

IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR ALIMENTADO POR EXCRETAS PORCINAS
CON CO-SUSTRATO DE CAÑA DE AZÚCAR EN LA FINCA AGROPECUARIA FUNDO
BONITO EN PUERTO GAITÁN – META



DIEGO ARMANDO SANCHEZ NAVAS
SANTIAGO ANDRES AMAYA ALVAREZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2021

IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR ALIMENTADO POR EXCRETAS PORCINAS
CON CO-SUSTRATO DE CAÑA DE AZÚCAR EN LA FINCA AGROPECUARIA FUNDO
BONITO EN PUERTO GAITÁN – META.

DIEGO ARMANDO SANCHEZ NAVAS
SANTIAGO ANDRES AMAYA ALVAREZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor
PhD. Christian José Rojas Reina
Ing. Químico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2021

Autoridades Académicas

FRAY JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O.P.

Rector General

FRAY EDUARDO GONZÁLES GIL, O.P.

Vicerrector Académico General

FRAY JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Sede Villavicencio

RODRIGO GARCIA JARA, O.P

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBON

Secretaria de División Sede Villavicencio

WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota de Aceptación

WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano de Facultad

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Director Trabajo de Grado

Villavicencio, del 2021

Dedicatoria

Primeramente, a Dios por brindarnos salud y vida fundamental en mi vida, guiador de cada disposición que me ha hecho la persona que soy hoy en día; A mis Padres, Alexi Sánchez y Maryory Navas, por su apoyo, amor y confianza, por la razón principal y por ser el motor para culminar mis estudios. Para mi padre que lo considero una persona muy especial del cual siempre se preocupó y estuvo conmigo en mis errores como adolescente, desde el inicio de mi carrera y mi proyecto de grado, en el cual me brindo enseñanzas en los diferentes deberes del campo, su humildad y sencillez, los cuales me caracterizan como persona. A mi persona especial, porque a través de su amor, apoyo y respeto, me ayudado y motivado en esta etapa tan importantes en mi vida, en cada momento me ha brindado su apoyo y fuerza para continuar con la a ejecución de mis metas. Mi abuela Nicomedes Perdomo, no dejo de creer en mi capacidad de ser un Ingeniero ambiental, una confidente en todos mis pensamientos y sus oraciones para darme tanto apoyo en mi proceso de formación, a todos ellos por siempre estar conmigo en el proceso del cual me llevaron a culminar mi carrera.

Diego Sánchez N.

Agradecimientos

Agradecemos primeramente a Dios por darnos Salud y Vida por esta alegría y meta que alcanzamos, permitiéndonos a través de su fortaleza y voluntad, vivir momentos agradables y sobre pasar los momentos difíciles; a nuestras familias Amaya Álvarez y Sánchez Navas, agradecemos por el apoyo y la confianza durante el tiempo que este sueño fue construido, no hay tiempo, ni palabras para describir lo agradecidos que estamos por todos los esfuerzos que hicieron durante nuestra formación, por la motivación para no decaer de nuestra meta de la cual no nos abandonaron en los momentos difíciles, ya que esta meta fue un propósito, gracias infinitas a todos, este logro es tanto de nosotros como a ustedes.

Este trabajo se materializo gracias al trabajo en equipo en que cada participante, apporto a esfuerzo, ideas y comprensión. Por esta razón agradecemos a nuestro asesor Christian José Rojas Reina, por tomar este reto como suyo y aportamos todos sus conocimientos e ideales, por brindarnos a todo su compromiso, donde siempre estuvo presente su acompañamiento y enseñanzas en cada momento de este trabajo.

Contenido

<i>Resumen</i>	13
Abstract	14
1. Introducción	15
2. Planteamiento del problema	16
2.1 <i>Formulación entorno al problema</i>	17
3. Objetivos	18
3.1 <i>Objetivo General</i>	18
3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	18
4. Justificación	19
5. Alcance	21
6. Antecedentes	22
7. Marcos de referencia	26
7.1 <i>Marco teórico</i>	26
7.2 <i>Marco Conceptual</i>	29
7.3 <i>Marco Legal</i>	31
8. Metodología	32
8.1 <i>Fase 1. Diagnóstico del estado de las porquerizas</i>	32
8.1.1 <i>Infraestructura disponible</i>	32
8.1.2 <i>Manejo de residuos</i>	32
8.1.3 <i>Condiciones de lavado</i>	32
8.2 <i>Fase 2. Caracterización de las excretas porcinas y el co-sustrato de caña de azúcar</i>	33
8.2.1 <i>Producción diaria</i>	33
8.2.2 <i>Características fisicoquímicas</i>	33
8.2.3 <i>Caracterización de sólidos</i>	36
8.3 <i>Fase 3. Diseño de los componentes principales del biodigestor</i>	38
8.3.1 <i>Estimación de la Mezcla del agua (Ma)</i>	38
8.3.2 <i>Masa Mezcla</i>	39
8.3.4 <i>Flujo volumétrico</i>	39

8.3.5	Calculo de la cantidad de líquido en el biodigestor, la cantidad de sustrato principal necesario y volumen del reactor.	40
8.4	<i>Fase 4. Construcción y puesta en marcha del biodigestor alimentado con excretas porcinas y con co-sustrato de caña de azúcar</i>	41
8.4.1	Evaluación de la fase de arranque y operación del biodigestor	49
9.	Resultados y análisis	52
9.1	<i>Diagnóstico del estado de las porquerizas</i>	52
9.2	<i>Caracterización de las excretas porcinas y el co-sustrato de caña de azúcar</i>	53
9.3	<i>Diseño de los componentes principales del biodigestor</i>	60
9.4	<i>Construcción y puesta en marcha del biodigestor alimentado con excretas porcinas y con co-sustrato de caña de azúcar.</i>	60
10.	Conclusiones	67
11.	Recomendaciones	68
12.	Referencias bibliográficas	69
13.	Anexos	74

Lista de tablas

Tabla 1. Métodos para la determinación de parámetros físico-químicos de los sustratos.....	34
Tabla 2. Tipos de muestras de las excretas	34
Tabla 3. Determinación del estimado de excretas.	38
Tabla 4. Cuantificación de porcinos.	52
Tabla 5. Condiciones de lavado de las porquerizas	53
Tabla 6. Cuantificación de las excretas producidas a diario.....	54
Tabla 7. Solidos totales del sustrato (excretas).....	57
Tabla 8. Solidos totales volátiles del sustrato (excretas)	58
Tabla 9. Solidos totales volátiles del co- sustrato (caña de azúcar).....	59
Tabla 10. Solidos totales volátiles del co-sustrato (caña de azúcar).....	59
Tabla 11. pH del sustrato (excretas porcinas).....	80
Tabla 12. Conductividad del sustrato (excretas porcinas)	80
Tabla 13. Producción de metano del biodigestor con solo excretas	80
Tabla 14. Producción de metano del biodigestor con el co-sustrato (caña de azúcar)	81
Tabla 15. Volumen de desplazamiento del biogás.....	83

Lista de figuras

<i>Figura 1. Delimitación de la zona de estudio</i>	21
<i>Figura 2. Diagrama esquemático de reacción de la digestión anaeróbica</i>	26
<i>Figura 3. Esquema de reactor de mezcla completa.</i>	27
<i>Figura 4. Esquema de flujo pistón.</i>	28
<i>Figura 5. Esquema de sistema de laguna cubierta.</i>	29
<i>Figura 6. Co-sustrato de caña de azúcar.</i>	33
<i>Figura 7. Medición de Conductividad de excretas porcinas.</i>	35
<i>Figura 8. Medición de pH de Excretas Porcinas.</i>	35
<i>Figura 9. Determinación de sólidos totales(ST).</i>	36
<i>Figura 10. Determinación de solidos totales volátiles.</i>	36
<i>Figura 11. Determinación de sólidos totales (ST) del co-sustrato (caña de azúcar).</i>	37
<i>Figura 12. Determinación de solidos totales volátiles del co-sustrato (caña de azúcar)</i>	37
<i>Figura 13. Adaptación del terreno</i>	42
<i>Figura 14. Construcción del piso y encierro del biodigestor.</i>	42
<i>Figura 15. Instalación del flanche para el conducto del biogás.</i>	43
<i>Figura 16. Adaptación del ducto de entra y salida.</i>	44
<i>Figura 17. Adaptación del empalme del flanche con la tubería.</i>	44
<i>Figura 18. Instalación de la protección con plástico.</i>	45
<i>Figura 19. Instalación de la geo membrana.</i>	45
<i>Figura 20. Excretas porcinas para la primera carga</i>	46
<i>Figura 21. Mezcla Excretas/Agua.</i>	46
<i>Figura 22. Primera carga de la mezcla excretas/agua.</i>	47
<i>Figura 23. Instalación de la tubería del biodigestor.</i>	47
<i>Figura 24. Válvula de seguridad.</i>	48
<i>Figura 25. Trampa de ácido sulfhídrico</i>	48
<i>Figura 26. Quemador adaptado para el biogás.</i>	49
<i>Figura 27. Medición de biogás mediante desplazamiento de columna.</i>	50
<i>Figura 28. Montaje de desplazamiento de columna.</i>	50
<i>Figura 29. Medición de metano.</i>	51

Figura 30. <i>Curva de variación de pH del sustrato (excretas porcinas)</i>	55
Figura 31. <i>Curva de variación de la conductividad del sustrato (excretas porcinas)</i>	56
Figura 32. <i>Curva de variación del metano con solo sustrato vs con el co-sustrato (caña de azúcar)</i>	61
Figura 33. <i>Curva de variación del volumen de desplazamiento del biogás del reactor 1 vs reactor 2</i>	62
Figura 34. <i>Condiciones de las porquerizas antiguas</i>	63
Figura 35. <i>Condiciones de las porquerizas nuevas</i>	64
Figura 36. <i>Producción del bioabono</i>	65
Figura 37. <i>Aprovechamiento del bioabono</i>	66

Lista de anexos

Anexo A. Marco legal.....	74
Anexo B. Materiales para la construcción de un biodigestor	76
Anexo C. Diagnóstico de las condiciones del lugar	77
Anexo D. Ubicación óptica para el biodigestor	78
Anexo E. Dimensiones del biodigestor y las porquerizas.....	79

Resumen

La implementación de la biodigestión, ha tenido un crecimiento en su utilización en las zonas rurales para reducir los desechos generados por el sector agrícola del departamento del Meta, lo cual es fundamental para mitigar el impacto ambiental de los sectores productivos del país. La presente propuesta se realiza para utilizar parte de los residuos agrícolas de la Finca Fundo Bonito el Municipio de Puerto Gaitán- Meta, para la producción de biogás y producción de bioabono. Es por esto que se considera la construcción de un biodigestor alimentado por excretas porcinas con co-sustrato de caña de azúcar. La conversión de estos residuos a través de las bacterias anaerobias del biodigestor mejorará la disposición de sólidos en las actividades agrícolas de la finca, en la producción de biogás utilizado en el proceso de cocción, y por lo tanto el impacto en los combustibles fósiles y la resultante reducción de la huella de carbono de la Finca Fundo Bonito. Inicialmente se realizó una fase de diagnóstico para establecer los estándares de diseño para los principales componentes del sistema de digestión anaerobia, así como caracterización de los sustratos a usar (%ST, %SV, pH, conductividad); posteriormente se construyó un biodigestor alimentado con excretas porcinas y caña de azúcar como co-sustrato para el beneficio propio de la finca Fundo Bonito en el Municipio de Puerto Gaitán, a su vez se determinó la calidad del biogás producido. El cual se encuentra en alrededor del 45 % de CH₄.

Palabras clave: Biogás, Anaerobio, Bioabono, Biodigestión Anaerobia

Abstract

The implementation of the biodigester has had a growth in its use in rural areas to reduce the waste generated by the agricultural sector of the department of Meta, it is fundamental for the impact of the productive sectors of the country. This proposal is made to use part of the agricultural residues of the Fundo Bonito Farm in the Municipality of Puerto Gaitán-Meta, for the production of biogas and biofertilizer. This is why the construction of a biodigester fed by pig excreta with sugarcane co-substrate is considered. The conversion of these residues through the anaerobic bacteria of the biodigester will improve the disposal of solids in the agricultural activities of the farm, in the production of biogas used in the cooking process, and therefore the impact on fossil fuels and the Result of the reduction of the carbon footprint of Finca Fundo Bonito. Initially, a diagnostic phase will be carried out to establish the design standards for the main components of the anaerobic digestion system, as well as the characterization of the substrates to be used (%ST, %SV, pH, conductivity); Subsequently, a biodigester fed with pig excreta and sugarcane as a co-substrate will be built for the benefit of the Fundo Bonito farm in the Municipality of Puerto Gaitán, in turn, the efficiency of the Biodigester will be determined.

Keywords: Biogas, Anaerobic, Biofertilizer, Anaerobic Biodigestion

1. Introducción

Uno de los mecanismos de tratamiento de los residuos orgánicos producidos por la industria agropecuaria es a través de un biodigestor, en el que se fermentan los residuos orgánicos para producir biogás y otros componentes que ayudan significativamente a reducir el deterioro de los factores ambientales, y la plena reutilización del metano (Pineda et al., 2016). Esta tecnología se está implementando en Argentina, Chile, Perú, México y otros países. Países que tienen una visión clara para usar su propia energía y que sea energía natural (FAO et al., 2011).

En el caso de la producción de residuos es una forma importante de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al medio ambiente y ayuda a reducir la utilización de combustibles fósiles (Acosta & Pasqualino, 2014). Por tanto, cuando el excremento de cerdo se introduzca en un digestor biológico, representará una opción con importantes ventajas a pequeña, mediana y gran escala, con un adecuado tratamiento de residuos orgánicos y mecanismos de disposición final (Magaña et al., 2012).

El objetivo del presente trabajo es mejorar la auto sostenibilidad de la finca agropecuaria Fundo Bonito a través del aprovechamiento de las excretas de cerdo producidas por medio de un biodigestor, de esta forma se genera energía, y se reduce la Huella de Carbono. En el caso particular de este estudio se analizaron las propiedades fisicoquímicas de los excrementos de cerdo de la finca Fundo Bonito, y en base a la operación de la finca y particularidades locales establecer los parámetros de diseño y operación del biodigestor para producir biogás.

El biogás producido se almacena y se utiliza como combustible para la cocción de alimentos mediante un sistema de tubería que transporta el gas desde el biodigestor a la cocina. El bioabono resultante se utiliza para los cultivos propios de la finca para contribuir con el rendimiento de las cosechas, por otro lado, puede ser comercializado como fertilizante natural a los campesinos de la zona.

2. Planteamiento del problema

El fenómeno de la sobrepoblación a nivel mundial es uno de los problemas que perjudican el medio ambiente en el siglo XXI, siendo una de sus consecuencias más graves el calentamiento global, el cual ha ocasionado que desde los últimos 70 años la temperatura media del planeta haya aumentado 1 grado Celsius (Torres et al., 2017). Esto producto de los gases de efecto invernadero: el Dióxido de carbono (CO_2), el vapor de agua (H_2O), el ozono (O_3), el óxido nitroso (N_2O) y el metano (CH_4). Las altas concentraciones de estos gases de efecto invernadero acumuladas en la atmósfera, absorben la radiación del sol reteniendo el calor, provocando que la temperatura aumente dando lugar al cambio climático (Albarracín, 2013).

El sector agropecuario a nivel mundial es uno de los que genera más gases de efecto invernadero y por consiguiente aumentan al calentamiento global (Torres et al., 2017). La producción porcina ocasiona afectaciones al recurso suelo, agua y aire por los diferentes residuos que se generan (excretas y orina), siendo unos de los problemas más evidentes en Latinoamérica por el inadecuado tratamiento de estos residuos, sin considerar que se desperdicia su potencial energético (Estrada et al., 2014). Dentro de las energías alternativas consolidadas en la actualidad se encuentran la energía solar, energía eólica, energía hidroeléctrica, energía geotérmica, biomasa, y entre estas últimas la producción de biogás a partir de biomasa orgánica, permiten disminuir los gases de efecto invernadero y el aprovechamiento de los residuos (excretas). La digestión anaerobia es una opción para el aprovechamiento de residuos orgánicos que pueden ser descompuestos para generar biogás (Energía de biomasa), realizando una valorización energética de este tipo de residuos orgánicos en zonas rurales y sustituyendo a los combustibles fósiles en la matriz energética (Arango, 2012).

El difícil acceso a zonas rurales del país y la falta de un combustible económico, genera que los habitantes de estas zonas se vean obligados a la quema de madera para realizar tanto la cocción de los alimentos como medio para desarrollar sus actividades económicas, al ser el combustible más accesible. Es por esta razón que el desarrollo de este biocombustible tienen un gran potencial en las zonas agrícolas de Colombia debido a su abundancia en desechos agrícolas (Alonso-Estrada et al., 2014).

Un ejemplo de esta problemática es la finca agropecuaria Fundo Bonito, localizada en el área del municipio Puerto Gaitán-Meta. Debido a que en esta finca se tienen en promedio 40 a 60 animales en ciclo de producción, la cantidad de excretas porcinas que se generan a diario en la finca presenta un problema ambiental evidente en esta, ya que no existe ningún aprovechamiento o manejo de las excretas generadas de la actividad porcina, al no dársele ningún tratamiento hay una afectación ambiental en el subsuelo ya que cuando se realiza la limpieza de las porquerizas, estos residuos son evacuados por medio de un canal para ser vertidos a un cultivo de plátano, desaprovechando su potencial energético.

Este recurso se puede aprovechar para la generación de biocombustible (biogás) mediante un proceso anaerobio como el que ocurre en un biodigestor (Lara et al., 2009). Este proceso no solo produce el biogás sino también subproductos para la producción de compostaje y fertilizantes naturales que regresan a la naturaleza con funciones restauradoras de suelos debido a su carga de microorganismos, los cuales enriquecen la flora del suelo y la absorción de micronutrientes. De esta forma se puede obtener una actividad agropecuaria dentro de los parámetros del desarrollo sostenible y la mitigación del cambio climático (Osejos et al., 2018).

2.1 Formulación entorno al problema

¿Cuál sería el beneficio de implementar un co-sustrato como la caña de azúcar en un biodigestor alimentado con excretas en la finca Fundo Bonito en el municipio de Puerto Gaitán-Meta?

3. Objetivos

3.1 *Objetivo General*

Implementar un biodigestor alimentado con excretas porcinas con co-sustrato de caña de azúcar en la finca agropecuaria Fundo Bonito en el Municipio de Puerto Gaitán-Meta.

3.2 *Objetivos Específicos*

- Realizar el diagnóstico de la producción “cantidad” y calidad “caracterizar” del sustrato y co-sustrato para establecer los criterios de diseño para los componentes principales para el Biodigestor.
- Construir un biodigestor de tipo tubular alimentado con excretas porcinas y caña de azúcar como co-sustrato.
- Evaluar la fase de arranque y operación del biodigestor.

4. Justificación

El departamento del Meta al ser una zona agrícola, genera una gran cantidad de residuos agropecuarios, los cuales pueden ser utilizados en la generación de energía a partir de la conversión de energía en forma de biogás, constituido de CO_2 y CH_4 , este último con un poder calorífico similar al del gas natural; Para obtener los beneficios del metano, que es el gas que realmente proporciona un potencial energético al biogás, se requiere un proceso inicial, que consiste en almacenar el estiércol en un digestor biológico, luego mezclarlo con agua y producir un proceso de fermentación anaerobia para producir biogás (Durazno, 2018). Este biogás dependiendo del uso final puede requerir un sistema de compresión para la producción y combustión de biogás, en caso de que se quiere aprovechar en la producción de electricidad, igualmente puede ser filtrado y comprimido por completo, pudiendo ser utilizado en la industria, almacenado en cilindros, redes de combustible y gas (Estrada et al., 2014).

Tampoco se debe obviar el impacto que se genera al subsuelo por la falta de tratamiento de estos residuos (excretas porcinas) que se generan en la finca Fundo Bonito. Es por ello por lo que se realizará el diseño de un biodigestor para el aprovechamiento del estiércol de porcinos como materia prima para la producción de biogás y adecuado manejo de las excretas. Al no existir actualmente un aprovechamiento de estos residuos como insumo energético, esto aportara en mayor sostenibilidad de la actividad agropecuaria actual en la finca (Acosta & Pasqualino, 2014). La implementación de este biodigestor se beneficia entre 6 a 12 personas, especialmente todos los días se benefician los encargados de la finca y por otro lado los dueños y familiares se benefician esporádicamente.

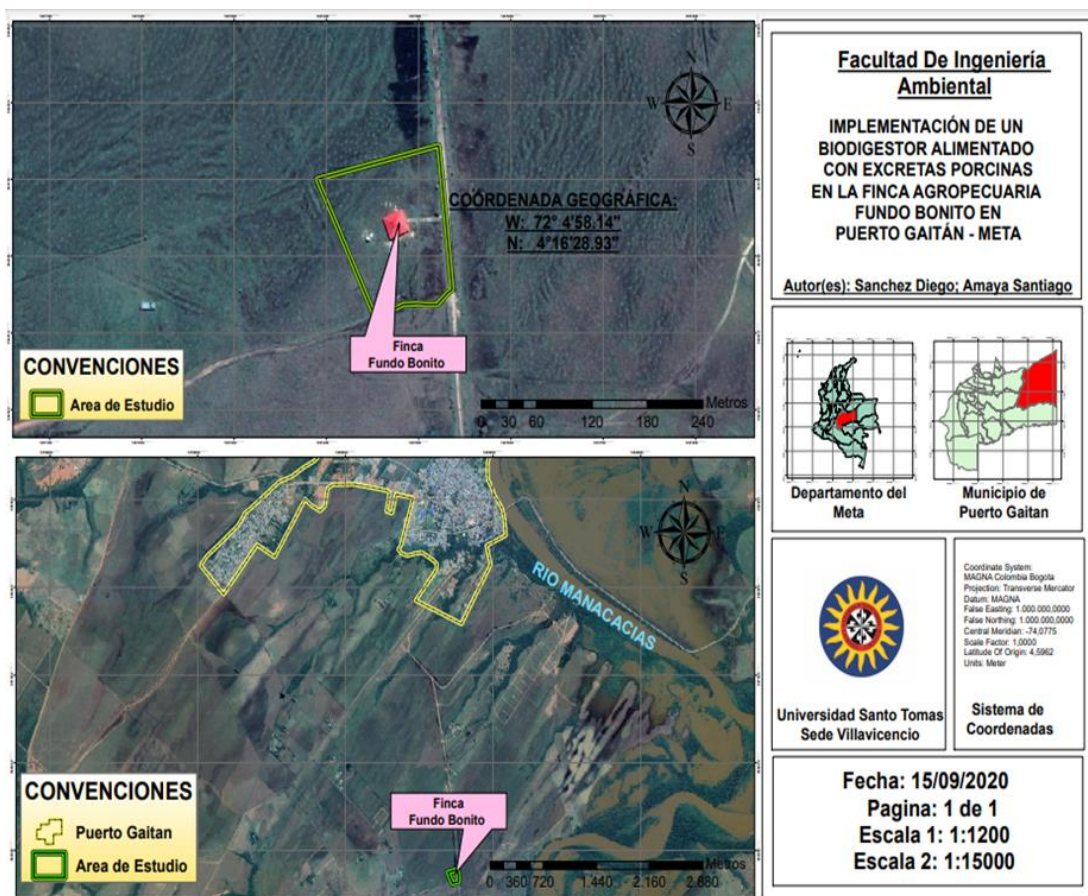
Debido a la creciente importancia del uso sostenible de los recursos naturales en los sistemas agrícolas, hoy en día, especialmente debido a su potencial aplicación en la recuperación de nutrientes de las plantas, las personas reconocen el papel de la digestión biológica. Esto puede ayudar a reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos y facilitar la agricultura orgánica (Marti, 2019). Una de las características más importantes de la biodigestión es que disminuye el potencial contaminante de los excrementos de origen animal y humano, disminuyendo la Demanda Química de Oxígeno DQO y la Demanda Biológica de Oxígeno DBO hasta en un 90% (dependiendo de las

condiciones de diseño y operación); el biodigestor tipo tubular o salchicha es un sistema sencillo implementado en países subdesarrollados, estos modelos de biodigestores familiares son contruidos con materiales de bajo costo, ha sido introducido en comunidades rurales remotas para resolver problemas energéticos y ambientales y gestionar adecuadamente los desechos humanos y ganaderos obteniendo doble beneficio (Acosta & Pasqualino, 2014).

5. Alcance

El presente proyecto se desarrolló en el predio Fundo Bonito en el Municipio de Puerto Gaitán, Departamento del Meta, el cual se encuentra ubicado en el Km 7 vía Vereda las Villas en las coordenadas $4^{\circ}16'28.06''N$ y $72^{\circ}4'58.25''O$ y cuenta con una extensión de 1 Hectárea. Allí, se implementó un biodigestor con co-sustrato de caña de azúcar alimentado con excretas porcinas. La zona de estudio mantiene una temperatura atmosférica promedio anual que varía entre $24^{\circ}C$ y $30^{\circ}C$. Las características anteriores determinan que el área se encuentre dentro del bosque húmedo tropical en el municipio de Puerto Gaitán, Meta; los registros del IDEAM indican que los meses menos lluviosos son en diciembre, enero, febrero y marzo y la mayor precipitación se registra entre abril y noviembre (IDEAM, 2018).

Figura 1. Delimitación de la zona de estudio



6. Antecedentes

A nivel global la primera mención de biogás y digestores se remonta a 1600, cuando varios científicos los identificaron como gas proveniente de la descomposición de materia orgánica (Albarracín, 2013). El primer digestor biológico a gran escala se construyó en la India en 1890, el cual fomentó la producción de biogás y bioabono, a causa de las necesidades energéticas de los agricultores, para ser utilizados como calefacción en invierno. Eran adecuados para los hogares de las zonas rurales y se alimentaban con estiércol y desechos vegetales (Ávila, 2016). Durante los años de la Segunda Guerra Mundial, los biodigestores comenzaron a extenderse a nivel rural en Europa, así como en China e India, que se convirtieron en líderes en este campo. Uno de los países líderes en esta tecnología es Alemania, con miles de biodigestor operando nivel rural e industrial (Lara et al., 2009).

Las ciencias aplicadas de digestión anaerobia a escala industrial para la creación de biogás se han extendido en países desarrollados, principalmente en Europa, en donde la legislación propicia proyectos para la producción de biogás, principalmente en el sector rural, usando biodigestores de gran tamaño (tipo industrial) (Arango, 2012). En cuanto a su implementación desde la escala rural China e India son los países más desarrollados con esta tecnología, ya que comenzaron con su implementación en la década del 50 del siglo XX. En China se construyeron cinco millones de unidades modernas en el año 2010, consiguiendo un total de 40 millones de biodigestores. En India, se construyeron cuatro millones de biodigestores en el 2011, con el Programa Nacional para la gestión de Biogás y Fertilizantes (Acosta & Pasqualino, 2014).

En Tanzania hacia el año 1999 se realizó un proyecto de investigación donde se instalaron 46 biodigestores, el gas producido se generó con una composición adecuada y de baja presión, se observó que los biodigestores son frágiles hasta cierto punto y existe la necesidad de protegerlos contra la degradación y la luz solar para aumentar su vida útil; También se observó que la introducción de biogás ahorró un promedio de 5 horas diarias de las labores domésticas; con base en los precios relativos de las materias primas y el carbón vegetal, se estima que el costo de inversión se puede recuperar en un plazo de 9 a 18 meses. Además, el uso de biogás de bajo costo reduce la tala de árboles de alto valor, protegiendo así el medio ambiente (Rutamu, 1999).

Este mismo año en Sudáfrica, el departamento de ingeniería mecánica de la universidad de KwaZulu-Natal realizó un estudio del uso de un combustible sólido para la producción de biogás en un biodigestor, se observó que la producción mínima de biogás en los primeros tres días se debió principalmente al lento crecimiento microbiano; hubo un aumento sustancial en la producción de biogás desde el noveno día, el aumento en la producción de biogás se debió al crecimiento exponencial de la actividad microbiana en el digestor, el pH incontrolado en el digestor aumentará la concentración de nitrato de amonio. El nitrato de amonio inhibe el proceso de producción de biogás (Soliu & Onunka, 2019).

A partir del año 2000 ocurrió un crecimiento exponencial de la tecnología de los biodigestores, debido a los objetivos de desarrollo sostenible milenio y la evidencia del cambio climático que empezó a impulsar el uso de energías alternativas (PNUD, 2016). En Latinoamérica a pesar de que la tecnología es conocida desde los años 80, es a partir del siglo XXI que ha tenido un mayor impulso, por ejemplo, en el año 2010, en Brasil se desarrolló un estudio donde se evaluó la viabilidad de un proceso secuencial que combinaba un tanque de digestión biológica y un tanque de estabilización, el cual se conectaba en secuencia a los lodos de la unidad de tratamiento de purines de cerdo. Este sistema muestra la efectividad de remoción de materia orgánica, pero presenta algunas limitaciones en la remoción de nutrientes (especialmente nitrógeno), lo cual se debe principalmente al efecto de volatilización del amoníaco (Vivan et al., 2010).

Dos años después también en Brasil, la Universidad José do Rosario Vellano llevó a cabo un estudio tiene como objetivo evaluar la calidad de producción de biogás y biofertilizantes producidos a partir de materiales indigestibles proporcionados por estiércol de cerdo alimentado con dietas formuladas a base de maíz o sorgo durante las etapas inicial, de crecimiento y de finalización, donde se utilizaron veinte biodigestores de sobremesa con un tiempo de retención hidráulica de 30 días, y la carga diaria contenía de 4% a 6% del contenido total de sólidos (TS) y de 3,6% a 5,2% del contenido de sólidos volátiles (VS). Se observó una alta producción promedio de biogás y el mayor potencial promedio de producción de biogás en biodigestores alimentados con estiércol animal durante las fases iniciales y de crecimiento de las dietas a base de maíz (Miranda et al., 2012).

En 2018 en Colombia la Universidad de Santander evaluó la eficiencia de los residuos sólidos orgánicos para generar biogás, durante un proceso de digestión anaeróbica con control de pH

diario, para ello se ajustó el valor de pH agregando hidróxido de sodio (NaOH), manteniendo su rango entre 6 y 8 para permitir condiciones de neutralidad y facilitar el proceso de digestión anaeróbica; En este estudio, el uso de desechos sólidos orgánicos puede eliminar el 90% de los desechos sólidos volátiles; con base en los resultados obtenidos, es posible analizar los factores que pueden afectar la producción de biogás (Sierra et al., 2013). Lo primero y más importante es el tiempo de retención de la etapa de hidrólisis, es propicio para la formación de monómero CH_4 y acetil detritus metano por bacterias acetogénicas. Las arqueas genéticas no tienen tiempo suficiente para consumir H_2 ; otro factor que puede afectar los resultados es el agua residual utilizada, que tiene un alto contenido de aceite, lo que inhibe la formación de CH_4 y facilita la formación de H_2S y CO_2 , esto también muestra que para mantener la buena eficiencia de la producción de biogás (especialmente CH_4), las aguas residuales deben contener suficientes sustancias para satisfacer las necesidades de los microorganismos anaerobios (Carreño et al., 2018).

Un año después en Colombia se realizó un estudio sobre el uso alternativo de materia vegetal para la obtención de biocombustible en Ocaña. Esta investigación se basó en la digestión anaeróbica de biomasa lignocelulosa a partir de especies vegetales de la región del Catatumbo. Se evaluaron las posibles materias primas en la zona, se determinaron las condiciones de operación y se estimó la producción de biogás (Valdes Solano et al., 2019).

En el departamento del Santander se realizó un estudio de un biodigestor a partir del aprovechamiento del bagazo de la caña panalanera y boñiga de caballo para la generación de biogás en un trapiche ubicado en Guavata, Santander; se realizó un diagnóstico de la situación actual energética y de biomasa en cual se identificó que existe 183.81 kg de bagazo disponible, si como 76.56 kg de estiércol disponible fuente potencial de energía transformada en el biodigestor, de acuerdo con la caracterización de la finca bajo estudio con respecto a las variables ecológicas, sociales y económicas, se estimó una producción de biogás de 31,389 m³/ mes a partir de 0,687 m³/ mes de bagazo y 10,45 m³/ mes de boñiga de caballo, la cual es suficiente para suplir con la demanda de consumo energético (gas) de esta forma, se considera viable el diseño propuesto en esta investigación.

En el departamento del Meta también se han desarrollado investigaciones relacionadas al uso de la gran cantidad de residuos orgánicos producto de la intensa actividad agrícola. Aunque la tecnología de los biodigestores rurales es conocida desde hace mucho tiempo, el desconocimiento

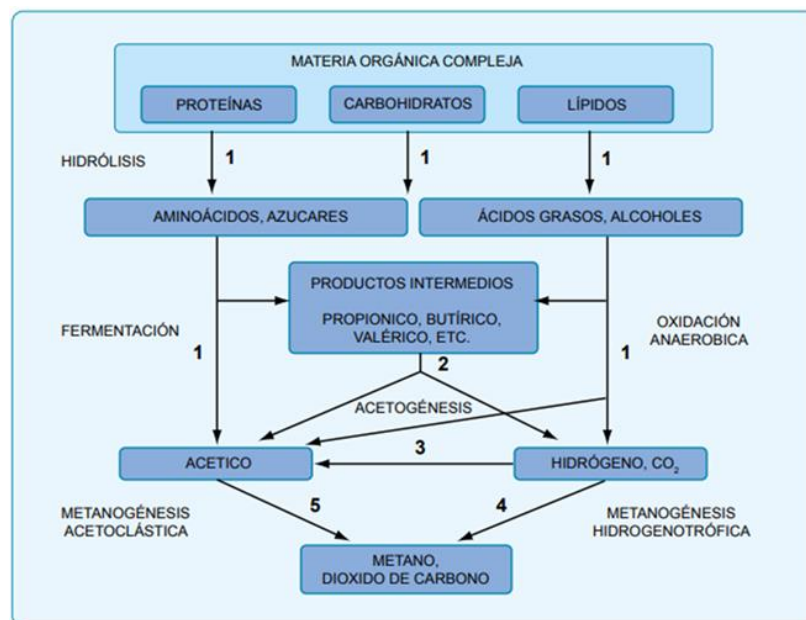
de su operación y ventajas han impedido una mejor penetración de esta tecnología. Sin embargo, se ha visto un incremento del uso de los mismos como indican estudios de la Universidad de Los Llanos(Zárate & Rodríguez, 2021). Igualmente, la Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio tiene experiencia en la investigación de los sustratos que se usan o podrían usar en la región para la producción de biogás. Entre ellos se ha analizado las excretas porcinas (Vaquerano-Pineda et al., 2016) (Rojas et al, 2020b; Huertas et al, 2021), la cascarilla de arroz (Rojas et al., 2020a) y los residuos de plátanos (Ramírez et al.,2021). Estos estudios han determinado que las condiciones regionales son aptas para la producción de biogás, sin embargo, es necesaria la investigación de los diferentes co-sustratos para aprovechar otros desechos agrícolas para aumentar la producción de biogás.

7. Marcos de referencia

7.1 Marco teórico

La digestión anaeróbica es un proceso natural en el que las comunidades microbianas crean una fermentación estable y autor reguladora que convierte los residuos orgánicos en una mezcla de gases con una proporción más alta de metano a dióxido de carbono (Enríquez & Jurado, 2016). El residuo (sustrato) a procesar será un contribuyente de carbono y energía en el proceso biológico (ver figura 2) Generalmente, independientemente de las propiedades del sustrato, toda la degradación anaeróbica ocurrirá en la misma etapa: hidrólisis, producción de ácido, producción de ácido acético y producción de metano (Severiche & Acevedo, 2013).

Figura 2. Diagrama esquemático de reacción de la digestión anaeróbica



Nota. Adaptado de (Rutamu, 1999)

Este proceso biológico tiene lugar en un digestor donde interactúan el sustrato y el inóculo, este último es la biomasa que aporta los microorganismos anaerobios que se encargan de digerir el sustrato en las diferentes etapas del proceso anaerobio, dependiendo de los microorganismos y su actividad se puede producir una mayor proporción de metano en el biogás (Esposito et al., 2012)

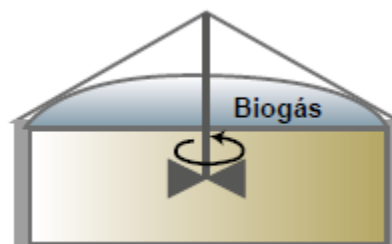
Las poblaciones bacterianas que realizan la digestión anaeróbica son diversas, incluso dentro de cada etapa, cualquier cambio lleva tiempo, Es decir, si cambiamos alimentar un biodigestor lleno de estiércol de bovino, y luego alimentar con estiércol mixto (bovino y porcino), las poblaciones cambiarán y se consolidará después de tres o cuatro meses en adaptarse. Generando compuestos intermedios Inhibidores y condiciones físicas que ocurrieron en el tanque de digestión en ese momento, esto significa que la velocidad de reacción depende de la composición del sustrato en cada etapa, y para que el proceso se desarrolle por completo, se debe mantener un equilibrio para evitar la acumulación de inhibidores y mantener las condiciones físicas para promover su crecimiento y progreso (Zárate & Rodríguez, 2021)

Biodigestor de mezcla completa

Este tipo biodigestores son empleados en la agroindustria para el aprovechamiento de los residuos orgánicos. Suelen ser depósitos circulares de acero o concreto, en los que se mezclan los sustratos de forma regular y no violenta mediante una mezcladora. Se usa para sustratos sólidos, como lodos y aguas residuales con alta materia orgánica (López-Pérez, 2010). Una característica que define a este tipo de biodigestor es que la carga que se agrega periódicamente se mezcla casi por completo con el contenido ya presente en la cámara de digestión. Como resultado, partes de sustancias no biodegradables fluyen fuera de las aguas residuales, por lo que no se puede garantizar la eliminación completa de agentes patógenos en animales y plantas (Zúñiga, 2007).

El modelo chino es una estructura cerrada de concreto o ladrillo y tiene una vida útil de unos 15 años. Dispone de cámaras de carga y descarga. Necesita un medidor de gas para contener la cantidad de gas producido. El modelo hindú tiene una campana que sube y baja dependiendo de la cantidad de gas producido. Su principal ventaja es que no requiere un gasómetro porque el gas mantiene una presión relativamente constante en su interior (Forget, 2011)

Figura 3. Esquema de reactor de mezcla completa.



Nota. Adaptado de (MINENERGIA, 2012)

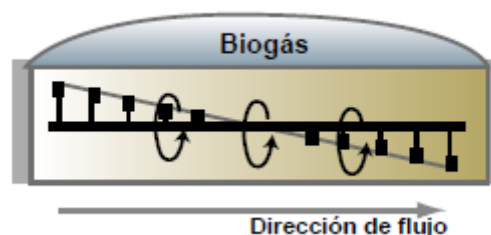
El tipo de biodigestor que se utilizó en este trabajo de grado es el tipo salchicha, por lo tanto se realizó un seguimiento con los diferentes tipos de elementos que se visualizan en el biodigestor flujo pistón, por lo que lleva una válvula de seguridad, trampa de ácido sulfhídrico, tanque de entrada, tanque de salida, tuberías, geomembrana, este tipo de biodigestor los sustratos que entran en el biodigestor son empujados en forma de pistones, y en la cámara de entrada es por medio de que se va cargando el biodigestor, y el biol sale por sí mismo a través de la cámara de salida, este biodigestor es de bajo costo con una gran bolsa tubular de cual tiene una vida útil de 5 a 8 años, depende del tipo de polietileno que se utiliza para el biodigestor su fácil instalación en los diferentes tipos de terrenos que se ven en las fincas por lo que su mantenimiento es más manejable por el tipo de polietileno que se utiliza.

Biodigestor de Flujo Pistón

Los biodigestores de flujo pistón se utilizan para sustratos de contenido sólido, como estiércol de cerdo y vaca, residuos agroindustriales con alto contenido de fibra y la materia orgánica de los residuos sólidos domésticos. Suelen ser tanques horizontales de concreto con doble capa o simples cubiertas de geomembrana para almacenar biogás. Se nombran flujos de pistón porque los sustratos entrantes son empujados en forma de pistones o tapones por los sustratos que ingresan más tarde (Martínez, 2003).

Modelo horizontal con cámaras de carga y descarga en el extremo. Su diseño impide que la carga inicial se mezcle con el efluente. Por tanto, se utiliza para residuos que requieren un tratamiento a largo plazo, como los restos de sacrificio de animales. Modelo horizontal de bajo costo con una gran bolsa tubular de polietileno con una vida útil aproximada de cinco años (Herrero, 2006).

Figura 4. Esquema de flujo pistón.



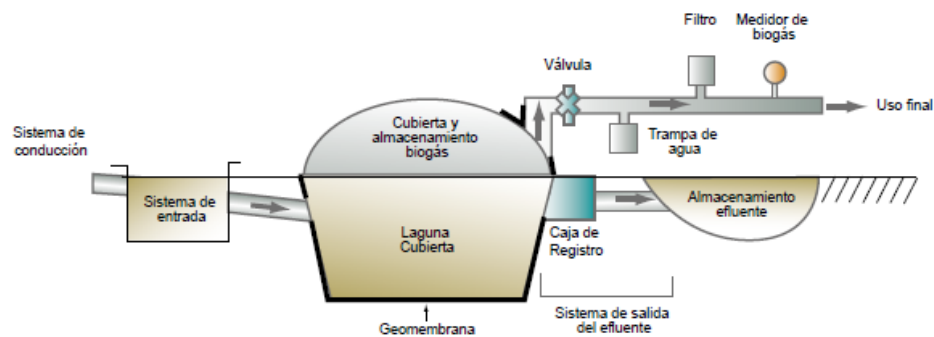
Nota. Adaptado de (MINENERGIA, 2012)

Los biodigestores domésticos de bajo precio se han implementado en países del sudeste asiático, pero en América del Sur, solo países como Cuba, Colombia, Brasil y Costa Rica han desarrollado esta alternativa. Fabricados con carcasa tubular de polietileno, estos modelos de biodigestores domésticos son de bajo precio, fácil instalación y mantenimiento, y solo requieren materiales locales para su construcción (Herrero, 2006).

Biodigestor de Laguna Cubierta

Los biodigestores de laguna cubierta son los más sencillos y se suelen utilizar para purines en ganadería. Son lagunas o pozas profundas, impermeables y herméticamente cubiertas con geomembranas de diferentes plásticos, sin uso de calor ni agitación (Zúñiga, 2007)

Figura 5. Esquema de sistema de laguna cubierta.



Nota. Adaptado de (MINENERGIA, 2012)

7.2 Marco Conceptual

La biomasa se refiere a cualquier tipo de material orgánico que se origina como resultado de procesos biológicos naturales (plantas o animales), excluyendo los materiales orgánicos que han sido retenidos en formaciones geológicas durante millones de años y convertidos en combustibles fósiles. Es decir, la biomasa se compone de todas las plantas, los desechos animales (heces y canales) o la interacción de ambos, incluidas las especies biológicas vivas y / o muertas "recientemente". Se observa que cualquier tipo de biomasa proviene directa o indirectamente del proceso fotosintético y se forma continuamente a través de la interacción del dióxido de carbono (CO_2), aire, agua, suelo y luz solar con animales y plantas (Esposito et al., 2012).

El biogás es un tipo de gas combustible producido por digestión anaeróbica o digestión, que se compone principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) y otros gases. El porcentaje de metano en el biogás (por volumen) puede estar entre 55% al 60% en su rango inferior, y hasta el 80% para su rango más alto, por tanto, su menor poder calorífico depende de la cantidad de metano, que puede ser de 4700 a 5500 kcal/m³ o -7 kWh /m³ (Stobbia et al., 2014)

La etapa de hidrólisis puede ser el proceso que limita la velocidad de todo el proceso, especialmente cuando se trata de desechos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, el tiempo de retención hidráulica, la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), tamaño de partícula, pH, concentración de NH_4 hidrolizado (FAO et al., 2011).

En esta fase tiene lugar la fermentación de moléculas orgánicas solubles sobre los compuestos utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (ácido acético, ácido fórmico, H_2) y compuestos orgánicos a reducir principalmente el ácido propiónico, ácido butírico, ácido valérico, ácido láctico, ácido y etanol. La siguiente fase del proceso es oxidada por bacterias acetogénicas (FAO et al., 2011).

Un tipo particular de microorganismo acetogénicos se denomina microorganismo homoacetogénico. Este tipo de bacteria puede desarrollarse heterótrofamente en presencia de azúcares o compuestos de un solo carbono (como mezclas de H_2/CO_2). La producción de acetato es el único resultado, a diferencia de los acetógenos, no producen hidrógeno, que es resultado del metabolismo, sino que lo ingieren como sustrato (Carrenõ et al., 2018).

Los microorganismos metano génicos terminan la fase de digestión anaeróbica desarrollando metano a partir de un solo sustrato de carbono o de dos átomos de carbono unidos por enlaces covalentes: acetato, H_2/CO_2 , formiato, metanol y algunas metilaminas (FAO et al., 2011).

La biomasa se caracteriza típicamente por su contenido de sólidos totales (TS). ST es el material residual que queda en el recipiente después de que la humedad de la muestra sin procesar se haya evaporado y luego secado en un horno a 105°C (García et al., 2013).

En cuanto su composición orgánica, la biomasa contiene carbono, la cual forma enlaces carbono-hidrógeno, en muchos casos de igual forma. Puede contener oxígeno, nitrógeno, azufre, fósforo y otros elementos. Presentan una estructura de macromoléculas como carbohidratos, lípidos y proteínas (Acosta & Pasqualino, 2014).

7.3 Marco Legal

La normatividad vigente en Colombia referente al manejo de los residuos sólidos es un poco extensa, por ende, se presenta en el Anexo A.

8. Metodología

8.1 Fase 1. Diagnóstico del estado de las porquerizas

8.1.1 Infraestructura disponible

El diagnóstico de la finca agropecuaria fundo bonito comenzó por la caracterización del lugar, específicamente las porquerizas, en las cuales se determinó las dimensiones de los corrales y su respectivo canal de desagüe, también cuantifico la cantidad y peso de los porcinos que se encuentran en cada ciclo de producción que se clasificaron en 3 tipos.

8.1.2 Manejo de residuos

Se Identificó como es el tratamiento actual de las excretas porcinas, ya que se hace un drenaje por medio de canales que llevan las excretas al final de un cultivo de plátanos, por lo cual se realizó un reconocimiento de posibles lugares para la implementar el biodigestor para que tener un buen manejo de este, de la cual se debe de tener en encuentra los diferentes factores de desventaja por la ausencia de animales y personas.

8.1.3 Condiciones de lavado

Se determinó la cantidad de agua que se utiliza para la limpieza de las porquerizas y que es la que determina la composición final excretas/agua de la mezcla que alimenta el biodigestor. listo

8.2 Fase 2. Caracterización de las excretas porcinas y el co-sustrato de caña de azúcar

8.2.1 Producción diaria

Se cuantifico la cantidad de excretas producidas a diario y las cantidades de desechos de caña que se generan para determinar y estandarizar su tamaño con el cual se va agregar al biodigestor. Los residuos de caña de azúcar, que son usados como co-sustrato, se obtienen de un cultivo de 5 m^2 en el área de la Finca Fundo Bonito. Por lo que es un residuo disponible para aumentar la producción de biogás en el biodigestor. En la Figura 3 se observa el estado de estos residuos para la alimentación en el biodigestor, la caña de azúcar es triturada para mejor contacto con las bacterias anaerobias.

Las muestras de caña de azúcar fueron utilizadas como co-sustrato para el biodigestor, este cultivo de la finca se utiliza para el consumo propio, ya que las condiciones climáticas son adecuadas para la siembra de este co-sustrato.

Figura 6. Co-sustrato de caña de azúcar.



8.2.2 Características fisicoquímicas

Determinación de conductividad, sólidos totales, sólidos volátiles totales y pH (excretas porcinas). Los procedimientos en el manual del método estandarizado o Standard Methods, son la referencia metodológica (ver Tabla 4) para determinar las características de conductividad, pH, sólidos

totales y sólidos volátiles totales, para el sustrato de “excretas porcinas”, esto análisis se realizaron en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás Villavicencio.

Tabla 1. Métodos para la determinación de parámetros físico-químicos de los sustratos.

Parámetro	Método	N° Standard Métodos	Materiales	Equipos	Duración de la medición
Conductividad	Potencio métrico	4500-Cl-D	-	Medidor de Conductividad	2 horas
pH	Electrométrico	4500-B	-	Medidor de pH	2 horas
Sólidos Totales	Gravimétrico	2540-B	Cápsulas de Porcelana, espátula	Mufla, balanza analítica	4 horas
Sólidos Volátiles totales	Gravimétrico	2540-G	Cápsulas de Porcelana, espátula	Mufla, balanza analítica	4 horas

Nota: Parámetros para la caracterización Físicoquímico de los sustratos.

La conductividad y pH se midió a 5 tipos de muestras, como se observa en la Tabla 5. Para las muestras sólidas se debió disolver agregando 20 gr de la muestra con 40 ml de agua destilada, hasta tener una muestra homogénea y poder realizar la medición con un multiparámetro WTW de referencia ProfiLine Cond 3310, como se observa en la Figura 7 y 8.

Tabla 2. Tipos de muestras de las excretas

Tipo de muestra	Origen de muestra
1	Mixta (de todos los porcinos)
2	Porcinos grandes (verracos – marranas de cría)
3	Porcinos medianos (ceba)
4	Porcinos pequeños (cría)
5	Líquida (residuo de las porquerizas)

Nota: El origen de los tipos de muestras que se eligieron para las diferentes mediciones en el laboratorio.

Figura 7. Medición de Conductividad de excretas porcinas.



Figura 8. Medición de pH de Excretas Porcinas.



Para la determinación de sólidos totales (ST) se utilizaron 10 capsulas de porcelana las cuales se tomaron 2 capsulas para los 5 tipos de muestras respectivamente, a cada capsula de agregaron aproximadamente 30 gr de excretas, posteriormente se metieron horno durante 4 horas (ver Figura 9). Luego de este tiempo se pesaron las cápsulas para determinar los sólidos totales.

Figura 9. Determinación de sólidos totales(ST).



Para la determinación de sólidos totales volátiles (SV), se utilizó el resultado de los sólidos totales, con la ayuda 10 crisoles de porcelana, se les añadió un promedio de 4 gr de la masa seca, resultante del procedimiento de sólidos totales, con excepción los crisoles número 9 y 10, las cuales se le añadió 2 gr que eran de origen tipo 5, que se puede observar en la tabla 5. Posteriormente se colocaron en la mufla durante 2 horas a una temperatura de 400 °C (ver Figura 10). Luego de este tiempo se pesaron las capsulas para determinar las cenizas remanentes y por diferencia de peso inicial, los sólidos totales volátiles (SV).

Figura 10. Determinación de solidos totales volátiles.



8.2.3 Caracterización de sólidos

Determinación sólidos totales, sólidos volátiles totales (caña de azúcar).

Para la determinación de sólidos totales (ST) de la caña de azúcar se utilizaron 4 capsulas de porcelana, a cada capsula se agregaron aproximadamente 10 gr de caña de azúcar, posteriormente

se metieron horno durante 4 horas (ver Figura 11). Luego de este tiempo se pesaron las cápsulas para determinar los sólidos totales.

Figura 11. Determinación de sólidos totales (ST) del co-sustrato (caña de azúcar).



Para la determinación de sólidos totales volátiles (SV), se utilizó el resultado de los sólidos totales, con la ayuda de 4 crisoles de porcelana, se les añadió un promedio de 3 gr de caña seca, resultante del procedimiento de sólidos totales (ver Figura 12). Posteriormente se colocaron en la mufla durante 2 horas a una temperatura de 400 °C. Luego de este tiempo se pesaron las capsulas para determinar las cenizas remanentes y por diferencia de peso inicial, los sólidos totales volátiles (SV).

Figura 12. Determinación de solidos totales volátiles del co-sustrato (caña de azúcar)



8.3 Fase 3. Diseño de los componentes principales del biodigestor

La base para el dimensionamiento del biodigestor son las excretas producidas por los animales (cerdos) presentes en la Finca Fundo Bonito. De acuerdo a (Olaya & González, 2012), para fincas colombianas se puede estimar que el 2% del peso vivo de cada animal se transforma diariamente en excretas frescas. Realizando este cálculo para las diferentes categorías de cerdos presente en la Finca Fundo Bonito (Tabla 3), se estima que se pueden producir 51 Kg de excretas diariamente. Al comparar este resultado con el muestreo realizado *in situ* (Tabla 6), se evidencia que en la realidad se producen 60,64 kg. Para el diseño se toma el valor de 51 kg de excretas como mínimo teórico para realizar los cálculos de los componentes del biodigestor como el diámetro, longitud del reactor y la carga diaria.

Tabla 3. Determinación del estimado de excretas.

Cerdos	Cantidad (Q)	Edad	Peso vivo (Pv)	Pv Total (Q*Pv)	Estimado 2% del Pv $M\text{E}=(Q*Pv*0,02)$	
Cerdos Ceba	12	95 -115 días	50	950	19	
Marrana de Cría	4	1 a 2 años	250	1000	20	
Verracos	2	1 a 2 años	300	600	12	
					51	Excretas Producidas

Nota: Estimación del 2% de las excretas por medio del peso vivo por la cantidad de los porcinos.

8.3.1 Estimación de la Mezcla del agua (Ma)

Sin duda alguna, cada tipo de residuo orgánico tiene distintas propiedades que pueden resultar en ciertos casos más beneficiosas que otras al ser utilizadas en procesos de digestión anaerobia. Un factor importante es la mezcla acuosa que entra al biodigestor, ya que se debe evitar sobrecargar a las bacterias anaerobias con una gran carga orgánica. Para ello es necesario calcular una relación excreta/aguas que este dentro de lo establecido para su operatividad. Este

parámetro varía de acuerdo a la fuente consultada, ya que las condiciones de los sustratos son variables. (Daniel & Aldana, 2017). Estudios previos realizados por la Universidad Santo Tomás en la I.E.A. de Guacavía (Huertas et al., 2021), determinaron que para las condiciones en el departamento del Meta, una relación óptima se encuentra entre 1/5 a 1/10. Para el presente estudio se tomó la relación más baja, para que se propicie mayor producción de biogás, de esta forma por medio de la Ecuación 1, se obtiene la cantidad de agua. A partir de este valor se especificó el agua de lavado diario que se presentó en la Tabla 2.

$$Ma = Q_{total} * \frac{Kg H_2O}{Kg Excretas} \quad (1)$$

$$Ma = 51 Kg Excretas * \frac{5 Kg H_2O}{1 Kg Excretas}$$

$$Ma = 255 Kg H_2O$$

8.3.2 Masa Mezcla

8.3.3

La masa entrante al biodigestor será la sumatoria de las excretas frescas y el agua, que para términos prácticos es la mezcla resultante del lavado de las porquerizas.

$$Masa Mezcla = Ma + Q_{Total} \quad (2)$$

$$Masa Mezcla = 255 Kg + 51 Kg$$

$$Masa Mezcla = 306 Kg Mezcla$$

8.3.4 Flujo volumétrico

Cuando el foco de la medición o control de flujo está en el volumen de gas. Al monitorear la composición del flujo de aire en las condiciones reales del proceso, es mejor utilizar la medición del flujo volumétrico. Las aplicaciones de control de la higiene industrial y del aire ambiental son las más adecuadas para la medición de flujo volumétrico porque el objetivo es cuantificar el número de partículas en el volumen de aire en las condiciones de medición reales (Daniel & Aldana, 2017).

$$Flujo Volumetrico = \frac{Masa Mezcla}{Densidad} \quad (3)$$

$$\rho = 1000 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\text{Flujo Volumetrico} = \frac{306 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}}}{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{Flujo Volumetrico} = 0,306 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

Los estudios para el estiércol porcino, realizados en climas con una temperatura promedio del aire entre 30 °C, lo óptimo para COV es de 2 o 1.5 Kg ST/m³ digestor aproximadamente. Además, se estima una rendimiento de biogás de 0.3 m³ o 0.4 m³ biogás/ kg ST (a presión cercana a la atmosférica) (García et al., 2013). Los TRH dependerán de la biodegradabilidad del sustrato, pero suele estar alrededor de los 20 – 30 días (Daniel & Aldana, 2017).

8.3.5 Cálculo de la cantidad de líquido en el biodigestor, la cantidad de sustrato principal necesario y volumen del reactor.

Es importante recordar que el volumen diario de excretas se puede definir de dos formas:

- 1) Utilizar todos los excrementos producidos (puede ser para el saneamiento como objetivo principal) o una pequeña cantidad de excrementos que la familia pueda recolectar todos los días Por ejemplo, puede reemplazar del 50% al 60% del combustible (madera, fertilizantes, etc.) (Daniel & Aldana, 2017).
- 2) Utilizar la cantidad necesaria para satisfacer una determinada demanda de energía. (Cocina, calefacción, iluminación, etc.).

Considerando la segunda opción, se puede calcular el tamaño del biodigestor para cubrir todos los requerimientos energéticos diarios, ya que, considerando su etapa de crecimiento y tiempo de residencia permanente, un cierto número de animales puede tener la cantidad necesaria de estiércol (Daniel & Aldana, 2017).

El biogás producido por este digestor de biogás doméstico se utilizará principalmente para cocinar alimentos. Esto se debe a que, en este caso, el biogás requiere muy poco tratamiento, es decir, es necesario la reducción de sulfuro de hidrógeno (Daniel & Aldana, 2017).

Según la producción (m³ de biogás / kg SV) y la composición del estiércol (kg SV / kg de estiércol fresco), el biogás requerido determina la cantidad requerida de estiércol, y la misma cantidad de estiércol determina la cantidad de líquido que pasa a través del VOC al líquido de

digestión biológica del producto ver ecuación (5). Volumen de mezcla o ingesta diaria Q_a (dependiendo de la dilución recomendada) y TRH ver ecuación (6) (García et al., 2013). Para el tiempo de retención hidráulico (TRH), se estima un valor de 20 días.

$$V_L = \text{Flujo Volumetrico} * TRH \quad (6) \quad TRH = 20 \text{ Dias}$$

Por otro lado, para calcular el sustrato principal, se debe considerar que el biogás producido por el estiércol animal, ya que como residuo entrante líquido sirve como medio de transporte de los co-sustratos. Es por ello que la cantidad de biogás obtenida por kilogramo de estiércol fresco depende básicamente de su composición (% SV) y de la producción del biogás introducido en el digestor por kilogramo de SV, ver la ecuación (7) (Daniel & Aldana, 2017).

$$V_{Biogas} = \left(\frac{ST\%}{100}\right) * \left(\frac{SV\%}{100}\right) * \text{potencial de biogas} \frac{m^3}{Kg} SV * Kg \text{ sustrato agregado} \quad (7)$$

$$V_{Biogas} = \left(\frac{360,7218\%}{100}\right) * \left(\frac{303,8850\%}{100}\right) * 0,333 \frac{m^3}{Kg} * 10 Kg$$

Diámetro de la bolsa y largo del biodigestor. El biodigestor rural a construir es de tipo tubular de flujo horizontal, comúnmente conocido como tipo salchicha.

$$\text{Radio } (r) = \frac{\text{Diametro}}{2} \quad \text{Radio } (r) = \frac{1,2}{2} = 0,6 \text{ m}$$

$$L = \frac{\text{Volumen}}{\pi * r^2}$$

8.4 Fase 4. Construcción y puesta en marcha del biodigestor alimentado con excretas porcinas y con co-sustrato de caña de azúcar

En el Anexo B se enuncian los materiales necesarios para construir un biodigestor tubular como los que se emplean actualmente en Latinoamérica. Una vez concluido el diagnóstico de la Finca Fundo Bonito y el dimensionamiento necesario para el biodigestor, se puede definir la cantidad de materiales a usar para construir el sistema de biodigestión, ya que las dimensiones de este dependen de los cálculos ya mencionados. En el Anexo D se puede ver la ubicación prevista del biodigestor en la finca.

Antes de instalar el Biodigestor se realizó una inspección de la finca para identificar el lugar más óptimo para la construcción de tal manera que sea fácil su alimentación diaria, es decir, cerca de las porquerizas o establos, que se pueda conducir fácil el biogás al sitio donde se utilizará y que el efluente del bioabono pueda utilizarse para fertilizar cultivos cercanos. Para seleccionar el lugar se debió tener en cuentas las condiciones climatológicas de Puerto Gaitán, en época de lluvias, el nivel freático se encuentra a 30 cm del suelo, por esto se decido rellenar el terreno para la óptima ejecución de la construcción (ver Figura 13), donde se realizó un piso y un encierro en material para un mejor manejo del biodigestor (ver Figura 14).

Figura 13. Adaptación del terreno



Figura 14. Construcción del piso y encierro del biodigestor.



La geo membrana a utilizar para este tipo de biodigestor tubular es de calibre 40, ya que este es el más grueso en el mercado, por ende, más resistente y su tiempo vida útil es de 5 a 7 años. Las dimensiones determinadas en el diseño, definen un diámetro de 1,5 m y una longitud de 8 m para la geo membrana tubular a adquirir; para su instalación la geo membrana se extiende sobre el piso seco y firme, que no tenga piedras u objetos que puedan romperlo. Sobre la parte superior de la bolsa a unos 3 metros del ducto de entrada sobre el quiebre tubular se pega una arandela de caucho; de la misma forma se hace por dentro, estas arandelas deben coincidir, posteriormente se hace un orificio pequeño para la estación de un flanche de $\frac{3}{4}$ en orden, se utiliza una arandela de plástico duro del mismo material de la geo membrana y el segundo empaque de neumático más delgado, (ver Figura 15). Esta conexión servirá para extraer el biogás del biodigestor, por lo que se debe asegurar que no escape gas por la bolsa.

Figura 15. Instalación del flanche para el conducto del biogás.



Para el ducto de entra y salida del biodigestor del cual se realizó una instalación de un tubo de 6 pulgadas por 1 metro de longitud, dejando 0,80 m por dentro de la geo membrana y 0,20 m por fuera de esta, haciendo una manipulación de la geo membrana en forma de acordeón para proceder a sellarlo con neumático, (ver Figura 16).

Figura 16. Adaptación del ducto de entra y salida.



Para transportar el biogás del biodigestor a la cocina se coloca un adaptador macho $\frac{3}{4}$ de PVC que se le adapta al flanche insertado previamente, en orden se adapta un pedazo de 70 cm tubo de $\frac{3}{4}$ PVC, un adaptador macho $\frac{3}{4}$, un registró metálico de $\frac{3}{4}$ y por ultimo otro adaptador macho de $\frac{3}{4}$, para dejarlo sellado y posteriormente seguir la adaptación de la tubería hasta la cocina (ver Figura 17).

Figura 17. Adaptación del empalme del flanche con la tubería.



Se prepara el lugar del encierro con ayuda de dos plásticos uno encima del otro para que las paredes de la construcción no dañen la geo membrana (ver Figura 18). Se procede a inflamar el biodigestor

por medio de un compresor para que la geo membrana diera un buen manejo para moverla hacia su sitio de instalación (ver Figura 19).

Figura 18. Instalación de la protección con plástico.



Figura 19. Instalación de la geo membrana.



Diariamente se realiza la limpieza de las porquerizas, una semana antes se acumuló las excretas producidas (ver Figura 20). Para la carga inicial, en un tanque de 1000 L se hace la mezcla excreta/agua (ver Figura 21).

Figura 20. Excretas porcinas para la primera carga



Figura 21. Mezcla Excretas/Agua.



Luego de tener la mezcla Excretas/Agua 1:5 se vierte la primera carga al ducto de entrada al biodigestor, por medio de una caneca de 5 gal, este procedimiento se llevó a cabo por más de 5 horas por este medio de carga (ver Figura 22).

Figura 22. Primera carga de la mezcla excretas/agua.



Posteriormente se adapta la tubería PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada, con una longitud de 50 m desde donde se encuentra el biodigestor a donde va la salida del biogas (ver Figura 23), esta tubería se le instala una válvula de seguridad que está constituida por una garrafa plástica de 5 L de capacidad; sobre la boca esta se destapa y se coloca una Tee de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada, del cual el extremo inferior debe penetrar 10 cm dentro del agua contenida en la botella, como se observa en la (ver Figura 24). Esta válvula de seguridad sirve para en un caso excesivo la geo membrana se llene de biogas, este pase la presión de la lámina de agua y se expulse de forma de burbujas.

Figura 23. Instalación de la tubería del biodigestor.



Figura 24. Válvula de seguridad.



El ácido sulfhídrico es un componente del biogás con un olor característico a huevo podrido que es incómodo para las personas que se exponen diariamente a este, ya que puede producir complicaciones en la salud humana, como parálisis el nervio olfativo, entre los métodos de separación de H_2S el más utilizado es el denominado “método de caja seca” que consiste en utilizar viruta de hierro dentro de un recipiente por el que se hace pasar biogás (ver Figura 25), en este recipiente se produce una reacción de H_2S con el hierro Fe descomponiéndose en sulfuro férrico Fe_2S_3 sustancia que no es perjudicial, la viruta de hierro además de servir como trampa del H_2S , sirve como trampa de llamas evitando el flujo de las mismas hacia el digestor (Viquez, 2018).

Figura 25. Trampa de ácido sulfhídrico



El fogón es la última parte de la instalación que conduce el biogás y consiste en instalar quemadores que permitan la cocción de los alimentos, estos quemadores pueden ser de varias formas según la necesidad de cada unidad familiar (ver Figura 26), se adaptó un quemador en tubo galvanizado de ½ pulgada.

Figura 26. Quemador adaptado para el biogás.

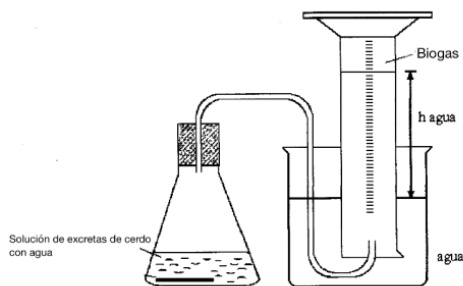


8.4.1 Evaluación de la fase de arranque y operación del biodigestor

- Medición de cantidad de biogás producido

Para la medición de la cantidad de biogás se utilizó el método de desplazamiento de volumen el cual viene definido por la norma DIN 38414 “Fermentation of organic materials - Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests” la cual está basada en la Norma VDI 3475 Blatt 4:2010-08 de la Asociación Alemana de Ingenieros (VDI, 2016). La medición de biogás mediante desplazamiento de columna se realizó durante 1 semana, en la cual se hacían 3 mediciones diarias en el transcurso de 4 pm a 5 pm, el montaje se realizó (ver Figura 27 y 28).

Figura 27. Medición de biogás mediante desplazamiento de columna.



Nota. Adaptado de Vaquero-Pineda et al., 2016.

Figura 28. Montaje de desplazamiento de columna.



- Medición de la calidad de biogás producido (% CH₄)

La fase de arranque del biodigestor empieza con la primera carga que se deja durante dos semanas sin agregarle ningún tipo de sustrato, para que se propicie la formación de bacterias anaerobias, luego de esta semana, se le agrega todos los días una carga diaria, y posteriormente se procedió hacer la medición del biogás producido. Durante una semana se realizó la recolección por medio de botellas plásticas de 1 L, las cual se colocaban en la boquilla de la botella dentro del tubo galvanizado de ½ Pulgada (Salida de biogás), se le abría el registro del gas para llenar las botellas de con biogás, se tomaban 3 muestras diarias en el transcurso de 4:00 pm a 5:00 pm, ya que en este tiempo la producción de biogás es más elevada, al alcanzarse las mayores temperaturas ambientales en las horas previas.

Una vez tomada las muestras de la producción con excretas porcinas, se procedió agregarle el co-sustrato, caña de azúcar. Durante dos semanas se le agrego 1 kg de caña de azúcar triturada no mayor a 5 cm, sin la cascara de la caña, ya que esta fibra tarda en degradarse y no se va desintegrar al 100%, pasada las dos semanas se procedió a tomarlas 3 muestras diarias del biogás con las botellas de gaseosa durante una semana, para analizar el efecto de la adición de esta cantidad de co-sustrato en la producción de biogás. Luego de terminar el muestros del biogas se realizo la practica de laboratorio en la Universidad Santo Tomas sede Villavicencio, se hizo la medicion del metano con un Portable Multi-gas Detector With Built-in Pump (ver Figura 29), con la ayuda de un bisturi se perforaba un pequeño agujero a las 21 muestras de gas con excretas y 21 muestras de co-sustrato de caña de azucar.

Figura 29. Medición de metano.



9. Resultados y análisis

9.1 Diagnóstico del estado de las porquerizas

Se observó que la infraestructura de porquerizas estaba en muy malas condiciones y estaban ubicada en una zona no favorable para la implementación del biodigestor, ya que había diferentes causas que podrían perjudicar la operación. Una de las principales causas era que no había espacio suficiente para el montaje del biodigestor (ver Anexo C), otra causa importante era la cercanía a la casa y por ende los malos olores que se generarían y posibles enfermedades para los otros animales que se producen en esta, ya que en la finca también hay producción avícola.

Para la cuantificación de los porcinos que se encontraban en este ciclo, se clasificaron en 3 tipos y se cuantifico su respectivo peso para cada porcino al momento de iniciar el trabajo de campo (ver Tabla 4).

Tabla 4. Cuantificación de porcinos.

Porcinos	Cantidad	Peso	Unidades
Pequeños	24	291	kg
Medianos	19	1066	kg
Grande	7	1600	kg
Total	50	2957	kg

Nota: Datos obtenidos de la cantidad porcinos que se encuentran en el último ciclo de producción con su respectivo peso en unidades de kilogramos.

Se observó un total de 50 porcinos clasificados en tres tipos, este número puede variar por la venta de porcinos de ceba o de cría. Ya que el proceso de ceba se generan porcinos para la venta cada 90 días, y por otro lado el proceso de cría que se genera por parte de los partos de la marranas de cría del cual se cuentan con 5 cerdas que se tienen en la finca, cada cerda en cada parto tiene 10 a 14 porcinos, de cuales se obtienen 2 lotes de porcinos en el periodo de gestación, cada parto que tiene la marrana se van rotando para generar un ciclo de vida más largo de cada marrana ya que cada marran genera de 3 a 4 partos de los cuales hay una rotación de estas en la finca agropecuaria.

Se identificó como es el tratamiento actual de las excretas porcinas, el manejo de los residuos de las porquerizas era muy precario, ya que, al momento de la limpieza de estas, el agua de lavado escurría por un drenaje de canales, donde la mezcla resultante (excretas, orina y agua residual del lavado) eran vertidas a un cultivo de plátanos cercano a las porquerizas. Por consiguiente, se identificó un lugar para la construcción del biodigestor que permitiera el acceso a esta mezcla residual, pero lo suficientemente alejado de la casa principal, para evitar los olores.

Para la determinación de la cantidad de agua que se utiliza en el lavado de las porquerizas y la determinación de la composición final de las excretas/agua, se realizó una aproximación del flujo de la manguera del lavado durante dos semanas, donde se observó que se generaba desperdicio de esta agua, por lo tanto, se adaptó un tanque de 250 L diarios, para fijar la cantidad de agua de lavado. Para ello se adaptó este tanque a las porquerizas nuevas. De esta forma el agua que se suministra a las porquerizas para el lavado, mantiene una relación estable con las excretas, que posteriormente sirve de carga diaria del Biodigestor. Esta relación agua/excretas para las condiciones fijadas, es de 1/5, de la cual se obtiene que por cada kilogramo de excretas se debe corresponden 5 L de agua.

Para monitorear la cantidad de agua que se emplea para limpieza de las porquerizas se midió durante dos semanas en litros, el agua utilizada, los datos se encuentra en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de lavado de las porquerizas

Días	1	2	3	4	5	6	7	Promedio	Desviación estándar
Semana 1	249 L	248 L	250 L	249 L	248 L	249 L	250 L	249,62 L	± 0,82
Semana 2	250 L	250 L	249 L	249 L	249 L	248 L	250 L	249,93 L	± 0,72

Nota: Datos obtenidos de las condiciones de lavado de las porquerizas durante 2 semanas.

9.2 Caracterización de las excretas porcinas y el co-sustrato de caña de azúcar

Se determinó la cantidad de excretas porcinas producidas a diario con la cantidad de porcinos que se encuentran en la Finca agropecuaria Fundo Bonito, cuenta con 50 animales en total de los cuales se caracterizaron como se observa en la Tabla 1. La recolección de excretas se ejecutó durante 2

semanas previo al proceso de lavado, para realizar esta estimación. Los resultados de este periodo de muestreo se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 6. Cuantificación de las excretas producidas a diario.

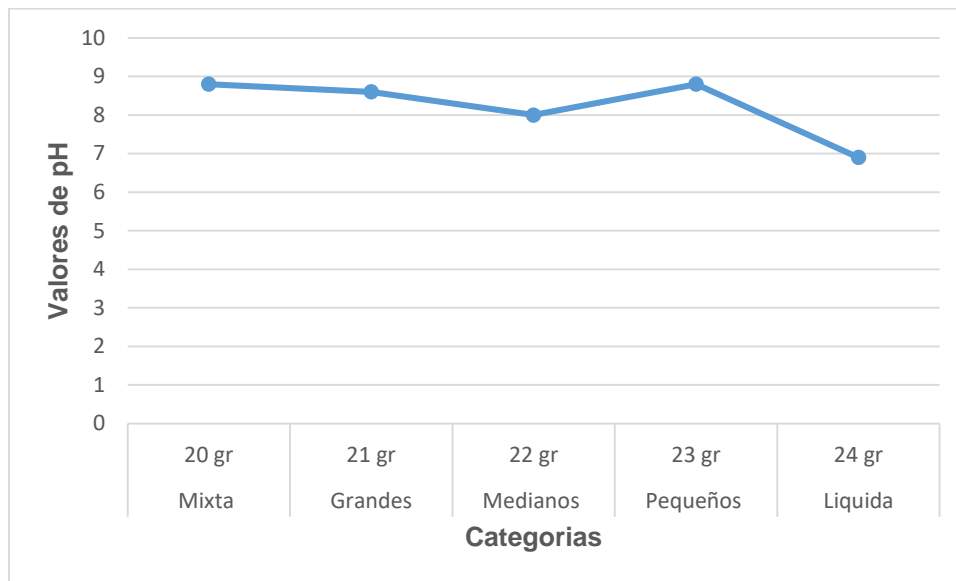
Días	1	2	3	4	5	6	7	Promedio	Desviación estándar
semana 1	59 kg	63 kg	65kg	65 kg	59 kg	58 kg	60 kg	61,28 kg	± 2,98
semana 2	58 kg	61 kg	62 kg	58 kg	60 kg	62 kg	59 kg	60 kg	± 1,98

Nota: Datos obtenidos de la cuantificación de las excretas producidas a diario durante 2 semanas.

La producción de excretas porcinas en la finca agropecuaria Fundo Bonito en promedio es de 60,64 kg a diario cuando el ciclo de producción está en lo más alto con una cantidad de 50 porcinos, del cual es el abastecimiento para la carga diaria del biodigestor, pero ya que el número de porcinos puede bajar casi hasta mitad, por ende, la producción de excretas también.

La Figura 30 indica la variación de pH de las excretas de los porcinos identificados, esto indica que los residuos liquido de los porcinos de mezcla agua tiene un pH en el valor de 6,9, mientras que en las excretas de los porcinos pequeños, medianos, grandes y mixta tiene un pH alto del cual caracteriza que son de un procesos de digestión anaerobia optimo del cual se encuentran en los valores obtenidos 7,8 y 8,2, del cual se puede notar que el de mayor pH es el de los porcinos pequeños ya que se genera una gran generación de microorganismos para la producción de digestión anaerobia (ver Figura 30). El valor alcalino de las excretas porcinas ayuda al proceso de digestión anaerobio, que tiende a acidificar el reactor a medida que se descompone la materia orgánica, al producirse gran cantidad de ácidos, como se discutió en el capítulo del marco teórico.

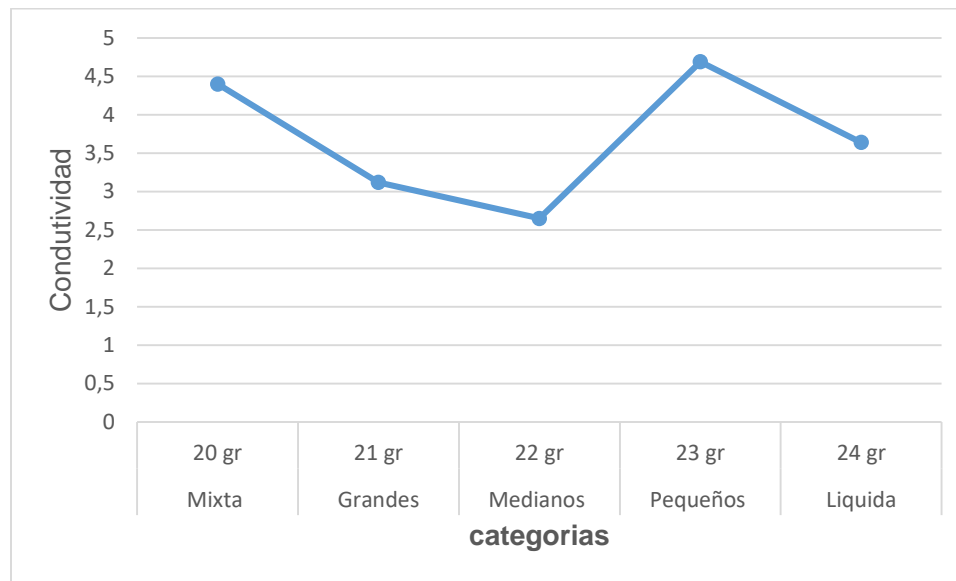
Figura 30. Curva de variación de pH del sustrato (excretas porcinas)



El resultado del pH en promedio de los cinco tipos de muestras del sustrato da como resultado 8,2 (ver Anexo F). Los pequeños cambios en el pH (fuera del rango óptimo) pueden afectar negativamente el proceso anaeróbico. Los microorganismos metano-genéticos son más susceptibles a cambios en el pH que otros microorganismos en la comunidad microbiana anaeróbica. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica tienen los mejores niveles de actividad casi neutrales. El valor óptimo de ácido génico está entre 5,5 y 6,5, y el valor óptimo del metano genético está entre 7,8 y 8,2. El pH óptimo para cultivos mixtos está entre 6,8 y 7,4, y un pH neutro es ideal (GEF, 2011)

Los valores de conductividad del sustrato (excretas porcinas) dependiendo del tipo de muestra varían de modo significativo (ver Figura 31).

Figura 31. Curva de variación de la conductividad del sustrato (excretas porcinas).



En la Figura 31 se aprecia el consumo de sales minerales por parte de las bacterias que se encuentran en los diferentes tipos de muestras de las excretas porcinas, esto hace referencia a lo inestable de la masa orgánica de los porcinos, por lo consiguiente se puede apreciar que el valor más alto es la muestra tipo 4, las cuales son excretas de origen de porcinos pequeños de los cuales generan una disposición de excretas para el diseño del biodigestor.

Los resultados de los sólidos totales muestran que sus características cumplen con el rango determinado en el manual de biogás para realizar el proceso de digestión anaeróbica (ver Tabla 7), para la óptima producción de biogás con excretas porcinas los ST deben estar entre el 15% a 49%, en la tabla muestra lo que corresponde a los sólidos totales para asegurar el normal funcionamiento del proceso, teóricamente se puede convertir en metano.

Toda la materia orgánica se compone de agua y una parte sólida denominada sólidos totales (ST). El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla cargada en el digestor es un parámetro importante que debe tenerse en cuenta para garantizar que el proceso se desarrolle satisfactoriamente. A medida que aumenta el contenido de sólidos, la movilidad de los metanógenos en el sustrato se restringe cada vez más, por lo que la eficiencia puede verse afectada, así como la producción del biogás (FAO et al., 2011)

Tabla 7. Sólidos totales del sustrato (excretas)

Tipo de Muestra	Capsulas	Peso de las capsulas (g)	Peso de masa húmeda (g)	Peso de capsula + masa húmeda (g)	Sólidos Totales (ST)	Sólidos Totales (%ST)	Promedio (%ST)	Desviación estándar
Mixta (1)	1	77,4	30,25	89,86	12,46	41,19	43,29	± 2,98
	2	86,92	30,55	100,79	13,87	45,40		
Porcinos Grandes (2)	3	88,21	30,22	100,56	12,35	40,86	44,03	± 4,49
	4	91,93	30,14	106,16	14,23	47,21		
Porcinos Mediano s (3)	5	89,63	30,37	104,2	14,57	47,97	47,84	± 0,18
	6	92,93	30,07	107,28	14,35	47,72		
Porcinos Pequeños (4)	7	93,08	30,18	103,09	10,01	33,16	29,65	± 4,96
	8	89,13	30,4	97,08	7,95	26,15		
Líquida (5)	9	88,32	30,1	91,16	2,84	9,43	7,88	± 2,18
	10	93,09	30,91	95,05	1,96	6,34		

Nota: Sólidos totales del sustrato (excretas).

Los resultados de los sólidos totales volátiles muestran que sus características están en consonancia con el alcance del proceso de digestión anaeróbico determinado en el manual de biogás (ver Tabla 8). Ya que el % sólidos volátiles tienen que estar por debajo de 85%. La producción de gas de un sistema anaeróbico se suele expresar como el volumen de gas producido por unidad de masa de sólidos volátiles, porque representa el efecto de las bacterias sobre la materia orgánica la relación entre la utilización de gas y la producción de gas es la eficiencia.

Tabla 8. Sólidos totales volátiles del sustrato (excretas)

Muestra	Capsula	Peso de capsula (g)	Peso Masa Humedad (g)	Peso de Capsula + Masa Humeda (g)	Sólidos Volátiles (%SV)	Sólidos Volátiles (%ST)	Promedio (%ST)	Desviación estándar
Mixta (1)	1	14,41	4,01	15,42	25,18	74,81	75,83	± 1,44
	2	22,72	4,32	23,72	23,15	76,85		
Porcinos Grandes (2)	3	19,08	4,26	20,10	23,94	76,05	75,43	± 0,88
	4	18,23	4,05	19,25	25,18	74,81		
Porcinos Medios (3)	5	24,27	4,06	25,24	23,89	76,10	76,96	± 1,22
	6	19,54	4,15	20,46	22,16	77,83		
Porcinos Pequeños (4)	7	22,26	4,01	23,78	37,90	62,09	51,37	± 15,17
	8	24,38	4,01	26,76	59,35	40,64		
Líquida (5)	9	25,72	2,02	26,17	22,28	77,72	64,53	± 18,66
	10	18,76	2,24	19,85	48,66	51,33		

Nota: Sólidos totales volátiles del sustrato (excretas).

Caracterización de sólidos del co-sustrato

Los resultados de los sólidos totales muestran que sus características cumplen con el rango determinado en el manual de biogas para realizar el proceso de co-sustrato, ya que el porcentaje de sólidos totales de la caña de azúcar esta entre 50% y 60% para la fermentación de la producción de biogás.

Tabla 9. Sólidos totales volátiles del co- sustrato (caña de azúcar)

Capsulas	peso de la capsula (g)	Peso Masa Húmeda (g)	Peso de cap sula + masa Húmeda (g)	Sólidos Totales (ST)	Sólidos Totales (ST) %	Total (%ST)
1	91,96	10,54	96,89	4,93	46,77	44,15
2	86,92	10,4	91,24	4,32	41,53	
3	77,40	10,41	81,94	4,54	43,61	50,94
4	88,20	10,02	94,04	5,84	58,28	
Desviación estándar				0,67		

Nota: Sólidos totales del co-sustrato (caña de azúcar).

Los resultados de los sólidos volátiles muestran que sus características cumplen con el rango determinado en el manual de biogás para realizar el proceso de digestión anaeróbica (ver Tabla 12), de los cuales el 63% Y 97%. Que corresponde a los sólidos volátiles para asegurar el normal funcionamiento del proceso, pues están compuestos por componentes orgánicos y teóricamente se puede convertir en metano.

Tabla 10. Sólidos totales volátiles del co-sustrato (caña de azúcar)

Capsulas	Peso de la capsula	Peso Masa húmeda (g)	Peso de capsula + masa húmeda	Sólidos Volátiles (SV)	Sólidos Volátiles (%ST)	Total de (%ST)
1	24,27	2,87	24,49	0,22	7,66	92,33
2	25,72	3,95	26,06	0,34	8,60	91,39
3	22,26	3,18	22,51	0,25	7,86	92,13
4	22,72	3,12	22,86	0,14	4,48	95,51
Desviación estándar				± 0,08		

Nota: Sólidos totales volátiles del co-sustrato (caña de azúcar).

9.3 Diseño de los componentes principales del biodigestor

- Cálculo de la cantidad de líquido en el biodigestor, la cantidad de materias primas necesarias y volumen del reactor.

$$V_L = \text{Flujo Volumetrico} * TRH \quad (6) \quad TRH = 20 \text{ Dias}$$

$$V_L = 0,3036 \frac{m^3}{\text{dia}} * 20 \text{ dias}$$

$$V_L = 6,072 m^3$$

$$V_t = \frac{V_L}{\% V_t} \quad V_t = \frac{6,072 m^3}{0,7}$$

$$V_t = 8,6742 m^3$$

- Diámetro de la Bolsa y largo del Biodigestor

$$\text{Radio } (r) = \frac{\text{Diametro}}{2} \quad \text{Radio } (r) = \frac{1,2}{2} = 0,6 m$$

$$L = \frac{\text{Volumen}}{\pi * r^2} \quad L = \frac{11,5428 m^3}{\pi * (0,6m)^2}$$

$$L = 7,79 m$$

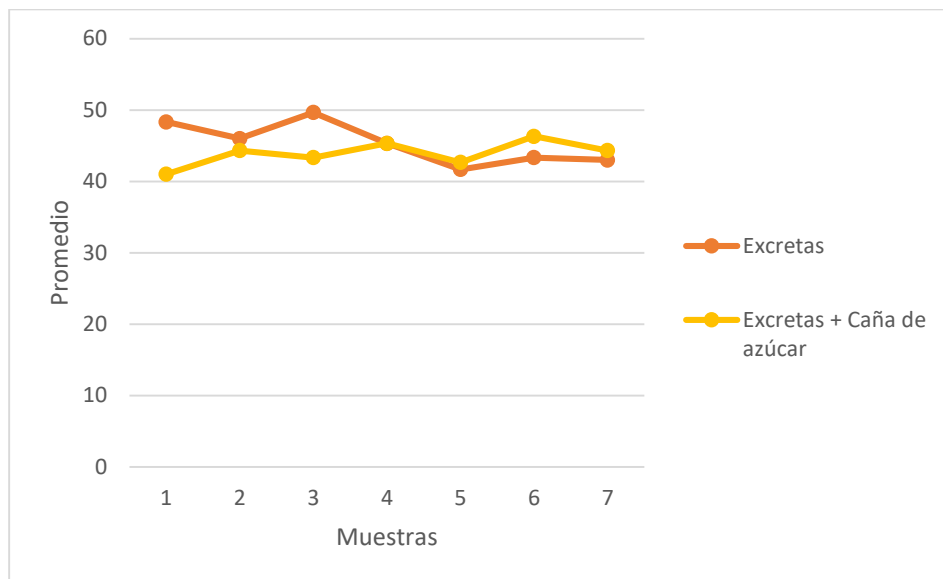
El largo del biodigestor para cumplir las características de diseño

El diseño con sus dimensiones del biodigestor se puede observar en el Anexo D.

9.4 Construcción y puesta en marcha del biodigestor alimentado con excretas porcinas y con co-sustrato de caña de azúcar.

El resultado obtenido se muestra en la Figura 32 de la cual se puede observar que la variación de la producción de gas es muy similar, ya que con el co-sustrato hay una disminución de gas muy mínima comparada con la producción de biogás con solo excretas porcinas, por lo que la generación de este biogás está en completa funcionalidad en el Fundo Bonito, se está llevando a cabo la utilización del biogás para la cocción de alimentos, no solo para los encargados, si no, también para consumo mismo de los propietarios de este predio.

Figura 32. Curva de variación del metano con solo sustrato vs con el co-sustrato (caña de azúcar).



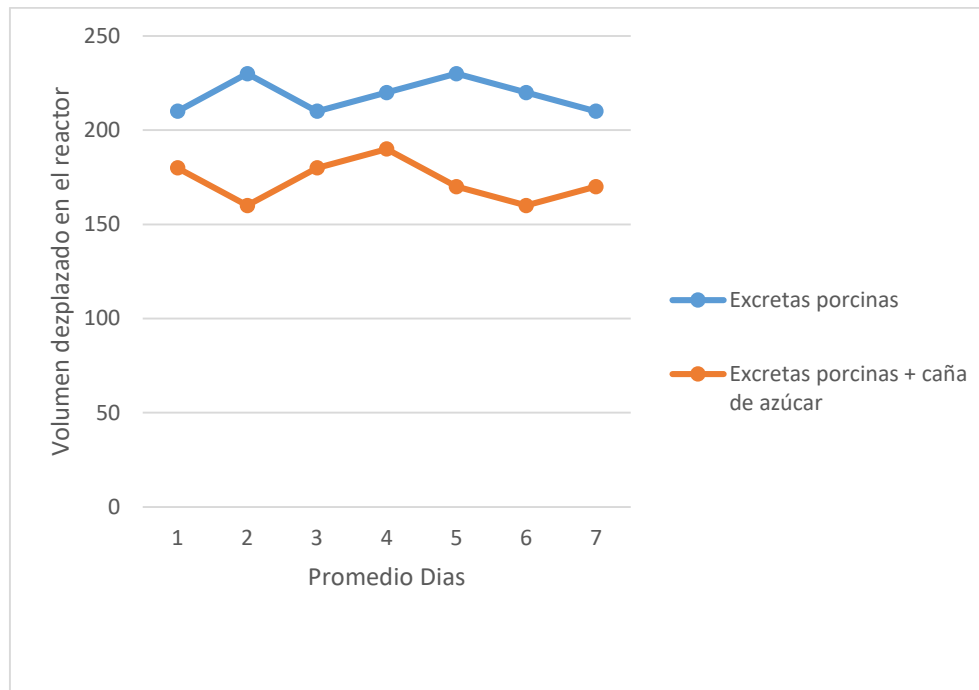
Se le da una garantía al co-sustrato de caña de azúcar a los propietarios de la Finca Agropecuaria Fundo Bonito, ya que afines este co-sustrato por medio de un análisis que la caña de azúcar cumplió un 70% de su fase, se puede llevar a una disposición mejor dándole un mejor manejo a este co-sustrato, con una mayor disposición de este dejándolo más tiempo de degradación para cumplir una fase al 100% de utilidad de este ya que este dispondría una manera más fértil en el momento de verterlo al biodigestor y así se ve en la producción

La medición de biogás mediante desplazamiento de columna

Se puede notar la variación del volumen del desplazamiento en los reactores, el reactor 1 se puede apreciar que hay una gran cantidad de desplazamiento siendo este procedimiento con la semana de las excretas porcinas, en el reactor 2 como se nota en la gráfica hay una baja de desplazamiento ya que este contaba con el co-sustrato que es la caña de azúcar (ver figura 33), de la cual no fluye de igual manera que el biogás con excretas porcinas la variabilidad de co-sustrato es muy mínima. Se le da una garantía al co-sustrato de caña de azúcar a los propietarios de la Finca Agropecuaria Fundo Bonito, ya que afines este co-sustrato por medio de un análisis que la caña de azúcar cumplió un 70% de su fase, se puede llevar a una disposición mejor dándole un mejor manejo a este co-sustrato, con una mayor disposición de este dejándolo más tiempo de degradación para cumplir

una fase al 100% de utilidad de este ya que este dispondría una manera más fértil en el momento de verterlo al biodigestor y así se ve en la producción

Figura 33. Curva de variación del volumen de desplazamiento del biogás del reactor 1 vs reactor 2.



En el reactor 2 para mejorar el desplazamiento de este biogás se debe de tener en cuenta el método de caja seca ya que se debe agregar un pequeño porcentaje de viruta de hierro en esta para que allá un mayor de desplazamiento del biogás, se debe tener en cuenta los días de disposición final de la caña de azúcar para su mayor concentración en el biodigestor.

El mejoramiento de la disposición de sólidos (excretas) en la actividad agropecuaria de la finca.

En cuanto a la contaminación del suelo, los animales excretan entre 60 y 80% de nitrógeno (N) y fósforo (P) ingerido, en concentraciones bajas el N y P tienen gran importancia en cuanto a la fertilidad de los suelos, ya que pueden aumentar la producción de cultivos, además de que son necesarios para el crecimiento de plantas, sin embargo, cuando estos sobrepasan los límites máximos permisibles, el rendimiento del suelo disminuye y puede aumentar la eutrofización de ríos y lagos; Por otra parte, la contaminación del agua implica el deterioro de la calidad física,

química y microbiológica de esta por medio de contaminantes como N, P, metales pesados, microorganismos patógenos, hormonas y medicamentos de uso veterinario. (Makara, 2018); La producción porcina conlleva problemas que afectan al medio ambiente debido a la degradación de los recursos de agua, suelo y aire ocasionados por los residuos que estos generan; Los residuos generados en las Unidades de Producción Porcina (UPP) causan un efecto negativo al medio ambiente, ya que se contamina el aire, suelo y agua; la disposición final de la mezcla de agua y excretas se depositaban en un canal superficial del cual se conducía a la platanera del cual no se manejaba de buen manera.

Figura 34. Condiciones de las porquerizas antiguas.



Se realiza la adaptación de las porquerizas nuevas en Finca Agropecuaria Fundo Bonito de la manera para la ejecución del biodigestor tubular tipo salchicha, de la cual se esperaba darle un mejor manejo a las excretas producidas por los porcinos de los cuales se realizaron unos canales por los costados de a dentro de las porquerizas que llevan esta de mezcla de agua hacia a una caja de almacenamiento, esta mezcla se traslada por medio de una bomba hacia un tanque de 1000 L de la cual este conecta con el ducto de entrada del biodigestor.

Figura 35. Condiciones de las porquerizas nuevas.



Producción de un bioabono

Este es un bioabono líquido que podrá ser usado como acondicionador de suelos en los cultivos de la finca, con todas las características de los fertilizantes orgánicos, que es beneficioso para reemplazar a los fertilizantes químicos y proporciona una serie de efectos beneficiosos para el suelo con sus características físicas, químicas y biológicas. El bioabono (ver Figura 32) está compuesto por sustancias promotoras del crecimiento de las plantas como creatina, auxina y ácido indolacético. También libera lentamente nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio a través de reacciones químicas y biológicas en el suelo para mejorar la fertilidad.

Figura 36. Producción del bioabono.



El beneficio del bioabono ayuda a mejorar la estructura del suelo y estimular su granulación, facilitando la labranza (ver Figura 33). Aumentar la absorción de aire y agua de los suelos, Regular la temperatura del suelo y ayudar a disminuir la erosión y evaporación, Absorber los fertilizantes inorgánicos solubles, reteniéndolos e impidiendo que se pierdan por lavado.

Figura 37. Aprovechamiento del bioabono.



10. Conclusiones

Según las características físico-químicas se determina que la caña de azúcar puede ser utilizada para la digestión anaerobia, ya que los resultados obtenidos de las muestras de ST y SV, se encuentran en el rango establecido con valores de 91.40% de SV y 19.43% de ST, lo que hace que estos residuos sean de una gran degradación de materia orgánica.

El análisis obtenido del co-sustrato se puede utilizar en el biodigestor para generar digestión anaerobia, ya que el manejo que se dio tuvo una producción de metano media por el manejo que se le dio, por lo que se dispone a utilizar el co-sustrato en un tiempo de degradación más alta, para así mismo ver el cambio de fermentación.

La producción de biogás se utiliza a diario por lo que hay una disminución de presión de este por la distancia que hay del biodigestor a la cocina actual de la Finca, por las adaptaciones que se implementaron en la tubería el momento en que le llega la tubería a la cocina hay accesorios (codos y bujes) de los cuales estos afectan al desplazamiento del biogás, del cual tiene una altura adecuada a este para que el biogás viajen con más presión.

Se brinda una garantía del biodigestor junto con el co-sustrato dando un mejor manejo a este por medio de degradación del co-sustrato para verterlo al biodigestor para que se genere una mayor fermentación y una mayor producción de biogás en el biodigestor.

11. Recomendaciones

En el momento de instalar la geo membrana se debe de tener en cuenta en la tubería de entrada y salida al realizar la instalación suficientes refuerzos con amarres de plástico (tiras de neumáticos), hasta que no se evidencie ningún escape de agua o aire.

Previo a la instalación del flanche que es la boquilla de salida del biogás conectando la geo membrana con la tubería, es importante poner retazos de geo membrana del mismo calibre que se trabajó como un tipo de parche por adentro y afuera, ya que con el tiempo puede haber fisuras diminutas, donde se pueden haber fugas por este. Otro aspecto importante que se recomienda para no tener fugas en al momento de la instalación, es adaptar un plástico como recubriendo por todo su encierro para así mismo tener una vida útil más larga de este biodigestor.

Se recomienda tener en cuenta la válvula de presión el cual se instala a 5 metros de la salida de biogás en la tubería, con un recipiente plástico de 2 litros con agua y una la unión de Tee, se coloca un trozo de tubería hasta la mitad de la botella, como trampa de burbujas, en el momento de adaptar la tubería que conduce del biodigestor a la cocina es recomendable utilizar bastante pegamento de en la uniones de la tubería y por último la trampa del ácido sulfhídrico se recomienda no agregar bastante viruta, por la razón de que la presión del gas no alcanza a traspasar toda la trampa, no se recomienda colocar diferentes accesorios (codos) en el momento de instalar la tubería ya que esto ayuda a disminuir la presión del biogás.

No se debe dejar de cargar el biodigestor durante mucho tiempo, ya que esto provocará la interrupción del proceso de digestión y fermentación anaeróbica. Si la operación debe pararse por un tiempo prolongado, se recomienda utilizar materiales orgánicos alternativos de origen animal o vegetal para mantener la carga diaria. Una forma de saber si la eficiencia se reduce debido a la interrupción del proceso es medir la producción diaria de biogás.

Cuando el biodigestor se encuentre en completo funcionamiento se recomienda agregar un poco más de co-sustrato de caña de azúcar en un tiempo estimado de 4 a 5 días en degradación para que tenga una mayor fermentación de esta para la producción del biogás.

12. Referencias bibliográficas

- Acosta, M. & Pasqualino, J. (2014). Potencial de uso de biogás en Colombia. *Teknos Revista Científica*, 14(2), 27. <https://doi.org/10.25044/25392190.468>
- Albarracín, D. (2013). *Diseño de un biodigestor de polietileno para la obtención de biogas a partir del estiércol de ganado en el rancho Verónica*. Tesis de Grado. Riobamba-Ecuador: Escuela Superior Técnica del Chimborazo. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1060183>
- Arango, L.C.N. (2012). *Diseño y construcción de un biodigestor bnaeróbico para el aprovechamiento energético de la biomasa y uso experimental*. Tesis de Grado. Ocaña: Universidad Francisco De Paula Santander. <http://repositorio.ufpso.edu.co/xmlui/handle/123456789/2256>
- Ávila, C. (2016). Uso de biodigestores en la industria pecuaria. *Tesina*, 1–65. Universidad Autónoma del Estado de México. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2902557>
- Carrenõ, J.; Da Silva, D. R.; De Souza, C., & Martinez-Amariz, A. (2018). Production of biogas from organic solid residues, by the use of biodigester in bench scale. *Journal of Physics: Conference Series*, 1126(1), 0–4. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1126/1/012001>
- Daniel, M., & Aldana, M. (2017). *XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIV-SPES), Huaraz, 13 -17.11.2017*. 13–17. <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2017/11/PRESENTACION-XXIV-SPES.pdf>
- Durazno, A.D. (2018). *Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas*. Tesis de Grado. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15445/1/UPS-CT007585.pdf>
- Enríquez, A. & Jurado, M. (2016). Análisis del arranque y estabilización de un biodigestor anaerobio Taiwán en condiciones psicrófilas en el SENA (Nariño-Colombia). *Unimar*, 34(1), 243–259. https://www.researchgate.net/publication/343481918_Analisis_del_arranque_y_estabilizacion_de_un_biodigestor_anaerobio_Taiwan_en_condiciones_psicrofilas_en_el_SENA_Narino-Colombia
- Esposito, G.; Frunzo, L.; Panico, A. & Pirozzi, F. (2012). Producción mejorada de biometano a

- partir de la codigestión de diferentes desechos orgánicos. *Tecnología Medioambiental (Reino Unido)*, 33(24), 2733–2740. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.676077>
- Estrada, D.; Lorenzo-Acosta, Y. & Díaz-Capdesuñer, Y. M. (2014). Tratamiento de residuales porcinos para la producción de biogás. *ICIDCA : Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 48(3), 16–21. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223132853003.pdf>
- FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF. (2011). Manual del Biogás. *Proyecto CHI/00/G32*, 120. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Forget, A. (2011). *Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares , con enfoque en biodigestores tubulares*. Manual Técnico. 1–83.
- García, H.; Corredor, A.; Calderón, L. & Gómez, M. (2013). *Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia*. Informe Técnico. Fededesarrollo: Centro de Investigación Económico y Social. <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/331>
- Torres-Martínez, A.; Gómez-López, E.N.; Rodríguez-reyes, J.S.(2017). *Implementacion de un biodigestor para el aprovechamiento de los residuos de las granjas porcinas en el municipio de tibana*. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15446/1/Proyecto%20Biodigestor.pdf>
- Herrero, J. M. (2006). *Biodigestores de Bajo Costo Para Producir Biogás y Fertilizante Natural a Partir de Residuos Orgánicos*. México: Editorial Ideas. <http://www.astridforget.com/wp-content/uploads/2015/01/Manual-t%C3%A9cnico-y-difusi%C3%B3n-AF-biodigestores-VF-110617.pdf>
- Huertas, D.; Cubillos, D.; Martínez, D. & Mosquera, N. (2021). Fundamentos del proceso de biodigestión anaerobia y uso en el medio rural: excretas de animales (p 17-46). En E. González, E. Forero (eds). *Biogás: Nanotecnología, Beneficios y producción* (317 p). Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Colección Álvares Lleras No 40).
- IDEAM. (2018). Características Climatológicas De Ciudades Principales Y Municipios Turísticos. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 48. <https://doi.org/http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>
- Viquez Arias, J. (2018). ¿Como diseñar un filtro para biogás? La remoción de H₂S con óxido de

- hierro. *Revista RedBioLAC*, 2, 30–31. <https://www.wisions.net/files/uploads/Revista-Redbiolac-2018.pdf>
- Lara, S.E.; Torregrosa Sánchez, J.A. & Sanitario, I.A. (2009). *Diseño y evaluación de biodigestores utilizando excretas de cerdo y ganado vacuno generadas en la granja Club Campestre de Santa Marta*. Tesis de Grado. Universidad de Magdalena. <http://repositorio.unimagdalena.edu.co/jspui/handle/123456789/2011>
- Marti, J. (2019). Experiencias Latino Americanas en la implementación de estrategias para democratizar los biodigestores entre los pequeños y medianos productores agropecuarios. In *Climate Technology Centre and Network (CTCN)-UNFCCC. Ecuador*.
- Martínez, G.L. (2003). Biodigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Alternativa energética y fuente de trabajo. *Revista Tecnura*, 7(13), 31–43. <https://doi.org/10.14483/22487638.6187>
- MINISTERIOENERGIA. (2012). *Tipos de biodigestores*. Bogotá: Ministerio de Energía - República de Colombia. https://autoconsumo.minenergia.cl/?page_id=524
- Miranda, A.P.; Junior, J.D.L.; Thomaz, M.C.; Pereira, G.T. & Fukayama, E.H. (2012). Biodigestión anaeróbica de heces porcinas en las etapas inicial, crecimiento y finalización alimentadas con dietas formuladas a base de maíz o sorgo. *Engenharia Agricola*, 32(1), 47–56. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100006>
- Olaya, Y. & González, L. (2012). *Fundamentos para el diseño de biodigestores. Documento de Trabajo*. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/10762/luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Osejos, M.A.; Jaramillo-Véliz, J.J.; Merino-Conforme, M.V.; Quimis-Gómez, A.J. & Alcívar-Cobeña, J.L. (2018). Producción de biogás con estiércol de cerdo a partir de un biodigestor en la Granja EMAVIMA Jipijapa – Ecuador. *Dominio de Las Ciencias*, 4(1), 709. <https://doi.org/10.23857/dc.v4i1.788>
- López-Pérez, A.C. (2010). *Valorización del estiércol de cerdo a través de la producción de Biogás*. Colombia: Asociación Colombiana de Porcicultores-Fondo Nacional de la Porcicultura. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/1984>
- PNUD. (2016). *Desde los ODM hasta el desarrollo sostenible para todos*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2–73. <https://www.sdgfund.org/es/de-los-odm-los-ods>
- Magana, J.L; Torres, E.; Martínez, M.T. & Hernández, R. (2006). Producción de Biogás a Nivel

- Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras. *Acta Universitaria*, 16(2), 27–37. <https://doi.org/10.15174/au.2006.185>
- Ramírez, L.; Quijano, D. & Rojas, C. (2021). Utilización de residuos agrícolas como co-sustrato en el proceso de digestión anaerobia: residuos de plátano (p 120-148). En E. González, E. Forero (eds). *Biogás: Nanotecnología, Beneficios y producción* (317 p). Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Colección Álvaro Lleras No 40). https://www.researchgate.net/publication/351264613_Utilizacion_de_residuos_agricolas_como_co-sustrato_en_el_proceso_de_digestion_anaerobia_residuos_de_platano
- Rojas, C.; Ochoa, L. & Gutiérrez, L. (2020). Use of agricultural residues for a sustainable development in Meta Region: Rice Husk as biogás source (p 79-94). *Naturaleza, Ciudad y Comunidad* (100 p). Bogotá: Ediciones USTA. http://www.jseejournal.com/media/196/attachment/Agricultural%20residues_Aj.%20Barz_p.%2021-27.pdf
- Rojas, C.J; Mosquera, Y.N.; Acosta, L.J.; Carrillo, M.F.; Parra, M.A. & Lara, L. . (2020). Estudio integral de un biodigestor desde el punto de vista microbiológico y uso del biol como bioabono en Los Llanos Orientales de Colombia. *Revista RedBioLAC*, 4, 107-112. https://www.researchgate.net/publication/351062194_Estudio_integral_de_un_biodigestor_desde_el_punto_de_vista_microbiologico_y_uso_del_biol_como_bioabono_en_Los_Llanos_Orientales_de_Colombia
- Rutamu, I. (1999). Biodigestores de bajo costo para pequeños productores lecheros de pastoreo cero en Tanzania. *Investigación Ganadera Para El Desarrollo Rural*, 11(2), 17–27.
- Sierra, C. A. & Acevedo, R.L. (2013). Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación. *Ingenium Revista de La Facultad de Ingeniería*, 14(28), 6. <https://doi.org/10.21500/01247492.1330>
- Soliu, G.A. & Onunka, C. (2019). El uso de combustible sólido para la producción de biogás en un biodigestor. *Serie de Conferencias de La Revista de Física*, 1378(2). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022093>
- Stobbia, D.; Fernández, B.V.; Eimer, G. & Ledesma, A. (2014). Biogas como Fuente de energia a partir de residuos organicos Domiciliarios utilizando un Biodigestor Piloto tipo Hindú modificado en la Universidad Nacional de Córdoba. *Revista Tecnologia y Ciencia*, 25, 5–10.

<https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/rtyc/article/view/460>

- Valdes Solano, D.M.; Alba Maldonado, J.M. & Arenas, A.A. (2019). Biodigestión: Uso alternativo de materia vegetal para la obtención de biocombustible en la provincia de Ocaña, Colombia. *Revista de Física: Serie de Conferencias*, 1257(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1257/1/012021>
- Vaquerano-Pineda, N.; Salazar-Rojas, T. & Porras-Acosta, M. (2016). Medición automática del metano en biogás, por columnas de desplazamiento. *Revista Tecnología En Marcha*, 29(8), 86. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2988>
- VDI. (2016). *Fermentation of organic materials – characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*. Publisher: Verlag Des Vereins Deutscher Ingenieure, VDI 4630.
- Vivan, M.; Kunz, A.; Stolberg, J.; Perdomo, C. & Techio, V. H. (2010). Eficiencia de la interacción del biodigestor y los estanques de estabilización en la eliminación de contaminantes en el estiércol porcino. *Revista Brasileña de Ingeniería Agrícola y Ambiental*, 14(3), 320–325. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662010000300013>
- Zárate, J. & Rodríguez, M.P. (2021). Evaluación de productos de biodigestión y su impacto en la economía campesina (p 192-230). En E. González, E. Forero (eds). *Biogás: Nanotecnología, Beneficios y producción* (317 p). Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Colección Álvaro Lleras No 40). https://www.academia.edu/47919051/Biog%C3%A1s_Nanotecnolog%C3%ADa_Beneficios_y_Producci%C3%B3n
- Zúñiga, C. (2007). *Biodigestores*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10722/Biodigestores.pdf?sequence=1>

13. Anexos

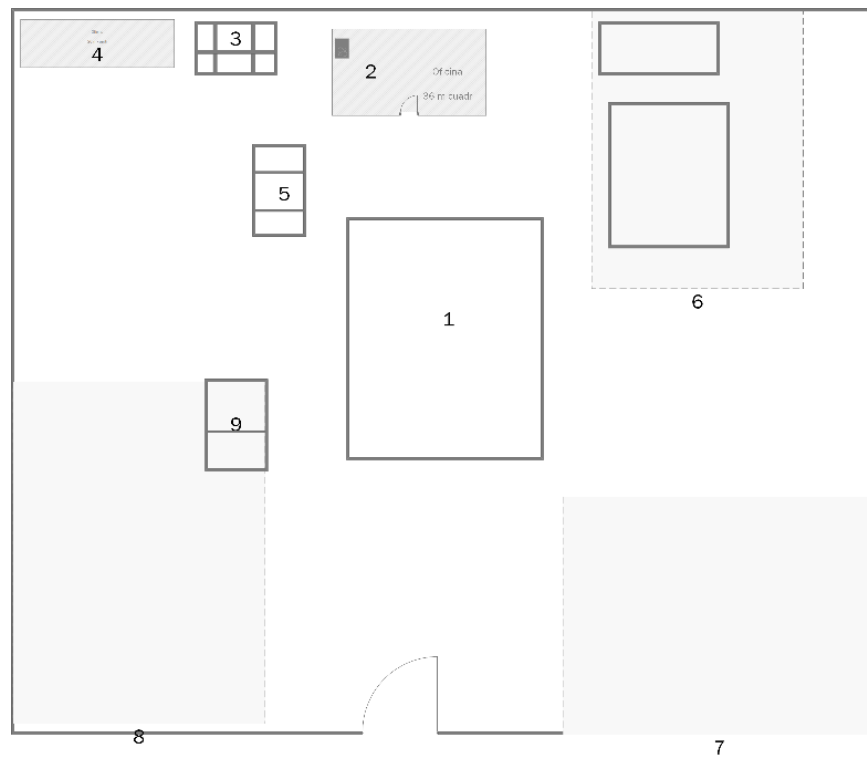
Anexo A. Marco legal

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	ARTICULO
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.	Art 5.-33 Debido a las entidades competentes que deben coordinar y promover programas de sustitución de los recursos naturales no renovables para desarrollar tecnologías de energías como los biodigestores los cuales no son contaminantes ni degradantes como los dicta la norma.
LEY 697 DE 2001	Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.	Art 1. Este artículo fomenta el uso racional y eficiente de la energía, específicamente promoviendo las energías no convencionales como la energía de biomasa, la cual es una manera de producir energía sostenible con el medio ambiente, para así asegurar el abastecimiento energético.
Ley 1715 de 2014	Por medio de la cual se regula la integración de las	Art 17. Las corporaciones autónomas regionales, están

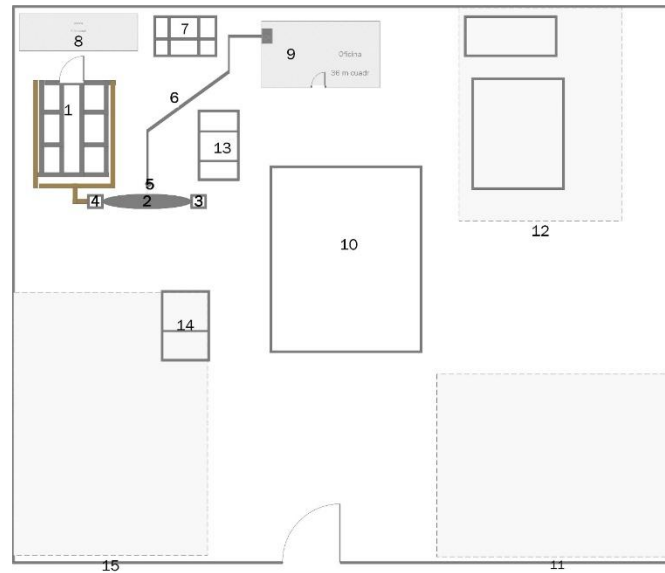
	energías renovables no encargadas de fomentar el convencional al Sistema Energético Nacional.	aprovechamiento de la biomasa y evitar quema o el vertimiento de residuos agrícolas.
Decreto 3683 de 2003	Por el cual se reglamenta la Ley 697 de 2001 y se crea una Comisión Intersectorial.	Art 1. Este se relaciona con la ley 697 de 2001, con el fin de asegurar el abastecimiento energético y promover fuentes no convencionales de energía como la biomasa.
GTC 213 de 2011	Guía de sostenibilidad en las etapas de producción y procesamiento de biomasa en la cadena de biocombustibles en Colombia.	

Anexo B. Materiales para la construcción de un biodigestor

Material	Descripción
Film negro UV	Polietileno UV, que servirá para hacer el biodigestor.
Tubos PVC 6"	Tubería para el ducto de entrada y salida
Tubos PVC ¾ "	Tubería para transporte del biogas a la cocina
Codos PVC ¾ "	Para empalme en las conexiones
Unión T PVC ¾ "	Conexión para el transporte del biogás
Válvula bola PVC ¾ "	Conexión para controlar salida de gas
Unión PVC ¾ "	Para empalme entre los tubos
Buje PVC ¾ " x ½ "	Para la adaptación de la salida del biogás
Unión PVC ½ "	Para la adaptación de la salida del biogás
Codo galvanizado ½"	Para la adaptación de la salida del biogás
Niple galvanizado ½"	Para la adaptación de la salida del biogás
Cemento x 50 Kg	Para la construcción del biodigestor
Arena	Para la construcción del biodigestor
Varilla de hierro ½" x 6 m	Para la construcción del biodigestor
Herramientas	Llave de tubo, Segueta , Pala, Martillo,
Otros materiales	Teflón, Pegante PVC, Limpiador PVC, Pegante PL 285, Viruta de acero

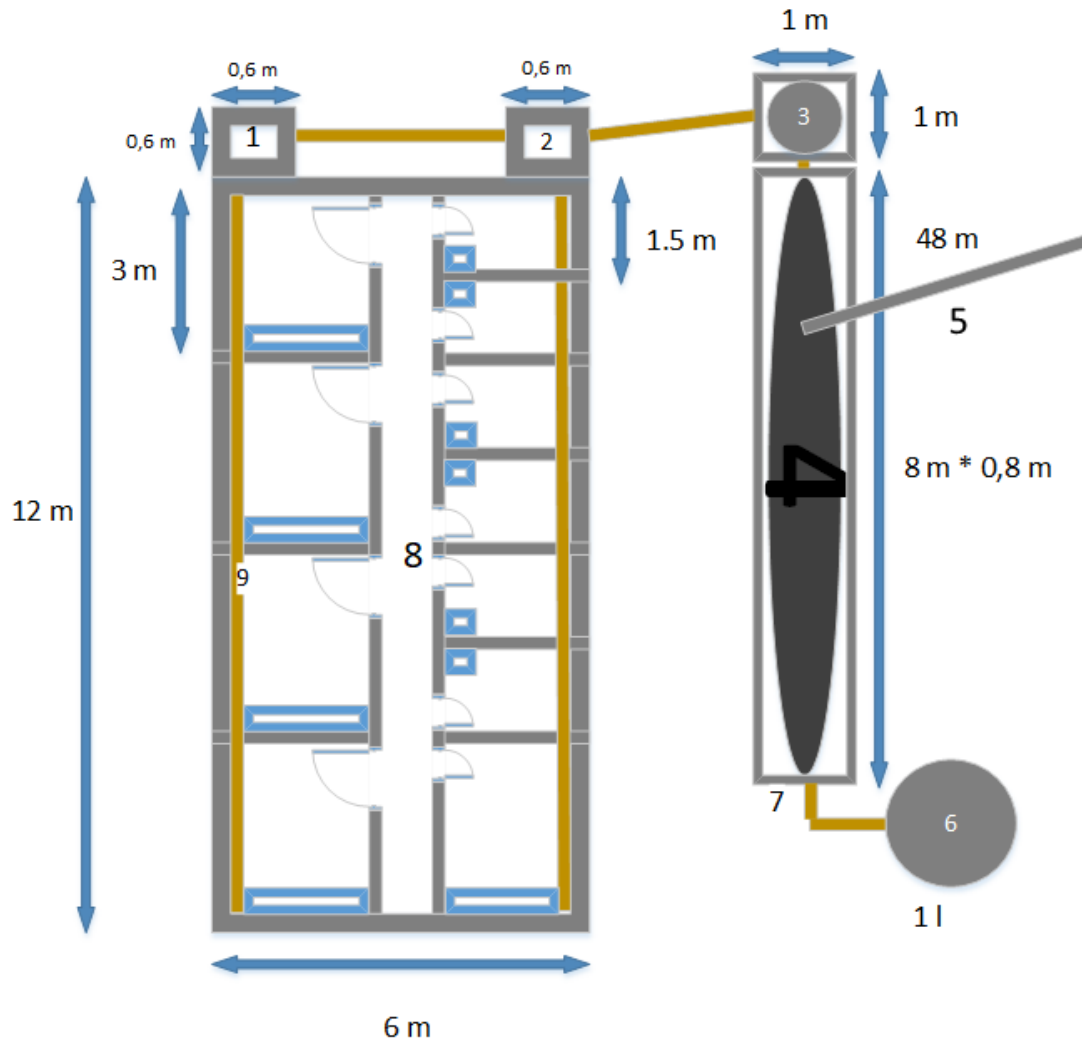
Anexo C. Diagnóstico de las condiciones del lugar

1	Casa
2	Cocina
3	Corraleja de porcinos
4	Platanera
5	Pesebreras
6	Galpón de Gallinas
7	Potrero de becerros
8	Potrero
9	Corrales

Anexo D. Ubicación óptica para el biodigestor

1	Corraleja nueva porcinos
2	Biodigestor (Gas producido y mezcla de digestión anaeróbica)
3	Cámara de entrada (carga de mezcla)
4	Cámara de salida (material de descarga)
5	Salida de biogás
6	Tubería (adecuada para gas)
7	Corralejas antiguas de porcinos
8	Platanera
9	Cocina
10	Casa
11	Potrero de bestias
12	Galpón de Gallinas
13	Galpón de Pollos
14	Pesebreras

15 Potrero de Bovinos

Anexo E. Dimensiones del biodigestor y las porquerizas


1 Caja de almacenamiento

2 Caja de almacenamiento

3 Caja de entrada

4 Biodigestor

5 Tubería del biogás

6 Tanque del bioabono

7	Tubería de salida del bioabono
8	Cocheras
9	Canal de desagüe

Anexo F. Tablas

Tabla 11. pH del sustrato (excretas porcinas)

	Cantidad	pH	Temperatura
Mixta	20 gr	8,8	26,2 °C
Grandes	21 gr	8,6	26,4 °C
Medianos	22 gr	8	25,8 °C
Pequeños	23 gr	8,8	25,9 °C
Líquida	24 gr	6,9	22,8 °C
	Promedio	8,22	
	Desviación estándar	0,81	

Nota: pH del sustrato (excretas porcinas)

Tabla 12. Conductividad del sustrato (excretas porcinas)

	Cantidad	Conductividad	Temperatura
Mixta	20 gr	4,4	26,0 °C
Grandes	21 gr	3,12	25,9 °C
Medianos	22 gr	2,65	25,8 °C
Pequeños	23 gr	4,69	26 °C
Líquida	24 gr	3,64	25,1 °C
	Promedio	3,7	
	Desviación estándar	0,85	

Nota: Conductividad del sustrato (excretas porcinas)

Tabla 13. Producción de metano del biodigestor con solo excretas

Gas Metano

Muestras	CH₄	Unidad	Promedio CH₄
1	47	%LEL	
1	49	%LEL	48,33
1	49	%LEL	
2	47	%LEL	
2	45	%LEL	46,00
2	46	%LEL	
3	50	%LEL	
3	50	%LEL	49,67
3	49	%LEL	
4	38	%LEL	
4	49	%LEL	45,33
4	49	%LEL	
5	43	%LEL	
5	38	%LEL	41,67
5	44	%LEL	
6	47	%LEL	43,33
6	34	%LEL	
6	49	%LEL	
7	34	%LEL	43,00
7	45	%LEL	
7	50	%LEL	
Promedio			45,33
Desviación estándar			2,92

Nota: Producción de metano del biodigestor con solo excretas

Tabla 14. Producción de metano del biodigestor con el co-sustrato (caña de azúcar)

Gas Metano / Caña de Azúcar			
Muestras	CH₄	Unidad	Promedio CH₄
1	34	%LEL	41,00

1	41	%LEL	
1	48	%LEL	
2	47	%LEL	44,33
2	43	%LEL	
2	43	%LEL	
3	43	%LEL	43,33
3	44	%LEL	
3	43	%LEL	
4	46	%LEL	45,33
4	40	%LEL	
4	50	%LEL	
5	41	%LEL	42,67
5	40	%LEL	
5	47	%LEL	
6	50	%LEL	46,33
6	43	%LEL	
6	46	%LEL	
7	45	%LEL	44,33
7	39	%LEL	
7	49	%LEL	
Promedio			43,9
Desviación estándar			1,76

Nota: Producción de metano del biodigestor con el co-sustrato (caña de azúcar)

Tabla 15. Volumen de desplazamiento del biogás

Días	Volumen desplazado en el Reactor 1 * (ml)	Volumen desplazado en el Reactor 2*(ml)
1	210	180
2	230	160
3	210	180
4	220	190
5	230	170
6	220	160
7	210	170
Promedio	218,57	172,85
Desviación estándar	±8,99	±11,12

Nota: Volumen de desplazamiento del biogás del reactor 1 y 2