

**Estabilización del estiércol bovino generado en el frigorífico Fogasa SAS mediante  
digestión anaeróbica: planta piloto**

**Martin Carballo Angarita**

**Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Ingeniería Ambiental**

**Directora**

**Liliana Del Pilar Castro Molano.**

**Ph. D. en Ingeniería Química**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela Ingeniería Química**

**Maestría en Ingeniería Ambiental**

**Bucaramanga**

**2017**

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Objetivos .....	14
1.1 Objetivo General .....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico y Estado del Arte.....	14
2.1 Digestión anaeróbica.....	14
2.2 Descripción de la instalación del biodigestor .....	16
2.3 Parámetros de diseño del biodigestor .....	16
2.4 Materiales necesarios para construcción de un BDG .....	17
2.5 Producción de biogás .....	18
2.6 Usos del biogás .....	18
2.7 Producción de digerido .....	19
3. Metodología .....	20
3.1 Información del caso de estudio .....	20
3.2 Diseño e instalación del biodigestor de bajo costo .....	20
3.2.1 Disponibilidad de la materia prima.....	20
3.2.2 Materiales de construcción .....	21

3.2.3	Parámetros de diseño del BDG .....	22
3.2.4	Construcción e instalación del BDG .....	22
3.3	Monitoreo del proceso de digestión anaeróbica.....	23
3.4	Estabilización de materia orgánica .....	24
3.5	Métodos analíticos .....	24
3.6	Propuesta de implementación de BDG en la planta de beneficio Fogasa S.A .....	25
4.	Resultados .....	25
4.1	Diseño e instalación del biodigestor de bajo costo .....	25
4.1.1	Disponibilidad de la materia prima.....	25
4.1.2	Parámetros de diseño del BDG .....	26
4.2	Monitoreo del proceso de digestión anaerobia .....	29
4.2.1	Etapas hidrolítica y acidogénica .....	29
4.2.2	Etapas acetogénica y metanogénica.....	29
4.2.3	Estabilidad del proceso .....	30
4.3	Estabilización de materia orgánica .....	31
4.3.1	Degradación de materia orgánica.....	31
4.3.2	Reciclaje de nutrientes y remoción de microorganismos patógenos .....	32
4.3.3	Producción de biogás a partir de estiércol bovino en un biodigestor .....	34
4.4	Consideraciones energéticas .....	36
4.5	Impactos ambientales del BDG piloto .....	37
4.6	Propuesta de implementación .....	38
5.	Conclusiones .....	40
	Referencia Bibliográficas.....	41

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Instalación del BDG .....	23
Figura 2. Biodigestor instalado en FOGASA. ....	28
Figura 3. Monitoreo de las etapas hidrolítica y acidogénica. ....	29
Figura 4. Producción diaria de biogás.....	30
Figura 5. Estabilidad del proceso evaluada en pH. ....	31
Figura 6. Degradación de la materia en términos de SV y DQO.....	32
Figura 7. Concentraciones de nutrientes primarios (Nitrógeno, Fosforo y Potasio). ....	33
Figura 8. Reducción de microorganismos patógenos. ....	34
Figura 9. Uso del biogás .....	36

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Materiales para construcción de un BDG .....	17
Tabla 2. Caracterización fisicoquímica del EB.....	26
Tabla 3. Parámetros del BDG .....	27

Tabla 4. Eficiencia de biodigestores de bajo costo.....	35
Tabla 5. Impactos ambientales del BDG piloto.....	37
Tabla 6. Parámetros de los BDG propuestos.....	38
Tabla 7. Costos de implementación.....	39

### Nomenclatura

AGV	Ácidos grasos volátiles
ART	Azúcares reductores totales
AT	Alcalinidad total
BDG	Biodigestor de bajo costo
DA	Digestión anaeróbica
DQO	Demanda química de oxígeno soluble
EB	Estiércol bovino
GEI	Gases efecto invernadero
PEB	Producción específica de biogás
RMP	Remoción de microorganismos patógenos
SV	Sólidos volátiles
TRH	Tiempo de retención hidráulico
VCO	Volumen de carga orgánica
VPB	Velocidad de producción de biogás

## Resumen

**Título:** Estabilización del estiércol bovino generado en el frigorífico FOGASA mediante digestión anaeróbica: planta piloto\*.

**Autores:** Martín Carballo Angarita\*.

**Palabras Clave:** Estiércol, Fogasa, Biodigestor, Digerido, Biogás.

**Contenido:** El estiércol bovino producido en los corrales de las plantas de beneficio animal genera efectos negativos sobre las cinco esferas ambientales, como malos olores, gases efecto invernadero, contaminación, eutrofización de cuerpos de agua y acidificación y erosión de suelos. La estabilización de la materia orgánica presente en el estiércol bovino se ha logrado mediante la digestión anaeróbica obteniendo como producto biogás y un digerido usado como fertilizante. En el desarrollo de esta investigación se implementó un biodigestor de bajo costo para la digestión anaerobia (DA) de estiércol bovino en el frigorífico Fogasa s.a. El biodigestor piloto se diseñó e instaló para un 5,5% del estiércol. Seguidamente durante la operación del biodigestor se monitorearon el consumo de azúcares reductores totales (ART), la conversión de materia orgánica en términos de demanda química de oxígeno soluble (DQOs) y de sólidos volátiles (SV), la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), la estabilidad del proceso (pH-AT), la producción de biogás, el reciclaje de nutrientes y la remoción de patógenos. El biodigestor obtuvo una producción promedio de biogás de 0,9 m<sup>3</sup>/día, una remoción de coliformes fecales del 90%, además se proyectó que el sistema planteado alcanzaría un 1,5% del requerimiento energético de la planta equivalente a \$27'987.000 durante los 7 años de vida útil de sistema anaeróbico.

---

\* Trabajo de Aplicación

\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Ambiental  
Directora Liliana Castro Ing. Química Ph.D.

### Abstract

**Title:** Stabilization of bovine manure generated at anaerobic digestion in Frigorífico FOGASA : pilot plant.\*

**Authors:** Martín Carballo Angarita \*\*.

**Keywords:** Manure, Fogasa, Biodigester, Digested, Biogas

**Content:**

Bovine manure produced in animal Slaughterhouse generate negative effects on the five environmental, As bad odors, greenhouse gases , pollution , water Eutrophication and Acidification and erosion of soils . Regulation of organic matter present in the bovine manure, has achieved through anaerobic digestion, it gets as a biogas product and a digest that can using like fertilizer. In the development of this investigation. A digester low cost was installed for anaerobic digestion (AD) of bovine manure in the frigorífico fogosa s.a. That pilot digester was designed and installed for 5.5 % from the manure. while during operation of the biodigester consumption of total reducing sugars ( TRS) were monitored , conversion of organic matter in terms of chemical oxygen demand soluble ( COD´s) and volatic solid ( VS) the concentration of volatic fatty acids ( VFA ) , the stability of this process ( PH-AT), biogas production , nutrient recycling and remotion of pathogens. The digester obtained an average biogas production of 0.9 m<sup>3</sup>/day, one remotion of 90% fecal coliforms also it will projected that the proposed system would reach in 1.5% of the energy requirement of the plan equivalent to \$27'987.000 ,during the 7 years of useful life anaerobic.

---

\* Job Application

\*\* Faculty of Engineering Physic-chemical. School of Chemical Engineering. Master in Environmental Engineering Director Liliana Castro Chemical Engineer Ph.D.

## Introducción

La carne bovina representa fuente de proteína de alto valor biológico para la nutrición humana (Castro Cardoso Pereira & Dos Reis Baltazar Vicente, 2013). Este alimento ocupa el tercer lugar en la ingesta mundial de carne, contribuyendo con el 22% (la de mayor consumo es la de cerdo, con un 36, seguida de la carne de aves de corral con aproximadamente 35%) (FAO, 2014).

Particularmente, en Colombia para el año 2016, el sacrificio total fue en promedio 3.338.370 cabezas. (DANE, 2017). El proceso de beneficio animal consta de cuatro etapas: (a) sacrificio, (b) deshuesado, (c) procesamiento de la panza o eviscerado, (d) procesamiento y limpieza de menudencias.

Teniendo en cuenta la resolución 0240 del 31 de enero de 2013 del Ministerio de Salud y Protección Social, los frigoríficos requieren de corrales independientes de recepción, sacrificio y observación, los cuales deben estar identificados, numerados y contar con plataformas elevadas de observación. Su capacidad debe estar de acuerdo al volumen de sacrificio. Los corrales son el sitio donde se realiza la verificación del estado de los animales y descanso de los mismos antes de su sacrificio, deben contar con pisos lavables, división entre corrales de material sanitario, sin aristas salientes ni punzantes, bebederos, iluminación, desagüe y estar contruidos de tal forma que se evite las lesiones de los animales durante la movilización o estadía de los mismos (Ministerio de Salud y Protección Social, Resolución 0214 de enero de 2013).

En promedio, un animal bovino produce 7 kg de estiércol/100kg de peso del bovino (Martí Herrero, 2008). En una planta de sacrificio bovino, el peso del animal se encuentra entre 350 y 450

kilogramos. Por consiguiente, se pueden producir entre 24 y 31 kg diarios de estiércol por cada bovino. Tradicionalmente, el estiércol generado en corrales no tiene un tratamiento previo o adecuado para su disposición final, lo cual implica mantener un foco de infección latente perjudicial para las comunidades vecinas a la planta.

El manejo y disposición inadecuada del estiércol bovino, genera impactos negativos sobre las esferas ambientales: geósfera, hidrósfera y atmósfera. Con respecto a la geósfera, el suelo puede ser seriamente afectado por el contenido de microorganismos patógenos (*E. Coli*) presentes en el estiércol bovino (EB). La disposición permanente del estiércol sobre el suelo excede su capacidad de asimilación de nutrientes por las plantas, este exceso ocasiona su infiltración en aguas subterráneas (Pino, 2012), y acidificación del suelo (García *et al.*, UNAH). La disposición inadecuada del estiércol en los corrales aledaños al frigorífico además de causar limitación en el uso del suelo puede generar sanciones económicas para FOGASA.

El principal efecto del EB sobre el agua (hidrósfera) ocurre en el momento de la escorrentía, donde se genera el arrastre de alto contenido nutrientes hacia los cuerpos de aguas ocasionando la eutrofización. (Rodríguez, 2002). La composición media de nitrógeno y fósforo por cada 100 kilogramos de EB, es de 3.4 kg y 1.3 kg respectivamente. Otro riesgo para la población humana son las enfermedades causadas por el consumo de agua contaminada con: 1) estiércol conteniendo bacterias patógenas entre la más común *Escherichia Coli* que causa diarrea y gases abdominales; 2) contenidos altos de nitratos que reducen la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre, conocida como metahemoglobinemia; 3) hormonas, principalmente estrógenos relacionadas con una reducción en la cantidad de espermatozoides en humanos. (Pino, 2012).

Uno de los efectos producidos por el estiércol bovino no estabilizado a la atmósfera es la emisión de gases efecto invernadero (GEI) como el metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico

y otros gases, que causan el cambio climático global (IPCC, 2008). El metano es un GEI 23 veces más potente que el CO<sub>2</sub>, y el estiércol contribuye con 16 % de las emisiones globales (Pino Rodríguez, 2012).

La creciente preocupación medioambiental debido a los GEI ha generado un aumento en la demanda de combustibles alternativos y la invención de nuevas energías. Una alternativa para la estabilización de la materia orgánica presente en el EB, es el proceso de digestión anaeróbica (DA). La DA es un proceso microbiológico en ausencia de oxígeno, en el que la materia orgánica se transforma por acción de microorganismos en biogás y digerido.

La DA constituye una alternativa sobresaliente para el tratamiento de estiércol, con un triple efecto, reduce la materia orgánica, produce energía en forma de biogás y recicla nutrientes (N, P, K) presentes en el digerido.

Averruz *et al.*, (2015) asegura en su investigación que la DA del EB alcanza degradaciones de demanda bioquímica de oxígeno del 99.74%, contribuyendo a la remoción de contaminantes del estiércol. La mayoría de las investigaciones se realiza a escala laboratorio y a condiciones ideales. Sin embargo, las plantas de beneficio requieren solución al problema de disposición de residuos bajo las condiciones reales a escalas mayores.

Generalmente, el proceso de DA se lleva a cabo en reactores denominados biodigestores. Existen varios tipos de biodigestores que han sido aplicados a pequeña y mediana escala y que, en la actualidad, su aplicación es factible para las empresas. A continuación, se describen algunos:

a) Biodigestor de cúpula fija: se caracteriza por tener una forma cilíndrica y estar enterrado, se construye en ladrillos o bloques, y el biogás es almacenado en una cúpula fija. La cúpula de gas requiere de impermeabilizante especial y conocimiento técnico para la construcción impermeable del biodigestor. (Samayoa, *et al.*, 2012).

b) Biodigestor de Campana Flotante: este sistema es muy parecido al biodigestor tipo chino, su componente principal es una campana de acero que tiene la característica de flotar en el biodigestor, a medida que el biogás se genera ejerce presión sobre la cúpula. La cúpula de acero es relativamente costosa y requiere mucho mantenimiento. (Samayoa, *et al.*, 2012).

c) Biodigestor tubular o biodigestor de bajo costo (BDG): son conocidos también como biodigestores tipo salchicha o taiwanés, se caracteriza por ser sistemas continuos fabricados de goma, polietileno. El biodigestor tipo salchicha es sencillo y económico, pose tuberías de entrada y salida de las aguas residuales y como elemento fundamental una bolsa de polietileno que sirve de biodigestor. (Samayoa, *et al.*, 2012).

Ventajas:

- Prefabricación estandarizada se obtiene a bajo costo.
- Vida útil entre los 10 y 15 años.
- Usos sobre el nivel de tierra es factible en lugares con alto nivel de las aguas subterráneas.
- Se obtienen altas temperaturas de digestión en áreas cálidas.
- Fácil de limpiar, mantener y vaciar (Samayoa, *et al.*, 2012).

Particularmente, el desarrollo de este trabajo se enfoca en la planta de beneficio de ganado bovino y bufalino FOGASA, ubicada en el departamento de Cesar, Colombia, Este frigorífico tiene una capacidad máxima de sacrificio de 200 animales/día. Actualmente, la planta de sacrificio dispone el estiércol que recoge diariamente de los corrales en los potreros aledaños sin tratamiento previo, se deposita el estiércol sobre el suelo en pilas y se deja a la intemperie, lo que causa un impacto visual negativo al entorno natural, se genera olores desagradables por la descomposición del estiércol, presencia de vectores como moscas, zancudos y aves de rapiña y los lixiviado del estiércol en épocas de lluvia son arrastrados hacia los cuerpos agua cercanos.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad de implementar sistemas de biodigestión anaeróbica para la estabilización del 5,5% de estiércol bovino generado de los corrales de la planta de beneficio animal FOGASA SAS.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Realizar el diseño e instalación de un biodigestor e bajo costo piloto
- Monitorear la producción de biogás y la reducción de carga orgánica presente en el EB.

## 2. Marco Teórico y Estado del Arte

### 2.1 Digestión anaeróbica

La DA es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de microorganismos específicos, se descompone en biogás ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,

H<sub>2</sub>S, etc.), y en digerido, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación. (IDEA, 2007)

La DA se lleva a cabo en cuatro etapas: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis. La hidrólisis es la descomposición de sustrato orgánico en productos más pequeños que posteriormente son absorbidos y degradados por las bacterias. (Morgenroth *et al.*, 2002). En esta etapa intervienen las bacterias hidrolíticas, que producen ácido acético, compuestos mono carbonados, ácidos grasos orgánicos y otros compuestos policarbonatos. Las cadenas de carbohidratos se transforman en azúcares simples, las grasas en ácidos grasos y glicerol y las proteínas se hidrolizan hasta péptidos y aminoácidos, liberando dióxido de carbono e hidrogeno (Castro, 2012).

En la acidogénesis los productos solubles de la etapa de hidrólisis son transformados en ácidos grasos volátiles (AGV) de cadena corta y alcoholes por acción de una amplia gama de microorganismos (Angelidaki *et al.*, 2011). En la etapa de acetogénesis se sintetiza acetato por la reducción de CO<sub>2</sub> y ácidos orgánicos. En este proceso actúan microorganismos homoacetanogénicos que consumen H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, y produce acetato (Angelidaki *et al.*, 2011). Por último, en la fase de metanogénesis, el acetato, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> se transforman en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, por acción de las bacterias metanogénicas (Deppenmeier, 2002).

Es así, que la DA la caracterizan las etapas anteriormente descritas, que son consecuentes, pero de manera diferenciada durante el proceso de degradación de los residuos, en el que se encuentran microorganismos que permiten que el proceso de desintegración de la materia orgánica degradable sea más rápido. Esto implica que cada etapa presentará diferentes velocidades de reacción según la composición del sustrato y que el desarrollo estable del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores (IDEA, 2011).

## **2.2 Descripción de la instalación del biodigestor**

El manejo de los biodigestores, ha sido una herramienta útil que han utilizado algunos campesinos en países desarrollados y en los países que están en vía de desarrollo, dado que los beneficios económicos favorecen a las poblaciones que utilizan el biodigestor para producir biogás. Es por ello, que para la instalación del biodigestor se necesitan materiales que sean necesarios para su implementación, así como también se debe tener en cuenta los pasos a seguir para la instalación del mismo, algunos de ellos son: Localización de la fosa para alojar el biodigestor, dimensiones de la fosa, preparación de la bolsa para el biodigestor, colocación de la salida para el biogás (Botero & Preston, 1987)

## **2.3 Parámetros de diseño del biodigestor**

Para el caso del ganado bovino se propone y se dimensiona un biodigestor tubular, y una de las principales ventajas de este tipo de biodigestor es que no necesita ningún tipo de agitación. (Bolívar & Ramírez, 2012), los parámetros de diseño son los siguientes: Temperatura, tiempo de retención, estiércol disponible y carga diaria, volumen del digestor, volumen del líquido, volumen gaseoso, dimensiones del biodigestor, ancho del rollo y radio de manga, longitud del biodigestor, dimensiones de la zanja y equilibrio hidráulico.

## 2.4 Materiales necesarios para construcción de un BDG

Tabla 1.

*Materiales para construcción de un BDG*

<b>Materiales</b>	<b>Unidades</b>
Polietileno tubular calibre 8, perímetro 4 m	-
Tubería de PVC ½ pulgada	18 m
Tubería de PVC de 4" pulgadas	3 m
Codos PVC de 1" pulgada	2
Niples de PVC ½" pulgada	6
Tee PVC de ½ " pulgada	1
Adaptador macho PVC de ½" pulgada	1
Adaptador hembra de PVC de 1" pulgada	1
Teflón	1
Arandelas en acrílico diámetro >10 cm	2
empaques de neumático diámetro > 10 cm	2
Marcador de color oscuro	1
Frasco plástico transparente, capacidad de 3 L	1
Esponjilla	5
Frasco de pegante para PVC	1
Tapas de baldes de cuñete de pinturas	2
Lazo	6 m
Correas de neumático 5 cm de ancho x 3 m largo	8

En Colombia las plantas de sacrificio bovino, clasifican el estiércol como un residuo de subproducto del proceso, estos residuos son dispuestos en las mismas áreas de las plantas y otros son entregados a terceros para su manejo y disposición, desconociendo el tratamiento y aprovechamiento que les realizan.

Solo se han realizado estudios de diseños de biodigestores para el tratamiento del estiércol en frigoríficos, como el elaborado por (Bolívar & Ramírez, 2012), la propuesta en cuanto a los parámetros de diseño, funcionamiento y guía metodológica para la construcción de dos tipos de biodigestores, uno tipo plug flow para el tratamiento de las excretas generadas por 1.408 vacunos

y el otro, tipo CIPAV, para el caso de las excretas producidas por 1.364 porcinos en los frigoríficos Guadalupe S.A. y San Martín de Porres Ltda., Bogotá, según Bolívar y Ramírez, Para el caso de los vacunos fue propuesto un biodigestor tipo plug flow, generando aproximadamente una producción diaria de biogás de 1.801,71 m<sup>3</sup>.

## 2.5 Producción de biogás

El biogás se puede definir como una mezcla de gases combustibles y su composición depende del tipo de material orgánico utilizado para su producción. El biogás como cualquier otro combustible gaseoso, puede ser usado para fines domésticos e industriales. Diversos dispositivos son utilizados para aprovechar el biogás como estufas, lámparas, calentadores radiantes y como combustible para motores diésel o a gasolina (Olaya & Gonzales, 2009).

## 2.6 Usos del biogás

En principio el biogás puede ser utilizado en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural.

El biogás es un combustible con un alto valor calórico (de 19,6 a 25 MJ/m<sup>3</sup>). Debido a esta característica, sus aplicaciones están destinadas a la generación de energía (Samayoa, *et al.*, 2012).

Entre sus usos podemos mencionar:

- Generación de calor en calderas.
- Producción de iluminación en lámparas infrarrojas.
- Aplicación en quemadores (cocción de alimentos).

- Cogeneración de energía (pilas de combustibles).
- Como combustible en automóviles (modificando el motor).

## 2.7 Producción de digerido

El digerido es efluente del sistema, formado por una mezcla de influente estabilizado y biomasa microbiana producida durante el proceso de digestión anaerobia. Su composición depende del tipo de sistema utilizado y de la materia orgánica alimentada. Resulta un lodo que puede emplearse como mejorador de suelos debido a su alto valor fertilizante.

El digerido producido por lo general tiene un contenido en nitrógeno del 2 al 3%, de fosforo del 1 al 2%, de potasio en torno al 1%, y un 85% de materia orgánica, con un pH que se encuentra entre 6,0 y 7,5 (Avendaño, 2010). El digerido puede utilizarse para fertilizar directamente los cultivos o añadiéndolo al compostaje de otros materiales orgánicos. El digerido es una fuente ya estabilizada de desechos de origen animal a la cual si se añade orina (animal y/o humana), más nitrógeno, lo cual puede acelerar el proceso de creación de compostaje, mejorando el coeficiente carbón/ nitrógeno (C/N) del compostaje (Centre for Energy Studies, Institute of Engineering, 2001).

### 3. Metodología

#### 3.1 Información del caso de estudio

El caso de estudio es la planta de beneficio de ganado bovino y bufalino, ubicada en el departamento de Cesar, Colombia (Lat: N 8°15' 34,2'' Long W 73°36'0,41''), llamada FOGASA. Este frigorífico cuenta con 70 empleados directos y una capacidad promedio para sacrificar 200 animales/día. La planta cuenta con 20 corrales, los cuales se encuentran separados e identificados de la siguiente manera: 7 corrales de recepción, 12 corrales de beneficio y 1 corral de observación. La capacidad máxima de cada corral es de 20 animales aproximadamente, para un total de 500 animales. El piso de los corrales es de cemento, divisiones de hierro galvanizado y es lavado de manera constante para mantener el área en condiciones higiénico-sanitarias.

#### 3.2 Diseño e instalación del biodigestor de bajo costo

**3.2.1 Disponibilidad de la materia prima.** El frigorífico FOGASA recibe en promedio 200 bovinos al día para ser sacrificados, los cuales tienen un tiempo de reposo en los corrales que va de 6 a 12 horas sin suministro de alimento. Los establos tienen unas dimensiones de 7 m de ancho y 7 m de largo, para albergar máximo 20 bovinos por corral. El EB producido en el establo fue recolectado y pesado diariamente durante un mes. Los resultados indicaron una mínima producción de 430 kg/día y una máxima cantidad de 900 kg/día.

Del estiércol recolectado en los corrales se tomaron dos muestras, con una separación de 15 días la una de la otra, y se les realizó una caracterización fisicoquímica en términos de química de oxígeno (DQO), sólidos volátiles (SV), ácidos grasos volátiles, alcalinidad total (AT) y pH.

Con el fin de alimentar el biodigestor se requiere que el estiércol bovino este diluido con agua. De acuerdo a los parámetros de diseño esta dilución debe ser en una proporción 1:3 estiércol agua (Martí, 2008). Teniendo en cuenta lo anterior, se calculó un caudal diario de entrada (Q) al reactor, al cual se le denominó afluente. Posteriormente, se diseñó un reactor piloto para tratar 50 kg de estiércol equivalentes al 5,5% de la máxima producción de FOGASA.

### 3.2.2 Materiales de construcción

- Tanque de mezcla de afluente: Se diseñó un tanque en forma cilíndrica de 55 cm de radio y 94 cm de altura, que cuenta con un sobredimensionamiento del 10% sobre el caudal de afluente (Q).
- Biodigestor de bajo costo: Es construido en polietileno tubular calibre 8 de 4 m de perímetro y protección UV, y 2 tubos de 4 in para la entrada (afluente) y la salida (digerido).
- Reservorio para el almacenamiento del gas: Se construye en polietileno y con un volumen correspondiente al 50% del volumen del biodigestor.
- Accesorios: Para la salida del biogás y la tubería de conexión hacia el reservorio y la cocina se realizó con tubería de ½ pulgada. Adicionalmente, se utilizaron tiras de neumático para los amarres, tapas de plástico de 30 cm de diámetro y lazo de fique para el agitador, círculos plásticos y de neumático de 15 cm de diámetro usados como empaques en la salida del biogás y una botella de plástico de 3 L para el sistema de seguridad.

### 3.2.3 Parámetros de diseño del BDG

**Tiempo de retención hidráulico** Para determinar el TRH fue realizada la medición de la temperatura ambiente del lugar de instalación del reactor (frigorífico FOGASA) y con el valor reportado se usó la tabla de tiempo de retención hidráulico reportada en (Martí, 2008).

**Volumen Líquido** El volumen líquido es el producto de dos variables previamente conocidas (Ecuación 1)

$$V_L = TRH \cdot Q \quad \text{Ecuación 1}$$

Este volumen líquido corresponde al 75% del volumen total y el 25% restante corresponde al volumen gaseoso o campana de gas como se muestra en las ecuaciones 2 y 3 (Martí, 2008).

$$V_T = V_L / 0,75 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$V_G = V_T \cdot 0,25 \quad \text{Ecuación 3}$$

**Dimensiones del BDG** A partir del volumen total y considerando que el biodigestor es de forma cilíndrica con diámetro 1,3 (correspondiente al perímetro del rollo de polietileno escogido) se calcula la longitud (Ecuación 4)

$$L = V_T / \pi r^2 \quad \text{Ecuación 4}$$

**3.2.4 Construcción e instalación del BDG.** La instalación se realizó basada en las recomendaciones del *manual de instalación de biodigestores* de Rodríguez y Preston.

La figura 1, presenta la síntesis del proceso de instalación del BDG.



Figura 1. Instalación del BDG

### 3.3 Monitoreo del proceso de digestión anaeróbica

Durante un periodo de un mes, se tomaron muestras de afluente y efluente del BDG dos veces por semana para evaluar el proceso de DA. Las etapas hidrolítica y acidogénica fueron monitoreadas midiendo la variación de azúcares reductores totales (ART) y AGV. Las etapas acetogénica y metanogénica se valoraron por la producción de biogás, el cual se midió mediante la lectura diaria de un medidor de flujo marca Metrex® modelo G1-6, a su vez la temperatura ambiente fue medida tres veces al día mediante un termómetro de mercurio. La estabilidad del proceso, se evaluó con la relación AGV/AT y pH.

### 3.4 Estabilización de materia orgánica

La mitigación del impacto ambiental generado por el estiércol bovino fue cuantificada mediante la reducción de la DQO y de los sólidos volátiles. Estas variables fueron medidas dos veces por semana. Adicionalmente, El reciclaje de nutrientes en el digerido fue determinado por las concentraciones de nitrógeno, fosforo y potasio, que se midieron semanalmente, y la remoción de microorganismos patógenos (RMP) fue evaluada mediante el análisis microbiológico (Coliformes fecales, totales y Salmonella Spp).

La eficiencia del proceso de digestión anaeróbica y del biodigestor piloto se determinó en términos de velocidad de producción de biogás (VPB) [ $\text{m}^3_{\text{biogás}}/\text{m}^3_{\text{digestor}}\text{d}$ ] y producción específica de biogás (PEB) [ $\text{m}^3_{\text{biogás}}/\text{kgSV}$ ].

### 3.5 Métodos analíticos

Los SV fueron medidos de acuerdo con los protocolos descritos por Standard Methods (Apha *et al.*, 2005). La DQO fue medida por el método calorimétrico por Apha *et al.*, 2005. Los ART se determinaron a partir del protocolo descrito por Miller, 1959. Los AGV y la AT fueron cuantificados por titulación de acuerdo al protocolo propuesto por Jobling *et al.*, 2014. El pH fue determinado usando un pHmetro metrohm 691. Estos protocolos se llevaron a cabo en el laboratorio de Biotecnología de la Universidad Industrial de Santander. La medición de N, P, K, se realizó de acuerdo a las técnicas SM 4500-Norg B/SM 4500-NH3 B,C–Volumétrico, SM 4500-P B,E–Fotométrico, SM 3030 K/SM 3500-K B–Espectrométrico, respectivamente. La medición

de Salmonella Spp Coliformes totales y fecales, se realizaron por los métodos ISO 19250 de 2010 y SM 9221 E.

### **3.6 Propuesta de implementación de BDG en la planta de beneficio Fogasa S.A**

Esta etapa se enfocó en diseñar un sistema de biodigestión anaeróbica para la totalidad del estiércol bovino disponible en los corrales del frigorífico teniendo en cuenta la estabilización de materia orgánica obtenida en el BDG piloto. El escalado del sistema se estructuró con base en tres ejes: eficiencia del biodigestor y del proceso de DA, la cantidad de materia orgánica a estabilizar y el dimensionamiento del biodigestor. La cantidad de estiércol a estabilizar se determinó cuantificando la masa diaria durante un mes y el dimensionamiento de los biodigestores fue basado en la experiencia y en la literatura de BDG.

## **4. Resultados**

### **4.1 Diseño e instalación del bodigestor de bajo costo**

**4.1.1 Disponibilidad de la materia prima.** La tabla 2 muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica de estiércol bovino fresco.

Tabla 2.

*Caracterización fisicoquímica del EB*

Análisis	Valor	Desviación estándar	Unidades	Método Analítico
pH	7,81	0,32	-	LBC 44 Potenciometría
SV	141,6	1,17	g/kg	NTC 5167 Gravimetría
DQO	15,90	0,99	%P/P O <sub>2</sub>	LBC 24 Colorimétrico
AGV	822	229,10	mg/kg CH <sub>3</sub> COOH	Kjeldahl-Volumetría
AT	3224,50	490,02	mg/kg CaCO <sub>3</sub>	LBC 98 Volumetría

La DQO y los SV representan la materia orgánica degradable. Esta carga orgánica en términos de SV establece que el estiércol bovino disponible para estabilización es una buena fuente de carbono para la DA. La concentración de AGV del sustrato se encuentra por debajo del límite de inhibición por acidificación para reactores continuos (1500 mg/l; Søndergaard et al., 2015). La relación AGV/AT es de  $0,25 \pm 0,03$  encontrándose en el rango de estabilidad de procesos anaeróbicos entre 0,2–0,8 (Raposo, *et al.*, 2011). Finalmente, el pH se encuentra entre 6,5–8 valores en los que se obtienen mayores rendimientos de DA (Poh y Chong, 2009).

Los sólidos volátiles obtenidos son comparables con los reportados por Castro, *et al.*, (2017) para el estiércol bovino ( $132 \pm 11$  g/kg), lo que evidencia que no hay diferencia significativa entre el estiércol producido por un bovino de granja y uno que se mantiene sin alimentación previo al sacrificio (sólo consumo de agua por un tiempo mínimo de 6 horas).

**4.1.2 Parámetros de diseño del BDG.** En la tabla 3 se muestran los parámetros de diseño del biodigestor piloto de FOGASA. En la figura 2 se presenta un registro fotográfico del digestor instalado y su ubicación en el frigorífico.

Tabla 3.

*Parámetros del BDG*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>	
Masa de estiércol	kg/d	50	
Caudal de afluente (Q)	m <sup>3</sup> /d	0,2	
Temperatura de operación	°C	30 ± 2	
TRH	d	20	
Diámetro	m	1,3	
Radio	m	0,65	
Longitud	m	4	
Volumen	m <sup>3</sup>	5	
Volumen de operación (V <sub>L</sub> )	m <sup>3</sup>	4	
Volumen de gas (V <sub>G</sub> )	m <sup>3</sup>	1	
Reservorio de biogás	m <sup>3</sup>	2,5	
Dimensiones de la zanja	Ancho superior	m	1
	Ancho inferior	m	0,8
	Alto	m	1
	Largo	m	4

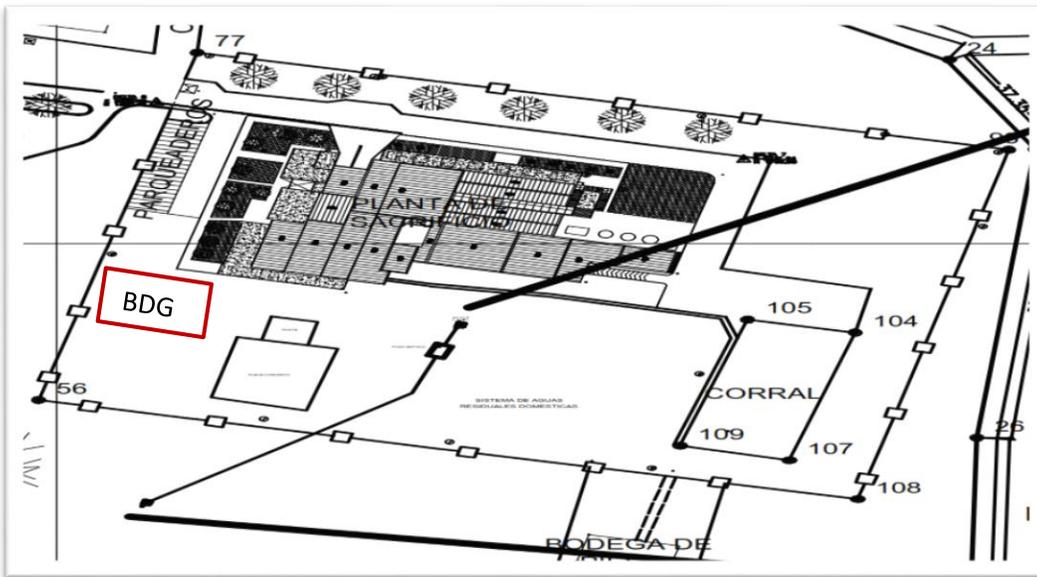
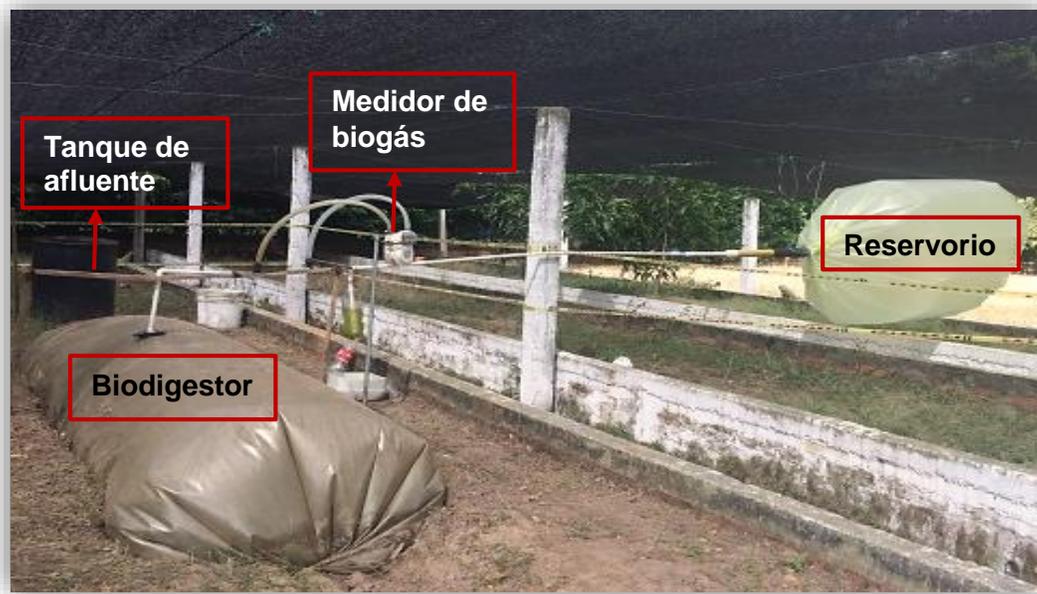


Figura 2. Biodigestor instalado en FOGASA.

## 4.2 Monitoreo del proceso de digestión anaerobia

**4.2.1 Etapas hidrolítica y acidogénica.** Los valores de ART y AGV representan la materia orgánica soluble fácil de digerir por los microorganismos. La figura 3 muestra una disminución de la concentración de ART del digerido con respecto a la concentración del afluente demostrando degradación en la etapa hidrolítica.

También se evidencia que la concentración de AGV en el afluente del biodigestor estuvo entre 960–1980±85mg/L, manteniéndose por debajo del límite de inhibición para reactores continuos (1500 mg/l; Søndergaard et al., 2015). Por lo tanto, se descarta inhibición en el biodigestor por acumulación de AGV.

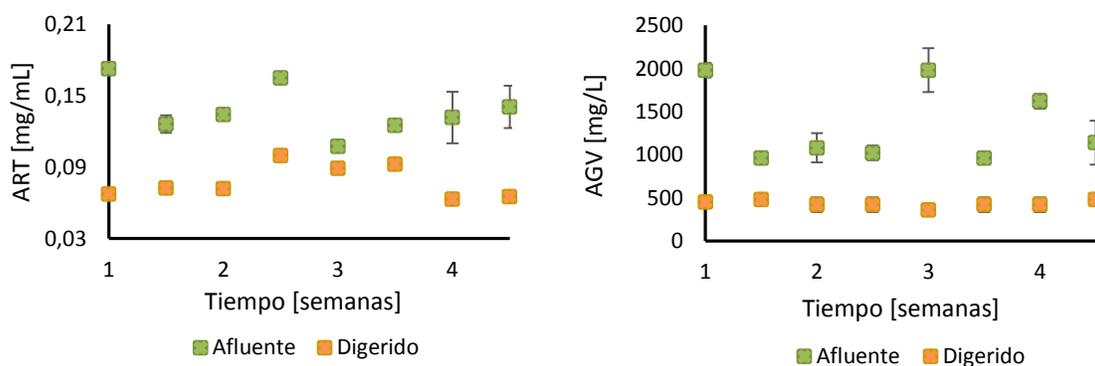


Figura 3. Monitoreo de las etapas hidrolítica y acidogénica.

**4.2.2 Etapas acetogénica y metanogénica.** En la figura 4 se muestra la producción de biogás del biodigestor piloto instalado en el frigorífico FOGASA. El comportamiento de la curva evidencia la estabilización de la producción en un promedio de 0,9 m<sup>3</sup> normalizados a presión y temperatura. En la figura se evidencia la influencia directa que existe entre la temperatura y la producción de biogás, alcanzándose aproximadamente un 7% de reducción de volumen de biogás

como respuesta a disminución de la temperatura ambiente en pocos grados centígrados (1-2°C). Uzodinma, *et al.*, (2007) reportaron bajas producciones de biogás a 25°C para diferentes mezclas de desechos, lo que atribuyen a que los microorganismos metanogénicos a temperaturas bajas no están lo suficientemente activados para tener la mejor producción de biogás. A su vez en sus resultados, el volumen de biogás producido es mayor al aumentar la temperatura, siendo el máximo a 40°C.

La producción de biogás en el proceso de digestión anaeróbica demuestra que la implementación de la tecnología favorece la reducción del daño en la capa de ozono al liberar menos metano a la atmósfera además de que elimina los malos olores que causa el estiércol bovino expuesto al ambiente.

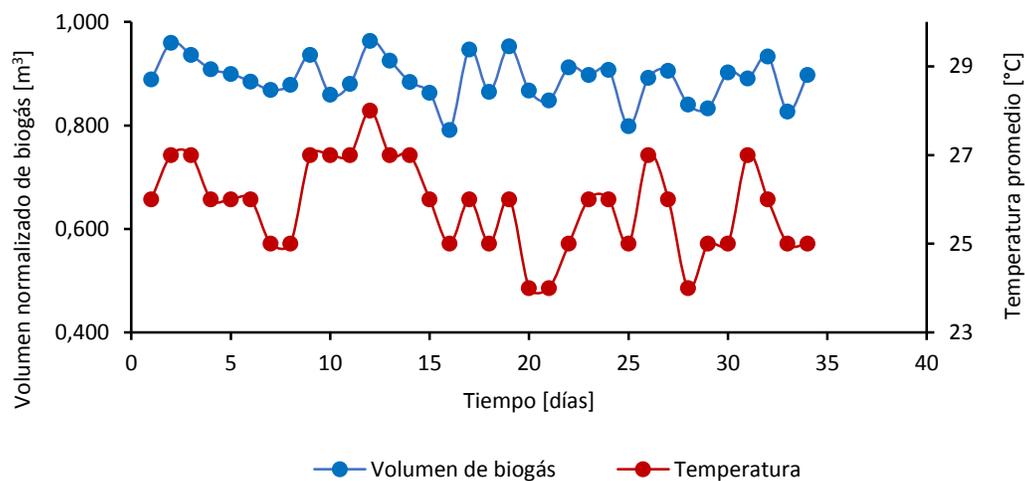


Figura 4. Producción diaria de biogás.

**4.2.3 Estabilidad del proceso.** Como se muestra en la figura 5 el pH se mantiene en el rango de 6,5 a 8, en el cual se obtiene la máxima producción y la mejor calidad de biogás en la DA (Poh y Chong, 2009). A su vez la relación de AGV y AT, conocida como la capacidad buffer del sistema

se mantiene en un rango recomendado (0,2-0,8) para que el sistema no se acidifique. De acuerdo a los resultados presentados, es posible afirmar que el digester no presenta riesgos de fallas por inhibición.

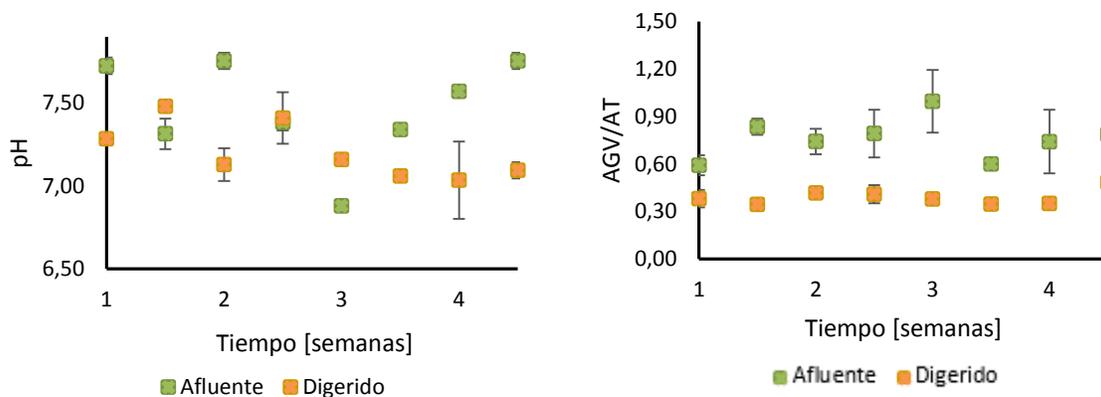


Figura 5. Estabilidad del proceso evaluada en pH.

La descarga generada por el BDG cumple con el criterio físico de pH (6,0-9,0) para uso agrícola (riego de pasto para consumo animal, cultivos para la obtención de biocombustibles, cultivos forestales de madera, jardines u otros cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos) establecidos en la resolución No. 1207 del 25 de Julio de 2014 “Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas”.

### 4.3 Estabilización de materia orgánica

**4.3.1 Degradación de materia orgánica.** La degradación de materia orgánica en términos de SV y DQO se muestra en la figura 6. El porcentaje de reducción de SV y de DQO es de 60% y de 55%, respectivamente, mostrando una conversión y estabilización de la materia orgánica que indica que el proceso de DA se llevó a cabo.

A pesar de que el BDG presenta remoción de materia orgánica este porcentaje está por debajo del reportado por Castro, *et al.*, (2017) para un biodigestor tubular de bajo costo alimentado con estiércol bovino (76% de remoción en SV). Esta baja remoción se puede atribuir a la presencia de fibra y material difícil de degradar en el estiércol bovino que requiere más tiempo de retención en el digestor.

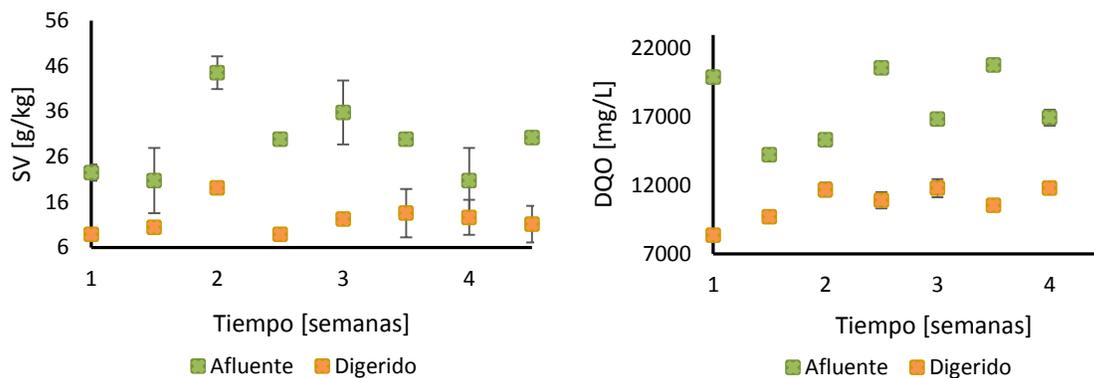


Figura 6. Degradación de la materia en términos de SV y DQO.

**4.3.2 Reciclaje de nutrientes y remoción de microorganismos patógenos.** El comportamiento de las concentraciones de nutrientes (N, P, K) tanto en el afluente como en el digerido se presentan en la figura 7. Las curvas evidencian que el digerido conserva las concentraciones de nutrientes resaltando su potencial como fertilizante. Del grupo de macronutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas, los nutrientes primarios son el nitrógeno, fósforo y potasio (FAO, 2002). La aplicación de digerido en la tierra puede mejorar calidad del suelo y está representado por el aumento de la biomasa y el contenido de N-P. Algunos estudios informan que el rendimiento de los cultivos aumenta entre 15 y 28 % con la aplicación de digerido (Möller y Müller, 2012).

En un estudio anterior realizado por Aparcana y Jansen, (2008) se reportó un digerido con alto valor fertilizante (N=2630 mg/L, P=430 mg/L, K=2660 mg/L). Estos valores comparados con este estudio, muestran que es posible aprovechar el contenido de nutrientes primarios presentes en el digerido del BDG piloto para su uso como fertilizante orgánico.

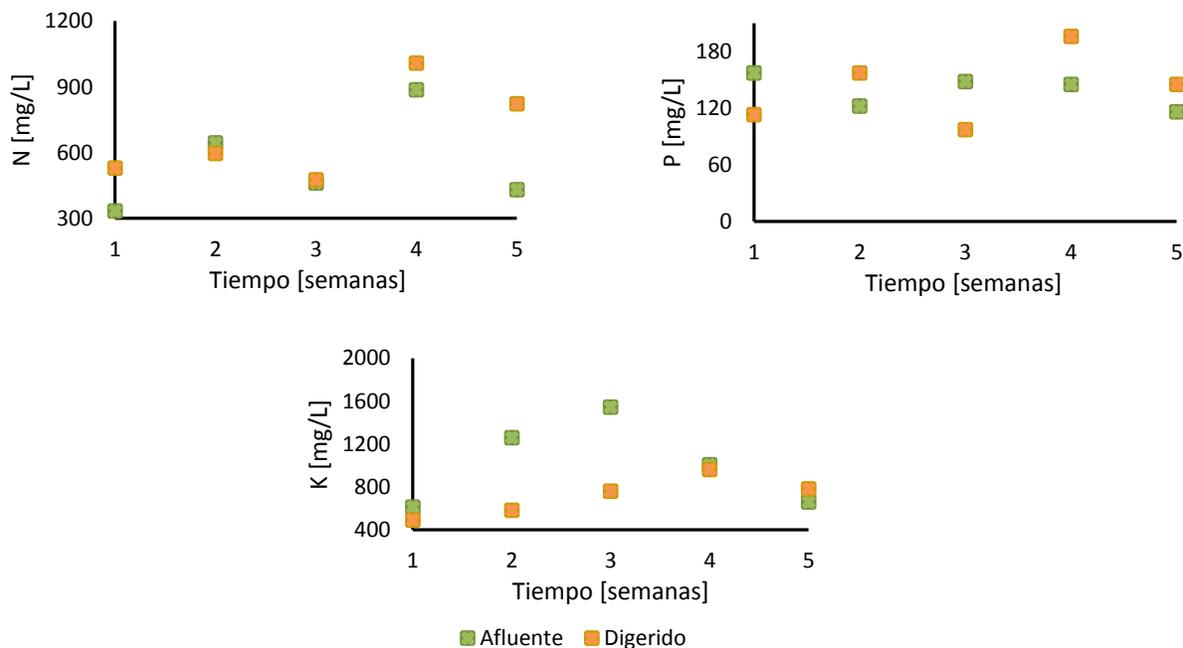


Figura 7. Concentraciones de nutrientes primarios (Nitrógeno, Fosforo y Potasio).

La figura 8 evidencia la disminución de microorganismos patógenos en el BDG. La remoción alcanzada es del 80% para Coliformes totales, y 90% para Coliformes fecales. A su vez, el análisis de Salmonella Spp, dio como resultado la ausencia de este parásito en el afluente y el digerido cumpliendo lo establecido en las reglas internacionales (US EPA, 2016).

Teniendo en cuenta, las concentraciones de Coliformes fecales ( $1,7 \times 10^6$  NMP/100mL), US EPA clasifica al digerido como clase B, que requiere una estabilización final antes de ser vertido a suelos de cultivo para consumo. La tecnología anaeróbica reduce patógenos lo que a su vez

mitiga la contaminación y evita enfermedades causadas por el consumo de agua contaminada con residuos agropecuarios como el estiércol bovino sin estabilizar.

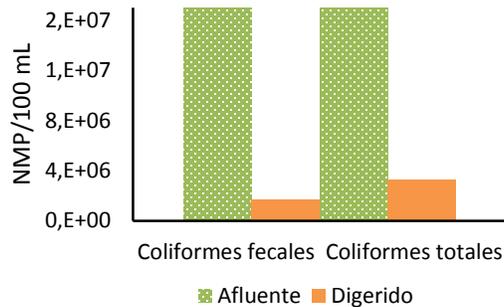


Figura 8. Reducción de microorganismos patógenos.

**4.3.3 Producción de biogás a partir de estiércol bovino en un biodigestor.** Martí, *et al.*, (2015) define la velocidad de producción de biogás y la producción específica de biogás como la eficiencia del biodigestor y del proceso de digestión anaeróbica, respectivamente. En la tabla 4, se muestran las eficiencias en diferentes biodigestores de Sur América.

Garfí *et al.* (2011) instalaron un biodigestor que alcanzó las eficiencias de  $0,11 \text{ m}^3_{\text{biogas}}/\text{m}^3_{\text{digestor}}$  y  $0,32 \text{ m}^3_{\text{biogas}}/\text{kgSV}$ . En comparación, este estudio tuvo una menor eficiencia en el proceso de digestión anaeróbica ( $0,15 \text{ m}^3_{\text{biogas}}/\text{kgSV}$ ), debido a que el TRH es menor. Martí, *et al* (2014) obtuvieron una eficiencia del biodigestor de  $0,05 \text{ m}^3_{\text{biogas}}/\text{m}^3_{\text{digestor}}$  por debajo comparada con el estudio actual, debido a las diferencias en las condiciones de operación (VCO y  $14-18^\circ\text{C}$ ). En resumen, estudios previos indican que las eficiencias, expresadas como una función de BPR y SBP, depende del diseño y control de las variables (T, TRH y VCO)

Ferrer, *et al.*, (2011) en sus estudios reportó que el biogás obtenido a partir de la DA del estiércol bovino en un biodigestor de bajo costo (26-27°C) tenía un 62% de CH<sub>4</sub>. Posteriormente, Castro, *et al.*, (2017) reportó el 65,6% de CH<sub>4</sub> en el biogás obtenido de la DA en un biodigestor tubular rural en la zona andina de Colombia (23±5°C). Basado en los datos mencionados se estima que el porcentaje de metano promedio en el biogás obtenido en este estudio (30±2°C) puede estar en un rango de 60-65%.

Tabla 4.

*Eficiencia de biodigestores de bajo costo.*

Localidad	T (°C)	TRH <sup>a</sup> (d)	VCO <sup>a</sup> (kgSV/m <sup>3</sup> digestord)	VPB <sup>a</sup> (m <sup>3</sup> biogás/ m <sup>3</sup> digestord)	PEB (m <sup>3</sup> biogás/kgSV )	%CH 4	RMP <sup>a</sup> (%)	Referencia
Colombia	30±2	20	1,46	0,23 <sup>c</sup>	0,15 <sup>c</sup>	NR*	90	Este estudio
Bolivia	14-18	124	0,24	0,05 <sup>c</sup>	0,20 <sup>c</sup>	47	NR <sup>b</sup>	Martí, 2014
Costa Rica	26-27	39	NR <sup>b</sup>	0,37 <sup>c</sup>	0,35 <sup>c</sup>	62	NR <sup>b</sup>	Ferrer, 2011
Perú	16-20	90	0,34	0,11 <sup>c</sup>	0,32 <sup>c</sup>	55	NR <sup>b</sup>	Garfí, 2011

<sup>a</sup>TRH: tiempo de retención hidráulico, VCO: velocidad de carga orgánica, VPB: velocidad de producción de biogás, RMP: remoción de microorganismos patógenos.

<sup>b</sup>No reporta

<sup>c</sup>Volumen de biogás expresado a 25°C y 1 atm.

#### 4.4 Consideraciones energéticas

La digestión anaerobia del estiércol bovino en el reactor piloto del BDG instalado en el FRIGORIFICO FOGASA SA, generó en promedio 0,9 m<sup>3</sup> de biogás, el cual fue aprovechado en la cocción de los alimentos de la cafetería de la planta.

Debido al caso de estudio presentado, no se utilizó la estufa existente en la cafetería de la planta, sino que se adaptó una estufa de gas propano. Debido a que la presión del biogás es inferior a la del gas propano se requiere aumentar el diámetro de la boquilla para el paso del gas. El biogás producido fue suficiente para cocinar durante 5 horas diarias aproximadamente en la estufa referenciada, con el biogás generado se pudo lograr cocinar tres comidas para un número de 4 personas por comida.

Según Hernández. L (1996), un biogás con un contenido de metano entre el 55 y 65%, al entrar en combustión, produce una llama azul y puede tener un poder calorífico entre 22.000 a 26.000 kJ/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, el color de la llama se puede constituir en un indicador de calidad del gas. En este caso de estudio, se observó la presencia de una llama azul durante la combustión del biogás (figura 9).



*Figura 9.* Uso del biogás

#### 4.5 Impactos ambientales del BDG piloto

En la tabla 5 se muestran los Impactos positivos y negativos en las esferas ambientales después de instalado el biodigestor piloto.

Tabla 5.

*Impactos ambientales del BDG piloto*

Esfera Ambiental	Antes del Biodigestor		Después del Biodigestor	
	Impacto Negativo	Impacto Positivo	Impacto Negativo	Impacto Positivo
<b>Atmósfera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación de GEI</li> <li>• Generación de Olores ofensivos.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de emisión de GEI.</li> <li>• Reducción de olores ofensivos.</li> </ul>
<b>Hidrosfera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación de las fuentes de agua.</li> <li>• Enfermedades por el consumo de agua contaminada.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo de agua para el cargue del biodigestor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta remoción de microorganismos patógenos.</li> <li>• Reducción de eutrofización en cuerpos de agua.</li> </ul>
<b>Geósfera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erosión</li> <li>• Sobre carga de nutrientes y limitación del suelo.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Producción de biol con nutrientes primarios.</li> <li>• Reducción de fertilizantes químicos.</li> </ul>
<b>Biosfera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proliferación de vectores (moscas, zancudos y aves de rapiña).</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción en la proliferación de vectores.</li> <li>• Estabilización de 5,5% del E.B generado.</li> </ul>
<b>Antropósfera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perturbación paisajística del entorno natural.</li> <li>• Disposición Inadecuada de estiércol</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora el paisaje.</li> <li>• Fuente de energía alternativa (biogás)</li> </ul>

#### 4.6 Propuesta de implementación

Teniendo en cuenta, la evaluación de la digestión anaeróbica a escala piloto para el frigorífico FOGASA se propone el siguiente esquema para la implementación de esta tecnología en la planta de sacrificio:

##### Cantidad de materia orgánica a estabilizar

Los resultados de la medición del estiércol disponible en los corrales del frigorífico arronjan que es requerida la instalación de un sistema de DA de bajo costo con capacidad de tratamiento de 900 kg/d de estiércol bovino.

##### Sistema de estabilización de estiércol bovino

Se propone la instalación de un sistema de biodigestión con un volumen total de 90 m<sup>3</sup>. Por motivos de seguridad y operación se recomienda la instalación de tres biodigestores en serie cada uno de 30 m<sup>3</sup>, construidos en membrana de PVC y con una vida útil del biodigestor 7 años en condiciones normales (Geomembranas S.A.S, 2017). La tabla 6 muestra los parámetros de diseño de los reactores propuestos.

Tabla 6.

*Parámetros de los BDG propuestos.*

Parámetro	Unidades	BDG 1	BDG 2	BDG 3
Masa de estiércol	kg/d	300	300	900
Temperatura de operación	°C	30±2	30±2	30±2
TRH	d	20	20	20
Diámetro	m	1,76	1,76	1,76
Radio	m	0,88	0,88	0,88
Longitud	m	12,3	12,3	12,3
Volumen de operación (V <sub>L</sub> )	m <sup>3</sup>	24	24	24
Volumen total	m <sup>3</sup>	30	30	30

### Estudio Económico

La tabla 7, muestra la estimación de costos realizada para la implementación y posterior operación del sistema de biodigestión propuesto.

Tabla 7.

*Costos de implementación*

<b>Costos de Implementación</b>	
Biodigestores de 30 m <sup>3</sup> en membrana de PVC (3)	\$6'060.000*
Tuberías y accesorios en PVC	\$350.000*
Tanques de almacenamiento de agua lluvia de 2 m <sup>3</sup> (4)	\$2'000.000*
Reservorio	\$2'020.000*
<b>Costos de Operación</b>	
Servicios públicos (Energía eléctrica, gas o agua)	\$0
<b>Total</b>	<b>\$10'430.000</b>

\*Precios actualizados de Geomembranas S.A.S y ferretería Constructor

Partiendo de que la producción diaria del reactor piloto es 0,018 m<sup>3</sup> biogás/ kg EB, la producción esperada de 900 kg de estiércol es de 486 m<sup>3</sup> biogás/mes equivalente a 1.096 kWh/mes (Martí, 2008). Teniendo en cuenta que el kWh en Aguachica, Cesar cuesta \$304 (Castro, *et al.*, 2016) el ahorro económico esperado es de \$27'987.000 durante los 7 años de vida útil de sistema de biodigestión.

El consumo eléctrico de la planta de Sacrificio FOGASA es en promedio 71.115 kWh/mes (Castro, *et al.*, 2016) lo que significa que la energía generada a partir del biogás del estiércol bovino equivale al 1,5% del requerimiento energético (eléctrico) de la planta y puede ser integrada al proceso de beneficio bovino (corte del cadáver, refrigeración, desollado, entre otros en los que se utilizan equipos eléctricos).

El digerido, es un producto secundario del proceso de digestión anaeróbica. En este estudio se obtiene una producción de 108 m<sup>3</sup> digerido/mes y como una alternativa se propone recuperar los minerales del digerido para su posterior venta. Dentro de estas alternativas se encuentra la

precipitación de fosfato de magnesio de amonio hexahidratado ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ), más conocido como Estruvita (Red española de compostaje, 2014).

## 5. Conclusiones

Se diseñó e instaló un BDG piloto con volumen de  $5 \text{ m}^3$  para el tratamiento y estabilización del 5,5% del estiércol bovino de los corrales del frigorífico FOGASA S.A.

Se llevó a cabo el monitoreo del BDG que evidenció que las etapas de la DA se llevaron a cabo de manera satisfactoria, y en términos de estabilidad el pH se mantuvo en los rangos adecuados descartando inhibición del proceso. El biodigestor piloto alcanzó una degradación de materia orgánica de 55% en términos de DQO y 60% en términos de SV, mostrando la viabilidad de implementar un sistema de biodigestión en el frigorífico que solucione el problema ambiental generado por los residuos sólidos (propagación de microorganismos patógenos, malos olores y generación de GEI).

La producción de biogás del biodigestor fue de  $0,9 \text{ m}^3/\text{d}$ , alcanzando una proyección mensual de  $486 \text{ m}^3_{\text{biogás}}$  equivalente a  $1.096 \text{ kWh}/\text{mes}$  que puede suplir el 1,5% del requerimiento energético de la planta. El ahorro económico proyectado es de  $\$27'987.000$  durante los 7 años de vida útil de sistema de biodigestión.

### Referencia Bibliográficas

- Angelidaki, I et al. (2011) Biomethanation and Its Potential. *Methods in Enzymology*. December Vol 494 pp. 327-351. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/50394424>
- Aparcana. S., Jansen. A. (2008) Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso “Fermentación Anaeróbica” para producción de biogás. German ProfEC GmbH., Alemania.
- Apha, Awwa & Wef, (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association*. Washington, D.C.
- Averruz, S., N., Cruz, R. (2015) Evaluación de la Producción de Biogás y porcentaje de descontaminación de dos Biodigestores tubulares plásticos alimentados con estiércol porcino y bovino en la Hacienda Santa Rosa UNA – Managua. Trabajo de grado. Facultad de agronomía. Departamento de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Agraria. Manga.
- Bolívar. H., Ramírez. E. (2012) Propuesta para el diseño de un biodigestor para el aprovechamiento de la materia orgánica generada en los frigoríficos de Bogotá. Trabajo de grado. Facultad tecnológica. Ingeniería de Producción.. Universidad Distrital Francisco José de Calda. Bogotá, Colombia.
- Botero. R., & Preston. T. (1987) Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización. Centro Internacional de Agricultura Tropical. pp. 353-362. Colombia.
- Castro, L. (2012) Proceso integral para la digestión anaerobia del bagazo de fique. Trabajo de investigación (Ingeniería química). Universidad Industrial de Santander Recuperado de: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7407/2/142999.pdf>
- Castro. L., Escalante. H., Jaimes. J., Diaz. L., Vecino. K., Rojas. G., Mantilla. L. (2017) Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource Technology* 239 311–317

Castro Cardoso Pereira, P. M., & Dos Reis Baltazar V., A. F. (2013) Meat nutritional composition and nutritive role in human diet. *Meat Science*. pp. 586-592.

Centre for Energy Studies, Institute of Engineering, (2001), p. 43, citado por Harrie Oppenoorth, Lavinia. Estudio sobre el biol, sus usos y resultados. Febrero 2014. pp. 10

DANE. (2017) Sacrificio de ganado –ESAG-. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-de-sacrificio-de-ganado>

Deppenmeier, U. (2002) The unique biochemistry of methanogenesis. *Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology*. Vol 71 pp. 223-283. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/11273424>

FAO e IFA (2002). Los fertilizantes y su uso. Una guía de bolsillo para los oficiales de extensión. Cuarta Edición., Roma.

Ferrer, I, *et al.* (2011) Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass Bioenergy*. May Vol 35 pp.1668–74. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/229418441>

Garfí, M *et al.* (2011) Co digestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. *Ecol Eng*. December Vol 37 pp. 2066–2670. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/230805959>

Hernandez. L. (1996) Tecnologías para el aprovechamiento del gas producido por la digestión anaeróbica de la materia orgánica. *Agron. Colomb.*, Vol 13, n° 1, pp. 76-90.

Idea. Biomasa. (2007) Digestores Anaerobios. Madrid, España.

IPCC. (2008) Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Recuperado de: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)

Jobling Purser, B. J *et al.* (2014) An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste.

- Water Environment Research*. September Vol. 61, pp. 162-170. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24911562>
- Martí, J et al. (2014) Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. *Bioresour Technol*. September Vol 167 pp.87–93. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24971949>
- Martí, Jaime. (2008) Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. *Proyecto EnDev Bolivia - Acceso a Energía*. pp. 15-28 Recuperado de: [www.bivica.org/upload/biodigestores-familiares.pdf](http://www.bivica.org/upload/biodigestores-familiares.pdf)
- Miller, G. (1959) Use of Dinitrosalicylic acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Analytical Chemistry*. March Vol. 31 pp. 456-428. Recuperado de: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60147a030>
- Morgenroth, E., Arvin, E., Vanrolleghem, P. (2002) The use of mathematical models in teaching wastewater treatment engineering. *Water Science and Technology*. Vol 5, N°6, p. 229-233.
- Möller. K., Müller. T. (2012) Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review *Engineering in Life Sciences*, vol. 12, n° 3, pp. 242-257.
- Olaya. Y., & Gonzales. L. (2009) Fundamentos para el diseño de Biodigestores. Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. Facultad de Ingeniería y Administración. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.. Palmira, Colombia.
- Pinos, J., et al. (2012) Impactos y regulación ambiental del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*. vol. 46, n° 4. Mexico.
- Poh.P, Chong. M. (2009) Development of anaerobic digestion methods for palm oil. *Bioresour Technol*. January Vol 100 pp. 1-9 Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/51430476>
- Raposo, F., Fernández-Cegrí, V., De La Rubia, M. A., Borja, R., Béline, F., Cavinato, C., & Ganesh, R. (2011) Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol 86(8), pp. 1088-1098.

Rodriguez L., Preston T. Biodigester installation manual. *University of Tropical Agriculture Foundation*. Vietnam. Recuperado de:  
<http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/Recycle/biodig/manual.htm>

Samayoa. S., Bueno. C., Viquez. J. (2012) Guía implementación de sistemas de biodigestión en ecoempresas., Honduras.

Søndergaard. M., Fotidis. I., Kovalovszki. A Y Angelidaki. (2015) Anaerobic co-digestion of agricultural byproducts with manure for enhanced biogas production. *Energy & Fuels*, vol. 29, n° 12, pp. 8088-8094.

United States Environmental Protection Agency, "EPA," (s.f.) Biosolids Recuperado de:  
<https://www.epa.gov/biosolids>.

Uzodinma. E. O. U., Ofoefule. A. U., Eze. J. E. and Onwuka. N.D. (s.f.) Optimum Mesophilic Temperature of Biogas Production from Blends of Agro-Based Wastes. *Science Alert*.