO AMONIAICAL

Los desechos ganaderos tienen altas concentraciones de compuestos nitrogenados. El nitrógeno amoniacal es un nutriente que tiene gran importancia para el crecimiento de los microorganismos, cuya carencia puede provocar el fracaso en la producción de gas, una concentración excesivamente alta del mismo puede limitar su crecimiento. Para concentraciones de amoníaco mayores de 1500 mg/l puede llegar a inhibir el proceso a pH mayores de 7, y a concentraciones mayores de 3000 mg/l se vuelve tóxico (Ahring *et al.* 1995).

CATIONES Y METALES PESADOS

Diferentes metales llegan a ser tóxicos cuando alcanzan una cierta concentración en el sustrato. Cabe destacar que la presencia continuada de estas sustancias puede hacer que las bacterias se adapten y admitan niveles de tolerancia mayores. En la Tabla 3 se muestran las concentraciones de diversos cationes a partir de las cuales puede producir inhibición en el sistema (Campos A. E. 2001).

Tabla 3. Concentraciones inhibitorias de cationes

Catión	Concentración inhibición (mg/l)
Na	3500 – 5500
K	2500 – 4500
Ca	2500 – 4500
Mg	1000 – 1500

TIPOS DE PROCESOS ANAEROBIOS PARA LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

Los sistemas de digestión anaerobia de los residuos sólidos orgánicos suelen diferenciarse en:

El tipo de carga del sustrato: continuo (una o varias etapas) o discontinuo

La concentración de sólidos del sustrato (vía húmeda o seca)

El tipo de reactor: de mezcla completa o de flujo pistón

La agitación

La recirculación del efluente

La temperatura: psicrófilos, mesófilos o termófilos

PROCESOS CONTINUOS Y DISCONTINUOS

Generalmente se utilizan dos tipos de procesos para llevar a cabo la digestión anaerobia de los residuos sólidos orgánicos: los continuos y los discontinuos. Los sistemas discontinuos, los reactores se llenan una vez con sustrato y se cierran durante todo el tiempo de retención para finalmente abrirse y vaciarse el efluente del reactor. Ya en los sistemas continuos, en cambio, el sustrato se introduce continuamente en el reactor, saliendo de este la misma cantidad introducida.

Los reactores discontinuos son útiles para llevar a cabo una rápida digestión con un equipo barato y simple, además en ellos se puede evaluar la velocidad de digestión fácilmente (Weiland, 2006 en Khalid et al. 2011). Estos sistemas presentan alguna limitación, como una gran variación tanto en la producción de gas como en su calidad y la pérdida de gas en el vaciado del reactor (Linke et al., 2006 en Khalid et al. 2011). Para obtener una producción de biogás continua, deben combinarse varios reactores discontinuos con puestas en marcha intercaladas en el tiempo (Elías et al., 2012).

En los sistemas de una etapa, todos los procesos biológicos se llevan a cabo en un solo reactor. El mayor inconveniente de este tipo de sistemas es que todos los procesos trabajan bajo las mismas condiciones de operación a pesar de que las bacterias involucradas en dichos procesos tengan tasas de crecimiento y valores óptimos de pH diferentes.

Esa es la razón por la que los sistemas de una etapa fallan más que las de dos o más etapas, ya que, como se ha comentado anteriormente, un desequilibrio entre las tasas de producción de ácido y de metano puede causar un descenso del pH con el consiguiente fallo del biodigestor (Gerardi, 2003).

Los sistemas de dos o más etapas permiten que los procesos biológicos se lleven a cabo secuencialmente en al menos dos reactores. Los sistemas típicos consisten en un primer reactor en donde se lleva a cabo la hidrólisis y la acidificación, y un segundo reactor en donde sucede la metanogénesis gracias al producto obtenido del primer reactor.

Además de que muchos de los tóxicos son eliminados en la primera etapa (Gerardi, 2003). Según Vandevivere *et al* (2003) la mayor ventaja de estos sistemas es la mejor estabilidad biológica que proporciona cuando se tratan residuos que causan un funcionamiento inestable en los sistemas de una etapa. Entre los inconvenientes, cabe destacar que son más caros de construir y mantener (Ward et al 2008).

PROCESOS DE VÍA HÚMEDA Y SECA

Los procesos de digestión anaerobia pueden ser vía húmeda o seca dependiendo de la concentración de sólidos en el residuo de alimentación. Para Ward et al. (2008) los sistemas húmedos son aquellos en los que el valor de los sólidos totales (ST) es un 16 % o menos, mientras que los sistemas secos tienen entre 22 y 40 % de ST, aquellos que se encuentran entre ambos valores de sistemas semi-secos.

En los procesos de digestión húmeda, el residuo sólido se debe condicionar para tener una concentración adecuada de sólidos añadiendo agua al proceso o recirculando una parte del efluente líquido, o mediante la co-digestión con otro residuo líquido (Nayono, 2009). El aplicar estos sistemas tiene muchas ventajas como la dilución de sustancias inhibitoras debido al agua utilizada en el proceso y la necesidad de equipos mecánicos menos sofisticados.

El objetivo del presente trabajo es el diseño y montaje de un digestor prototipo para el tratamiento de los residuos piscícolas, así mismo monitorear los parámetros básicos que intervienen en el proceso de producción de gas mediante la digestión anaerobia, y con ello ver el comportamiento del residuo para la producción de gas.

METODOLOGÍA

Localización

La empresa Proceal S.A en está ubicada Cra 1D N° 15 -12 Neiva – Huila oficina administrativa, cuya planta de producción está en el embalse de Betania, localizada al suroriente del departamento del

Huila, a 35 Km de la ciudad de Neiva, en la cuenca alta del Río Magdalena, bajo la jurisdicción de los municipios de Yaguará, Campoalegre, Hobo y Gigante, a una altura aproximada de 557msn, donde se tomaron las muestras de pescado en estado de deterioro que después se transportaron hasta la facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana en la ciudad de Neiva.

Materia prima

La materia prima usada para el proyecto fueron pescados en estado de descomposición, traídos de embalse de Betania, los cuales presentaban un olor nauseabundo, sin escamas, color blanco, ojos hundidos, entre otras; esto dependiendo del grado de deterioro del mismo.

Pretratamiento

Se realizó un pretratamiento al pescado el cual consistió en el fraccionamiento en partes más pequeñas mediante un cuchillo metálico, después se ingresaron las partes fraccionadas a una licuadora de marca Premium y se hizo la trituración, logrando así una mezcla homogénea, se determinó que la muestra era muy seca y tenía partes de huesos de pescado, sin embargo se decidió agregar agua para tener una mezcla fluida para la caracterización.

Caracterización del residuo de pescado

Para la caracterización del residuo se realizaron diferentes análisis de laboratorio, los cuales se realizaron en el AGUALIMSU S.A.S (Análisis Físicoquímicos y microbiológicos de aguas, alimentos y Suelos), ubicado en la ciudad de Neiva-Huila, donde se solicitó DQO, Sólidos Totales y volátiles, Nitrógeno total y amoniacal, para muestras de pescado en estado de descomposición previamente triturado; los procedimientos basados (Standard Methods 5220-B), (Standard Methods 2540-B y 2540-E), (Standard Methods 4500 NH₃) respectivamente.

Ensayos de dilución

Para la determinación del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) se realizó el triturado de la muestra donde se tomó un litro de pescado triturado con agua, dilución 1:1 con agitación, se vertió la mezcla dentro de un recipiente previamente rotulado y se selló herméticamente el recipiente, sin embargo a la tapa se le adaptó una manguera con el fin de servir de conducto para el gas que produjo el residuo, a ésta se le añadió agua y dejándola con un nivel de referencia de partida del que a medida que el gas empuja al agua se modificaba dicho nivel con ello obteniéndose el volumen de gas obtenido; luego se realizó otra prueba PBM sin agitación donde se usó el inóculo el cual se trajo del Sena angostura; cuyas cantidades fueron 0,7 lts de inóculo, 1,3 lts de pescado diluido con agua en la misma dilución que el anterior ensayo, con un volumen útil del 2lts de residuo, cabe decir que se puede mejorar la producción de gas al incorporarle agitación.

Análisis de laboratorio de monitoreo

Temperatura

La medición de la temperatura se realizó con el método directo midiendo con un termómetro infrarrojo Mastercool 52224-A, ésta medida se tomó en el momento tanto para el residuo que se ingresó como también para el digestato que se sacaba.

pH

Para la determinación de pH, se tomó una muestra de 40 ml del residuo, se realizó la lectura con el potenciómetro Ohaus Starter5000 previamente calibrado de acuerdo con el protocolo y análisis descrito por la AOAC y Standard Methods, método potenciómetro (AOAC-981.12).

Sólidos totales y volátiles

Para la determinación de sólidos totales y volátiles para el estudio se tomaron 25gr de la muestra sólida de pescado, después de ingresar a una estufa de 105°C por 24h y luego a una mufla a 550°C por 1h, se realizó su respectivo pesaje y cálculos (Standard Methods 2540-B y 2540-E).

Puesta a punto del método de medición de AGV/ALK

Se tomó 25ml de muestra del digestor, luego se pasó por la centrífuga Modelo 800-B de 4000rpm, durante 15min, luego recogió el sobrenadante en un vaso de 400ml, después se suspendió el residuo en 25ml de agua destilada, se realizó esta operación 2 veces más, se realizó la agitación del líquido recuperado, se determinó el pH inicial, con el montaje determinado para la titulación se añadió ácido sulfúrico llevando el pH a 4, se anota el volumen gastado, después se bajó el pH 3,5 de la muestra, se llevó a ebullición durante 3 min y se enfrió, se agregó Hidróxido de sodio hasta que se llevó el pH a 4 y 7, donde se anotó el volumen gastado respectivamente, para terminar los AGV y Alk se realizaron los cálculos pertinentes de acuerdo a la metodología establecida por la empresa DAM.

Diseño y construcción del digestor prototipo.

El diseño del biodigestor prototipo se realizó con una caneca plástica de 50cm de altura y un diámetro interno de 25,2 cm con una capacidad de 30lts, con un volumen útil de 24lts correspondiente al 80% de reactor y el otro 20% para la cámara del biogás, donde la parte superior va a tener una entrada para los residuos y una salida de biogás regulada mediante una válvula que se conectó a una manguera; después de cierta distancia se colocó otra válvula con el fin de liberar presión. El gas producido durante el proceso de digestión anaerobia es transportado a través de la manguera que llega a un dispositivo que se eleva un tubo aforado y sellado en un extremo a medida que hay producción del biogás, éste da una medida de altura la cual se anota y se realiza los cálculos respectivos del volumen del gas obtenido, teniendo en cuenta el diámetro interno del tubo que contiene el gas. En el reactor se ubicaron 2 salidas más una en la parte inferior de éste para drenar el residuo digerido y la otra en la parte central donde se sacaron las muestras para los respectivos análisis de laboratorio, (Ver figura 2)

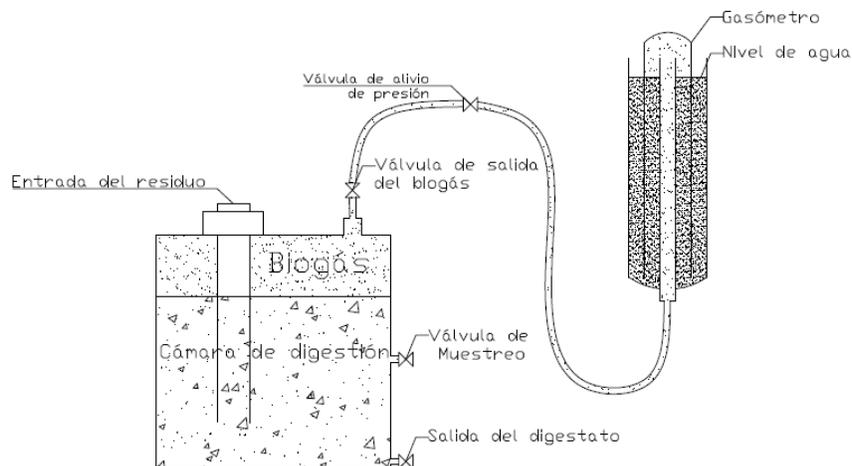


Figura 2. Esquema del digester prototipo

Montaje

La construcción del prototipo se realizó en el laboratorio de Maquinas en el primer piso de la facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana, lugar donde se llevaron los diferentes materiales para dicha construcción, luego de ello se dio inicio a su construcción, donde se realizó cortes de tubería, conexiones de uniones y válvulas de diferentes calibres, con ello se terminó de construir el diseño del prototipo, (Ver figura 3)



Figura 3. Construcción del digester prototipo

Puesta en marcha

Teniendo construido el digester se trajo 24 litros de inóculo (Bacterias activas de un digester en funcionamiento) y se vaciaron en el digester prototipo sellándolo herméticamente, esto con el fin de hacer la estimación de biogás del inóculo, además se realizó una caracterización del mismo en cuanto %MS, %MV, pH, Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y Alcalinidad (ALK), luego de 6 días se agregó 3kg de estiércol de vaca con lo cual se mejoró el cultivo bacteriano para mejorar su actividad. Después de unos días se inició agregando 1,1lts/día de residuo en la dilución estimada.

Inoculación

Se hizo la caracterización del inóculo y el residuo en término temperatura, pH, MS, MV, Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y Alcalinidad (ALK). Para la inoculación se reemplaza la misma cantidad de residuo por la cantidad de inóculo retirado, que fue de 1.1lts /día, para mantener constante el volumen

útil del digestor y poder estimar la producción de biogás, como también ver el comportamiento del sistema.

Seguimiento

Se realizaron análisis cada semana de Temperatura, MS, MV, pH, Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y Alcalinidad (ALK) tanto para el residuo como para el digestato, con ello se trató que estos parámetros estuvieran dentro de un rango permitido para la producción de biogás, evitando la desestabilización del sistema.

Resultados

Caracterización del pescado

Cuando se decide tratar un residuo mediante la digestión anaerobia es indispensable que dicho residuo cumpla algunas condiciones, sin embargo para el residuo de pescado se hizo la determinación de los parámetros básicos, con ello se obtuvo en la tabla 4 la caracterización del residuo donde se muestra los datos obtenidos tanto sólida como en dilución.

Tabla 4. Características del residuo

<i>Caracterización de la muestra de pescado</i>		
Parámetros	Sólida	Dilución 1:1
<i>DQO (g/l)</i>		73,8
<i>MS (g/l)</i>	303,6	118.85
<i>MV (g/l)</i>	900,4	892,86
<i>NT (mg N/L)</i>	8500	5500
<i>N amoniacal (mg NH3/L)</i>	2400	1600

Se observó que en la muestra sólida los valores determinados están por encima del rango permitido cuyo valores deben ser valores menores 1500 mg/l, pero la muestra sólida de pescado tiene un valor de nitrógeno amoniacal de 2400mg/l, cuyo valor está en el rango donde se presenta inhibición del proceso, además está cerca al valor donde se convierte en tóxico que es de 3000mg/l, según (Ahring et al. 1995.).

Por tal razón, se hizo una dilución del residuo con el propósito de disminuir el valor del amoniacal, el cual se redujo a 1600mg/l que está donde puede presentar inhibición a pH 7 pero que éste en el residuo fue de 6,8 en promedio, sin embargo se trabajó con la dilución 1:1, la cual tiene todos los valores ideales para trabajar el proceso en vía húmeda cuyo porcentaje de sólidos totales es menor o igual a 16%, lo que hace que se condicione dicho residuo para tener una concentración ideal para llevar a cabo el proceso, (Nayono, 2009), además que la DQO obtenida en la muestra diluida es coherente dado que la tiene un algo contenido de materia orgánica, sin embargo para la muestra sólida no se logró encontrar un valor.

Monitoreo

Para el monitoreo se obtuvieron los siguientes datos de entrada y salida, los cuales corresponden para el pescado diluido 1:1 y para el digestato respectivamente y se muestran a continuación en las siguientes tablas:

Tabla 5. Monitoreo del residuo de ingreso

ENTRADA	PESCADO 1:1					
	Parámetros	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
Temp (muestra) °C	27,4	28,3	25,8	20,5	25,3	
pH	6,66	6,732	6,435	6,677	6,65	
MS (g/l)	84	10,1	58,7	40,6	56,1	
MV (g/l)	813,33	882,35	784,09	883,04	940,7	
ALK (mg CaCO ₃ /l)	1000	700	860	400	580	
AGV (mg CaCO ₃ /l)	240	240	120	120	340	

La tabla 5 muestra que durante el seguimiento el pescado diluido no presentó diferencias significativas en cuanto al pH que osciló entre 6.4 y 6.7, lo que hace que esté dentro del margen de pH establecido en la literatura citada que es 6.5-7.5 para poder que se lleve a cabo el proceso de degradación anaerobia. La temperatura no tuvo una variación significativa cada vez que se ingresó al digestor; sin embargo se encontró en el residuo diluido que la MS tuvo valores menores del 16%, que según Ward et al. (2008) los define como sistemas en vía húmeda, ya para la MV en el pescado diluido se encontraron valores que oscilaron entre 800 a 940 aproximadamente. Con respecto a la alcalinidad y los ácidos grasos volátiles, para el primero se obtuvo un valor máximo de 1000mgCaCO₃/l lo que significa que no está en el valor óptimo que está entre 1500 y 5000, para mantener los repentinos cambios de pH, además los valores de AGV que se encontraron estuvieron un poco alto con respecto a lo permitido cuyo rango está en 50 a 100 mgCaCO₃/l, se debe mantener una relación constante ácidos volátiles/alcalinidad menor de 0,25, se asegura la capacidad tampón del sistema.

Tabla 6. Monitoreo del digestato

SALIDA	DIGESTATO						
	Parámetros	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6
Temp (muestra) °C	27,5	30,7	26,4	27,3	29,5	29,1	
pH	7,4	7,14	6,83	6,92	6,73	6,83	
MS (g/l)	6,6	6,6	8	9,1	96,5	22,4	
MV (g/l)	714,29	750	676,77	772,28	981,48	946,2	
ALK (mg CaCO ₃ /l)	620	840	1800	8860	2060	9800	
AGV (mg CaCO ₃ /l)	180	220	600	4460	1000	4680	

Ya en el monitoreo del digestato se obtuvo los datos mostrados en la tabla 6, los cuales con respecto en la temperatura estuvieron en un rango 26 a 31°C aproximadamente con respecto a los datos de entrada datos en la tabla 6, lo cual aumentó un poco en el digerido debido a que la temperatura dentro del digestor cambia. En el pH del digerido se tuvo un valor de máximo de 7,4 que disminuyó hasta un valor de 6,8 aproximadamente sin sobre pasar el rango óptimo citado anteriormente, debido a que se alimentó con el pescado diluido con un pH de 6,66 en promedio. Para la MS mantuvo dentro rango 0 a 16% que caracteriza a un sistema de anaerobio vía húmeda, con respecto a la MV presentó una disminución en unas semanas, aunque aumentó en las últimas, esta disminución o aumento de la misma depende de la carga orgánica que se maneje. Para la ALK y AGV se obtuvieron valores máximos de 9800 y 4680 mgCaCO₃/l respectivamente en la misma semana, lo que no indica que se puede inhibir el proceso anaerobio.

Gráficas de monitoreo

Según el rango de temperatura que se mantenga dentro del digestor, el TRH a temperaturas altas se reduce y a bajas temperaturas aumenta, de acuerdo a las características del residuo se puede determinar que temperatura se puede trabajar.

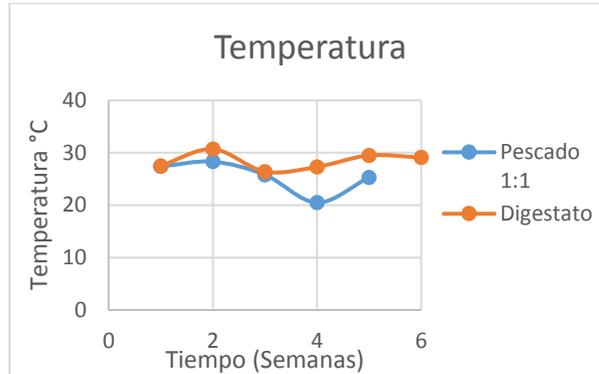


Figura 4. Monitoreo temperatura

La figura 4 muestra que durante el monitoreo de la temperatura estuvo dentro del rango mesófilo que está en 25- 45°C, los datos de entrada estuvieron por encima de los 25°C aunque en un valor quedó por debajo, sin embargo para los datos obtenidos en el digestato o datos de salida se evidenció que la temperatura mínima fue de 26,4°C y la máxima fue de 30,7°C, cabe aclarar que varió según la temperatura ambiente de esos días; aunque se encontró que la gran mayoría de los diferentes digestores funcionan dentro de los límites de mesófilos y para obtener una digestión óptima la temperatura es de 35°C (Morales, 2005). Por lo tanto en el prototipo no se alcanzó dicha temperatura haciendo necesario un sistema de calentamiento para el residuo.

Dentro de la digestión anaerobia el pH es una de los parámetros que determina el funcionamiento del proceso del digestor, pues para ello es indispensable mantener el pH por encima de 6,5.

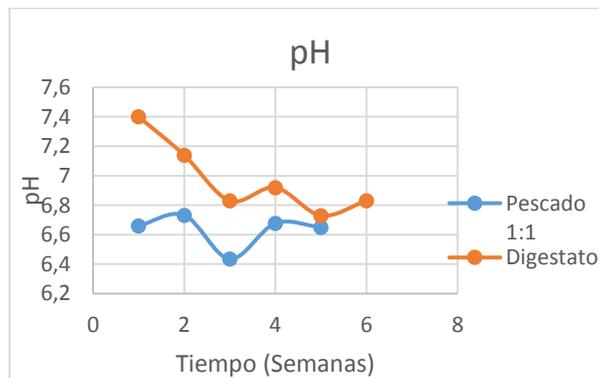


Figura 5. Control de pH

En la parte del pH se obtuvo valores óptimos tanto de entrada como de salida, cuyos valores no sobrepasaron el rango de 6,5-7,5 que es el necesario para el desarrollo de las diferentes etapas de la digestión anaerobia, por lo tanto promueve la descomposición de la materia y concentración de metano (UPME, 2003), sin embargo en el pH inicial del digestato fue de 7,4 casi al límite del rango

adecuado, datos que con el tiempo y la alimentación del residuo disminuyó hasta 6,8 en la parte final del monitoreo, como se evidencia en la figura 5.

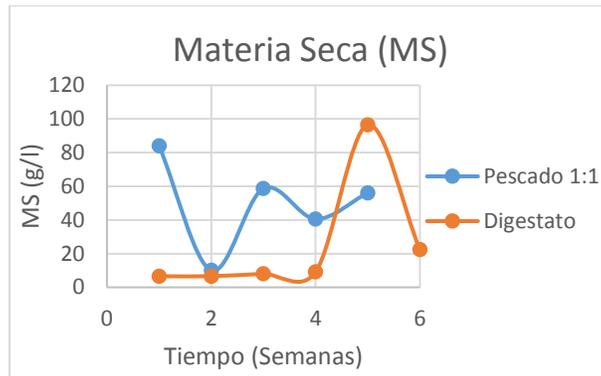


Figura 6. Materia seca

Para la MS para el pescado 1:1 y el digestato se obtuvieron datos por debajo del 16% para la digestión húmeda, sin embargo en el pescado se obtuvo un valor 10,1g/l en la segunda semana donde posiblemente pudo haber un error en la determinación, pues los demás datos no tienen una gran diferencia entre ellos. En el digestato se presentó en las tres primeras semanas unos valores estables de MS, aunque en la quinta tuvo un valor de 96,5g/l que superior a las anteriores, esto debido a una sobrealimentación del sistema, porque en la sexta semana se evidencia una disminución de la MS considerable, pues en esa semana se normalizó la alimentación del digestor, como se evidencia en la figura 6.

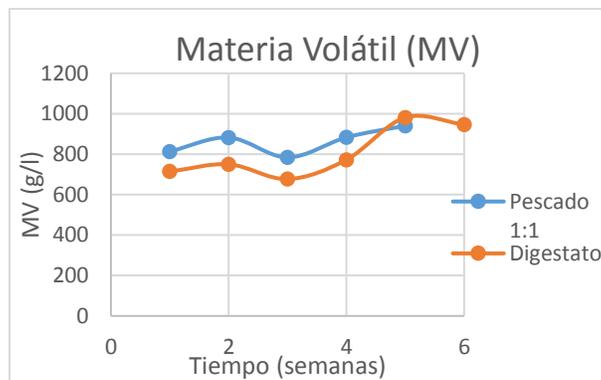


Figura 7. Seguimiento materia volátil

Con respecto a la materia volátil se encontraron valores altos tanto para el pescado 1:1 cuyos valores fueron por encima de los 784,09 g/l hasta un valor máximo de 940,7g/l en la quinta semana, ya para el digestato los valores disminuyeron a 676,77g/l presentando un comportamiento similar en las cuatros primeras semanas como se ve en la figura 7, con una diferencia de 100g/l aproximadamente comparado con el pescado 1:1, sin embargo la MV en el digestato varió en las últimas semanas obteniéndose un valor máximo de 981,48g/l, cuyo valor pudo verse afectado por la alimentación del sistema, por lo tanto, éstos datos encontrados muestran que puede haber una alta producción de gas si se lleva un proceso anaerobio adecuado.



Figura 8. Alcalinidad

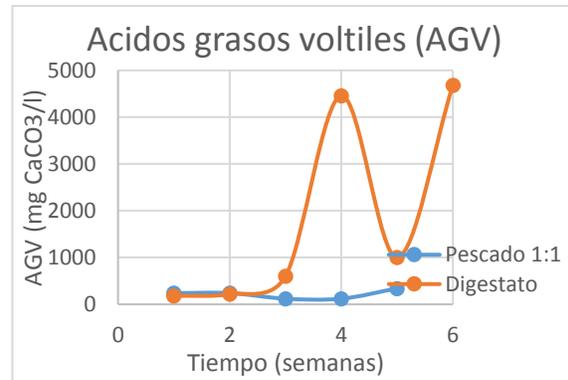


Figura 9. Ácidos grasos Volátiles

Con base en los resultados obtenidos para alcalinidad y ácidos grasos volátiles en el digestato se obtuvieron valores elevados en la semana cuatro y en la sexta cuyos valores aumentaron considerablemente, éstos fueron para la alcalinidad 8860-9800 mgCaCO₃/l y para los ácidos grasos volátiles fueron 4460-4680 mgCaCO₃/l, lo que indicó un comportamiento similar entre la alcalinidad y los ácidos grasos del digestato, sin embargo para los datos de entrada se encontró que tanto para la alcalinidad y los ácidos grasos volátiles se encontró cierta estabilidad en el comportamiento del pescado 1:1, todo éstos comportamiento se puede observar en las figuras 8 y 9. Aunque se obtuvieron valores altos de AGV no se encontró el descenso del pH, que en la literatura se expresa (Riofrío.2010).

CONCLUSIONES

Con respecto al diseño y la construcción del digestor prototipo funcionó adecuadamente en las pruebas de medición antes de la puesta en marcha, sin embargo cuando se dio inicio y durante el tiempo de estudio el sistema de medición instalado en el digestor no presentó movimiento, por lo tanto pudo deberse a que hubo inestabilidad en el proceso, lo que provoca una poca producción de gas.

De acuerdo con la caracterización del residuo de pescado, éste presenta buen potencial de aprovechamiento para la producción de gas, dado a su alto contenido de DQO, cuyo valor está en 73,8g/l, cabe aclarar que se obtuvo con una dilución 1:1 que correspondió a 500gr de pescado y 500ml de agua, por lo tanto hay una gran cantidad de materia oxidable para ser aprovechada mediante digestores anaerobios.

El digestato producido durante el proceso puede ser aprovechado como fertilizante o enmiendas agrícolas de acuerdo a sus características físico-químicas, que deben ser establecidas para su posterior uso y con ello se disminuye la carga contaminante que generan estos desechos en el medio ambiente, así mismo se puede determinar los usos que se le puede dar.

Para mejorar las condiciones del proceso de digestión, es necesario implementar un tratamiento previo de trituración del pescado, con el fin de obtener una mezcla homogénea en la carga, logrando así una mayor superficie donde se desarrollen los microorganismos que llevan a cabo el proceso de digestión anaerobia.

De acuerdo con los ensayos de laboratorio PBM se estableció que se deben establecer ciertas condiciones de temperatura para estimular la producción de biogás, que debe estar en un rango 37-

40°C, también es necesario que se tenga un sistema de agitación para lograr que no haya sedimentación y evitar la formación de costras en dentro del digestor.

Según los datos de producción de gas en los ensayos PBM se encontraron valores de 0,413lts/día con agitación y 0,361lts/día sin agitación, donde se evidenció producción de gas en el residuo aunque fue poca, lo que indica una posibilidad de aprovechar el residuo para tal fin, sin embargo en el prototipo no hubo movimiento en el sistema de medición del gas, que pudo ser debido a las presencia de fugas de gas y la inestabilidad en el proceso, ya que al darle condiciones de temperatura de 37-38°C se evidenció una mayor producción de gas que en los ensayos anteriores.

En el seguimiento se determinaron los parámetros básicos para poder trabajar el residuo en un digestor, se encontraron concentraciones de alcalinidad y AGV altas, para controlar el descenso del pH se pueden usar cal virgen (CaO), carbonato de sodio (Na₂CO₃), bicarbonato de sodio (NaHCO₃), hidróxido de sodio (NaOH), y bicarbonato de amonio (NH₄HCO₃), sin embargo no hubo descenso del pH que estuviera fuera del rango óptimo, pues no se sabe con certeza a que se debió dicho comportamiento del residuo, pues no había estudios sobre ello que nos dieran una respuesta concreta a esto.

RECOMENDACIONES

Es importante hacer una caracterización más amplia y profunda del residuo dado que en el proyecto se hizo una identificación básica, por lo tanto es necesario definir el residuo de pescado respecto a sustancias inhibidores como nitrógeno amoniacal, ácido sulfúrico y ácidos grasos volátiles, así mismo caracterizarlo en términos de metales pesados como Na, K, Ca y Mg dado que en ciertas cantidades se vuelven tóxicos logrando así inhibir el proceso.

Para lograr una producción de gas a partir del residuo de pescado es indispensable que se garantice un sellado hermético del sistema y además tener las concentraciones ideales de los diferentes parámetros para tener estabilidad en el sistema logrando así una producción máxima de gas.

Es necesario abarcar una investigación más amplia y evaluar meticulosamente el comportamiento del residuo porque no se encuentra mucha información sobre dicha materia y los análisis que se realizaron no identifica el comportamiento total de la materia, lo cual para realizar una inversión alta no es recomendable ejecutarlo arbitrariamente.

En lo referente al biol o bio-abono se podría usar como enmienda agrícola, fertilizante para cultivos, alimentos para animales, pero se debe realizar los procedimientos de laboratorio adecuados para determinar los posibles usos.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

Ahring et al. 1995. "Methanogenesis in thermophilic biogas reactors". *International Journal of General and Molecular Microbiology*.

Álvarez, R. (2004). *Producción anaeróbica de biogás aprovechamiento de los residuos del proceso anaeróbico*. Universidad Mayor de San Andrés, Ingeniería Química, Instituto de Investigaciones en Procesos Químicos. La Paz.

Appels, L., Baeyens, J., Degreève, J., Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* 34 (2008) 755–781

- Campos A. E. 2001. "Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria alimentaria". Tesis doctoral. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida.
- Carrillo, L. (2004). *Energía de Biomasa*. 1° ed. Jujuy.
- Chen, Y., Cheng, J. J., Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, Doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057
- Diario del Huila, 2017. Huila primer productor. Consultado 22 de mayo de 2018 <https://www.diariodelhuila.com/en-2017-el-huila-fue-el-principal-productor-piscicola-a-nivel-nacional>
- Diario del Huila, 2015. Mortalidad de peces en Betania. Consultado 22 de mayo de 2018 <https://diariodelhuila.com/economia/asi-se-vive-la-mortalidad-de-peces-en-betania-cdgint20150415210545162>
- Elías, X., Campos, E., Flotats, X. (2012). Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. Ediciones Diaz de Santos, Madrid
- Fernández, J., Pérez, M., Romero, L. I. (2008). Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Bioresource Technology* 99 (2008) 6075–6080
- Gerardi, M. H. (2003). Wastewater microbiology series. A John Wiley & Sons, Inc., Publication Hoboken, New Jersey
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Biomasa: Digestores anaeróbicos*. IDAE. Madrid.
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management* 31 (2011) 1737–1744
- López, J. M. (1989). *Digestión Anaeróbica de Lodos de Depuradora*. Tesis doctoral. Departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química, Universidad de Alicante. Alicante : s.n.
- Martí-Herrero, J. (2008). Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares. Cooperación Técnica Alemana-GTZ, ISBN 978-99954-0-339-3; 2008
- Moncayo, Gabriel. (2008). *Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. s.l.: Aqualimpia Beratende Ingenieure.
- Morales, P. (2005). Digestión anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas y su aprovechamiento. Tesis de grado. Ingeniería Química, Universidad de las Américas Puebla. Puebla.
- Nayono, S. E. (2009). Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production. Thesis, Universitat Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 148 p.
- Riofrío, J., Gallardo, A. (2010). Factibilidad técnica y económica para el desarrollo de una instalación termoelectrica de 160 kW mediante la combustión de biogás para la hacienda "Tarragona". Tesis de grado. Departamento de Energía y Mecánica– ESPE. Sangolquí.
- Rittmann, B. E., McCarty, P- L. (2001). Environmental Biotechnology: Principles and Applications. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering

- Salamanca, J. A. (2009). *Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor a Escala Piloto para la Generación de Biogás y Fertilizante Orgánico. Tesis de grado.* LADEA-USFQ. Quito.
- Solari, G. (2004). *Ficha Técnica Biodigestores.* Universidad Alas Peruanas. Lima.
- Steven, R., Szolar, O., Braun, R., 1998. \Feedstocks for anaerobic digestion". Institute of Agrobiotechnology Tulin, University of Agricultural Sciences.
- Vandevivere, P., De Baere, L., Verstraete, W. (2003). Types of anaerobic digesters for solid wastes. Amsterdam: IWA publishing company
- Van Lier, J.B., Hulsbeek, J., Stams, A.J., Lettinga, G. 1993. \Temperature susceptibility of thermophilic methanogenic sludge: implication for reactor start-up and operation".
- Unidad de planeación minera energética. (2003). *Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás.* UPME – Ministerio de Minas y Energía. Bogotá.
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology* 99 (2008) 7928–7940
- Piscis.(www.piscis.ind.br/piscis_produtos.php)