



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN-MANAGUA

## TESIS DE GRADO

Aprovechamiento energético del estiércol bovino para cocción de alimentos mediante biodigestor continuo en La finca Aguas Frías, comunidad La Tunosa, Estelí

García, N; Sevilla, A; Tercero, C.

### Tutor

MSc, Jose Antonio Castillo Hernández

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL DE ESTELÍ

*¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!*



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN-MANAGUA

## Centro Universitario Regional de Estelí CUR-ESTELÍ

Recinto Universitario “Leonel Rugama”

Departamento Ciencias Tecnológicas y salud

Aprovechamiento energético del estiércol bovino para cocción de alimentos  
mediante biodigestor continuo en La finca Aguas Frías, comunidad La Tunosa,  
Estelí

Trabajo de investigación para optar al grado de  
Ingeniero en energías renovable

### **Autores**

Neftalí Enmanuel García Marín

Angie Natalia Sevilla

Cynthia Melissa Tercero Cáceres

### **Tutor**

**MSc José Antonio Castillo Hernández**

Diciembre, 2025





## **Dedicatoria**

Neftalí

A James Miguel Pineda Sevilla, quien en vida fue un compañero incondicional, desde la niñez hasta la juventud.

Angie

Dedico este trabajo a Dios, porque es quien me dio la fuerza y la sabiduría cada día para continuar, sin su sustento no estaría aquí hoy. A mis padres William y Ena por todo el esfuerzo que han hecho para que yo cumpliera mis metas, este logro es totalmente suyo. A mis hermanos Rosy y Jeremy y al resto de mi familia por siempre apoyarme.

Cynthia

A Dios, por ser quien me encaminó a lo largo de este trayecto estudiantil. A mis padres, por su acompañamiento y amor, por impulsarme siempre a avanzar. A mi abuela, cuya memoria vive en mi corazón, a toda mi familia por creer en mí y por regalarme su apoyo más sincero.

## **Agradecimiento**

Agradecemos primeramente a Dios, quien ha sido nuestro sustento y guía en este camino. A nuestros padres por su esfuerzo y apoyo incondicional, por siempre motivarnos a seguir adelante. A nuestra familia en general por sus buenos deseos y creer en nosotros. A nuestros maestros a lo largo de estos cinco años que han aportado con sus enseñanzas que contribuyeron a nuestra formación académica y profesional. A nuestra universidad UNAN Managua CUR- Estelí por sus servicios brindados.



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN-MANAGUA

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL, ESTELÍ  
“2025: Eficiencia y Calidad para seguir en victorias”  
Departamento de Ciencias de la Educación y Humanidades

### CARTA AVAL DEL TUTOR

Estelí, 01 de diciembre de 2025

Por medio de la presente, en calidad de tutor(a) del trabajo de modalidad de graduación titulado: “**Aprovechamiento energético del estiércol para la cocción de alimentos mediante biodigestor continuo en la finca Aguas Frías, comunidad la tunosa, Estelí**”, elaborado por los estudiantes:

Nombres y Apellidos	Número de Carné
Neftalí Enmanuel García Marín	21513513
Angie Natalia Sevilla	21510653
Cynthia Melissa Tercero Cáceres	21505703

Estudiantes de la carrera de **Ingeniería en energías renovables**, hago constar que he brindado acompañamiento académico y metodológico durante el desarrollo de dicho trabajo, cumpliendo con lo establecido en el cronograma y en la normativa institucional vigente. Asimismo, avalo que el trabajo cumple con los requisitos formales, científicos y éticos exigidos por la Universidad, en cumplimiento de la modalidad de graduación correspondiente.

Atentamente,

MSc. José Antonio Castillo Hernández

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-7135-3021>

UNAN-Managua/CUR-Estelí

CC/

¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!

Barrio 14 de abril, contiguo a la subestación de ENATREL, Tel 27137734, Ext 7424  
dceh.curesteli@unan.edu.ni

## Resumen

La investigación se enmarcó en un enfoque cuantitativo con diseño descriptivo- transversal, mediante el cual se caracterizó la disposición de biomasa, la demanda energética y los parámetros técnicos necesarios para el diseño del reactor. Se determinó que la finca produce aproximadamente 300 kg/día de estiércol fresco, de los cuales 150kg/días son aptos para biodigestión. El contenido de sólidos totales y sólidos volátiles permitió estimar la carga orgánica efectiva y el potencial de producción de metano. Se calculó la demanda energética para cocción en 3m<sup>3</sup>/ días de gas actualmente y 4.8m<sup>3</sup>/día proyectado a 5 años. Con base en los parámetros operativos (tiempo de retención 40 días, densidad del sustrato, dilución recomendada y un factor de seguridad del 5%) se dimensionó un biodigestor con volumen total de 7,800 litros, complementados con un mezclador de 400 L, un recolector de efluente de 1320 L, tuberías de 20-50 mm y una bomba con capacidad de 200L-min. Los resultados indican una producción estimada de 15 m<sup>3</sup>/día de biogás, suficiente para cubrir la demanda actual y futura, reducción del consumo de gas butano y las emisiones de CO<sub>2</sub>. El análisis financiero mostró un VAN positivo y un TIR del 22%, demostrando la viabilidad económica de la propuesta. El biodigestor presenta una solución eficiente y ambientalmente sostenible, replicable en unidades ganaderas con condiciones similares.

Palabras claves: Biodigestor anaeróbico, Biogás, Digestión anaeróbica de flujo continuo

## Abstract

The research was conducted using a quantitative approach with a descriptive–cross-sectional design, through which the availability of biomass, the energy demand, and the technical parameters required for the reactor design were characterized. It was determined that the farm produces approximately 300 kg/day of fresh manure, of which 150 kg/day are suitable for biodigestion. The content of total solids and volatile solids allowed estimating the effective organic load and the potential methane production. Energy demand for cooking was calculated at 3 m<sup>3</sup>/day of gas under current conditions and 4.8 m<sup>3</sup>/day projected within five years. Based on operational parameters (40-day retention time, substrate density, recommended dilution, and a 5% safety factor), a biodigester with a total volume of 7,800 liters was sized, complemented with a 400-L mixer, a 1,320-L effluent collector, 20–50 mm piping, and a pump with a capacity of 200 L/min. The results indicate an estimated production of 15 m<sup>3</sup>/day of biogas, sufficient to meet current and future demand, reducing butane gas consumption and CO<sub>2</sub> emissions. The financial analysis showed a positive NPV and an IRR of 22%, demonstrating the economic feasibility of the proposal. The biodigester represents an efficient and environmentally sustainable solution, replicable in livestock production units with similar conditions.

**Keywords:** Anaerobic biodigester, Biogas, Continuous-flow Anaerobic digestion.

## Índice

1.	Introducción .....	1
2.	Antecedentes .....	2
	Antecedente Nacional.....	2
3.	Planteamiento del problema .....	5
4.	Justificación .....	7
5.	Objetivos de investigación .....	8
5.1.	Objetivo General.....	8
5.2.	Objetivos específicos .....	8
6.	Limitaciones del estudio .....	9
7.	Hipótesis .....	10
8.	Operacionalización de Variables .....	11
9.	Marco Teórico .....	13
9.2.1	Hidrólisis.....	14
9.3	¿Qué es un biodigestor? .....	15
9.4	Tipos de biodigestores.....	16
	Tipos de biodigestores anaerobios domésticos: .....	16
9.4.1.	Biodigestores de domo fijo y tambor flotante.....	16
9.5	Relación carbono/nitrógeno del sustrato.....	17
9.6	Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles .....	18
9.7	El pH.....	19
9.7.1	Efectos del pH.....	20
9.8	Subproductos del tratamiento anaeróbico: .....	21
9.8.1	Biogás .....	21
9.8.2	Efluente .....	22
9.9.3.	Agitadores y mezcladores .....	24
9.10.	Influencia del excremento vacuno en un biodigestor anaeróbico .....	25
10.	Diseño metodológico. ....	26
	Caracterización del área de estudio.....	26

10.1.	Población y selección de la muestra .....	27
11.1	Técnicas, instrumentos y procedimientos para la recolección de datos.....	28
12.1	Confiabilidad y validez de los instrumentos.....	29
12.2	Técnicas, instrumentos y procedimientos para el procesamiento y análisis de datos	29
13	Análisis y discusión de resultados.....	31
13.1.1	Cálculo de generación de estiércol diario de la finca. ....	31
13.1.2.	Cálculo de sólidos volátiles (SV).....	32
13.1.3.	Volumen de estiércol disponible .....	33
13.4.4	Componentes del biodigestor.....	44
14.	Conclusiones .....	55
14	Recomendaciones.....	56
15	Referencias Bibliográficas .....	57
16	Anexos.....	59

## Índice de tablas

Tabla 1. Operacionalización de variables -----	12
Tabla 2 Relación carbono/nitrógeno de algunos de los sustratos más comunes -----	18
Tabla 3 Contenido de sólidos de distintos sustratos -----	19
Tabla 4 Estiércol fresco disponible en la zona de estudio -----	31
Tabla 5 Dimensiones del biodigestor -----	41
Tabla 6 Emisiones de CO <sup>2</sup> -----	42
Tabla 7 Emisiones producidas por el consumo de gas en la finca Aguas Frías -----	43
Tabla 8 Dimensiones reales del agitador -----	48
Tabla 9 Costo económico de cada componente del biodigestor -----	48
Tabla 10 Costos económicos de materiales para la implementación del biodigestor -----	49
Tabla 11 Costos de tuberías -----	50
Tabla 12 Costo de equipos a instalar -----	51
Tabla 13 Costos de mano de obra -----	52
Tabla 14 Cálculos de VAN y TIR -----	53

## Índice de figuras

Figura 1 Ubicación geográfica de la Finca Aguas Frías -----	26
Figura 2 Ganado existente en el área de estudio -----	32
Figura 3 Quema de sólidos volátiles -----	33
Figura 4 Muestra de estiércol fresco recolectada en la zona de estudio -----	34
Figura 5 Resultados de consumo de gas actual -----	35
Figura 6 Resultados de consumo de gas con proyección a futuro -----	37
Figura 7 Marca de manómetro seleccionado -----	44
Figura 8 Marca de la válvula seleccionada -----	46
Figura 9 Tubería seleccionada marca PEAD -----	47
Figura 10 Diagrama del biodigestor -----	60
Figura 11 Diagrama del esquema de interconexión de tuberías -----	60
Figura 12 Llenado de pequeños biodigestores de prueba con distintas relaciones de sustrato. -----	61
Figura 13 Relación 1:1 y 1:2 en mini biodigestores de prueba -----	61
Figura 14 Producción de biogás a los 20 días de retención con la relación 1:2 -----	62

## 1. Introducción

La presente investigación tiene como objetivo central dimensionar un biodigestor anaeróbico de flujo continuo, tipo campana fija en la finca Aguas Frías, ubicada en la Tunosa, Estelí con un enfoque primordial en el aprovechamiento energético del estiércol bovino para la cocción de alimentos.

Esta iniciativa surge como una respuesta a la problemática del uso de combustibles tradicionales en la finca, donde el consumo de leña y gas butano genera impactos negativos como la deforestación y la liberación de emisiones significativas de dióxido de carbono. A su vez, el estiércol bovino, del cual la finca produce aproximadamente 300kg/día, no se aprovecha adecuadamente, acumulándose y generando malos olores y la liberación de gas metano, un potente contaminante. Ante un intento fallido previo al instalar un biodigestor debido a errores de manipulación y dimensionamiento, se hace necesaria la necesidad de un sistema de biogás correctamente diseñado.

La investigación busca facilitar una respuesta sostenible y limpia para la administración de residuos y generación de energías renovables. El biodigestor permitirá la transformación de estiércol en biogás, el cual se utilizará para la cocción de alimentos y como fuente de energía auxiliar. Además, el subproducto resultante, el digestato podrá emplearse como fertilizante orgánico cerrando el ciclo de reutilización de residuos y mejorando la fertilidad del suelo.

En el documento se presenta los objetivos, fundamentos teóricos, cálculos técnicos y análisis de viabilidad económica para el diseño del biodigestor, asegurando que la propuesta sea factible y eficiente para el contexto de la finca.

## 2. Antecedentes

### Antecedente Nacional

Según Munguía y Gadea (2013), el biogás proveniente de la biomasa contribuye una alternativa energética renovable con potencial para disminuir el uso de combustibles fósiles y las emisiones de contaminantes. En este estudio de pre factibilidad para una planta de cogeneración en el complejo san Martín S.A, ubicado en Nandaime, evaluaron la viabilidad técnica, energética y financiera de implementar un sistema capaz de suplir la demanda eléctrica y térmica del matadero. Los autores determinaron que el proyecto es rentable, aun cuando no se aproveche la energía térmica generada como subproducto. Co base en la metodología aprobada por la MDI estimaron que la planta podría evitar anualmente 462.6862 libras de NO<sub>2</sub> y 580.4311 libras de CO<sub>2</sub>. Además, identificaron un potencial de 2MW eléctricos equivalente a 1,216,137 KWh/mes, junto con 74,253 KWh/día de energía térmica.

El estudio de Averzuz Siles y Cruz Aguirre (2015), desarrollado en la hacienda santa rosa de la UNA en Managua, evaluó la producción de biogás y el grado de descontaminación generando por dos biodigestores tubulares plásticos alimentados con estiércol porcino y bovino. La investigación tuvo como finalidad analizar el rendimiento energético de ambos sistemas y determinar la calidad del efluente tratado. Para esto se midieron variables como volumen de biogás, cantidad de estiércol y agua en efluente, aplicando una prueba para el análisis comparativo. Tras la instalación de los biodigestores, se realizó un seguimiento continuo para identificar el tiempo de retención hidráulica. Los resultados indicaron producciones diarias de 550 litros para el biodigestor porcino y 240 litros para el bovino. Finalmente, se confirmó que ambos biodigestores operaron eficazmente y lograron un adecuado nivel de descontaminación evidenciando su utilidad en la gestión de residuos.

Castillo (2023) plantea en su trabajo investigativo el adaptar una cocina industrial cuyo funcionamiento es a base de gas licuado de petróleo a operar con biogás. Para la comparación de datos se utilizó el método estadístico de análisis de variancia bifactorial con interacción y de ese modo comparar ver la eficiencia entre el gas licuado y el biogás. El biodigestor implementado para la producción de biogás fue uno de 12 m el cual fue relleno con estiércol de ganado bovino. Entre los resultados obtenidos se identificó el gas licuado de petróleo es más eficiente en comparación con el uso del biogás obtenido a base de excretas

de vaca, no obstante, se determinó que el biogás no es igual de nocivo con el medio ambiente a como lo es el gas licuado, ya que se evita el uso indiscriminado de leña. Por último, el biogás salvaguarda la salud respiratoria de las personas que lo trabajan.

### **Antecedente internacional.**

Arias (2017), señala que la biomasa forestal puede convertirse mediante distintas tecnologías para producir energía y generar insumos que sustituyen a los derivados del petróleo. Su estudio analiza plantaciones energéticas establecidas con clones de alto rendimiento bajo diferentes densidades de siembra, con el propósito de evaluar su comportamiento y su capacidad para generar biomasa utilizable. Además, presenta un método de evaluación orientando a comprender como estas plantaciones influyen en las propiedades tecnológicas del material y en su transformación energética, especialmente mediante gasificación. El autor destaca que la conversión termoquímica es aplicable a varios tipos de biomasa e incluyen procesos como combustión, gasificación, pirolisis. De estas opciones, la combustión constituye la tecnología más consolidada, mientras que la gasificación y la pirolisis han adquirido mayor importancia por su potencial.

El artículo de engineering in life sciences (2011), analiza la digestión anaeróbica como alternativa para el aprovechamiento del estiércol ganadero en la producción de biogás. La revisión compara distintas configuraciones de reactores empleados en proceso anaeróbicos. También considera como parámetros la temperatura y la carga orgánica influyen en el metano generado. Entre las tecnologías analizadas se incluyen reactores de flujo pistón. El artículo incorpora además configuraciones ASBR y la digestión en fases de temperatura. Los resultados indican que estas alternativas pueden adaptarse eficazmente el proceso anaeróbico. Los principales indicadores de desempeño incluyen la producción de biogás y la reducción de sólidos. También se valora la estabilidad operativa con tiempos de retención cortos. En conjunto, el estudio confirma que la digestión anaeróbica es una tecnología eficiente y flexible.

Pérez (2021) en su tesis cuyo trabajo se basó en determinar la producción y evaluación de biogás en un biodigestor a base de estiércol de vaca. El diseño de su investigación fue

experimental, aplicándose tres tratamientos en el cual la relación de los tres fue estiércol: agua. Los resultados obtenidos revelan que el tratamiento 3 produjo un pH de 7, de igual manera se encontró una mayor cantidad de nutrientes en su composición los cuales fueron nitrógeno, fósforo y potasio, con un 71% de concentración en la relación de estiércol: agua número 3, seguido por el segundo biodigestor con la mezcla 2 el cual poseía un 56% de nutrientes. Se concluyó en que a una mayor concentración de estiércol de vaca empleado el pH que se producirá dentro del biodigestor será superior de 7, pero a una menor cantidad el pH tendrá un promedio de 5 a 6 respectivamente.

### **3. Planteamiento del problema**

#### **Caracterización:**

#### **Contaminación al utilizar leña o gas butano, emisiones de CO<sup>2</sup>, deforestaciones.**

El uso de leña y gas butano como principales fuentes de energía en las actividades domésticas y productivas genera diversos impactos negativos en el entorno. El consumo de leña contribuye a la deforestación, afectando los ecosistemas y reduciendo la cobertura forestal. Por otro lado, tanto la leña como el gas butano producen emisiones significativas de dióxido de carbono y otros contaminantes atmosféricos, lo que incrementa los niveles de contaminación ambiental y afecta la salud de las personas. Esta problemática evidencia la necesidad de buscar alternativas energéticas más limpias y sostenibles que reduzcan la dependencia de combustibles tradicionales.

**Delimitación del problema:**

En la finca Aguas Frías, ubicada en la comunidad la Tunosa Estelí, se intentó instalar un biodigestor con el objetivo de sustituir el uso de leña para la cocción y preparación de alimentos. Sin embargo, el sistema no funcionó adecuadamente debido a una mala manipulación en la proporción de la mezcla y en las dimensiones del biodigestor. La finca cuenta con 40 vacas que produce alrededor de 300kg de estiércol al día, lo que equivale 9,000kg al mes y 108,000kg al año, pero esta cantidad no se aprovechó por que el sistema no funcionó como se esperaba.

Como consecuencia de esta falla técnica, la familia retomó el uso de gas butano, lo que evidencia que el problema no es únicamente la contaminación o el uso de combustible tradicionales, si no la falta de un sistema de biogás correctamente diseñado, implementado y manejado. La familia que habita en la finca utiliza mayormente leña como fuente para la cocción de los alimentos. Utilizando 10 unidades por día, cada una tiene un peso de 2.27 kg, dando un total de 22.72 kg de leña utilizada al día. Mientras el estiércol no se aprovecha, se va acumulando en el corral y eso genera malos olores, moscas y libera metano, un gas que contamina más que el dióxido de carbono.

Además, se utiliza gas para preparar algunos alimentos o para hervir agua para la preparación de café. cada tanque de gas de 25 lb se acaba en su totalidad cada 4 meses por que solo utiliza

solo una hora por día, el gas utilizado al día es 0.094 kg teniendo un gas total 11.36 kg. El uso de gas y leña aumenta la contaminación del aire, mientras que no aprovecha el estiércol hace que siga liberando gases que afectan al medio ambiente. Por eso es importante contar con un biodigestor que funcione bien y permita utilizar ese estiércol como energía en lugar que se desperdicie.

**Formulación:**

De la caracterización y descripción del problema anterior surgió la siguiente pregunta principal de este estudio ¿Cómo dimensionar un biodigestor anaerobio, tipo continuo para la producción de biogás destinado a la cocción de alimentos en la finca?

**Sistematización:**

Las preguntas de sistematización correspondientes se presentan a continuación:

¿Cómo determinar la disponibilidad y cantidad de sustrato orgánico de excretas de bovino generados en la finca Aguas Frías?

¿Cuáles son las demandas de energía requeridas para la cocción de alimentos en Aguas Frías?

¿Cómo dimensionar adecuadamente los componentes del biodigestor anaerobio de flujo continuo para satisfacer la demanda energética de la finca?

¿Cuál es la viabilidad económica y ambiental de implementar un biodigestor anaerobio de flujo continuo en la finca Aguas Frías?

#### 4. Justificación

Uno de los motivos por el cual se planteó esta investigación, es ofrecer una alternativa de biodigestor tipo continuo, lo que permite encontrar una solución sostenible aprovechando los desechos orgánicos (estiércol de vaca) generados en la finca Aguas Fría, para producir biogás, para la cocción de alimentos.

Con el aprovechamiento de las excretas de ganado bovino se plantea reducir el uso de gas y leña, lo cual disminuye los costos de consumo para la cocción de alimentos y así mismo contribuye a cuidar el medio ambiente, al evitar la contaminación del aire, minimizando las emisiones de gases de efecto invernadero.

La trascendencia de esta investigación es que aporta una solución limpia y sostenible para aprovechar los desechos orgánicos y generar beneficios para el medio ambiente. Con los resultados se beneficiarán la familia y trabajadores de la finca al contar con una forma más económica y menos contaminante para la preparación de sus alimentos.

La utilidad de la investigación, está en que se realizó un estudio que pueda reducir los costos de consumo de gas y aprovechamientos de residuos, estos social y económicamente hablando, lo que resuelve un problema real porque aprovecha los desechos y disminuye la contaminación y vincula el plan de lucha contra la pobreza por que apoya a las familias del campo, con la energía nacional al promover el uso de fuentes renovables.

Los resultados obtenidos se pueden generalizar, ya que la misma técnica puede aplicarse en otras fincas o comunidades rurales, que tengan condiciones parecidas y así obtener los mismos beneficios.

## **5. Objetivos de investigación**

### **5.1. Objetivo General**

Dimensionar un biodigestor anaerobio de flujo continuo, para la cocción de alimentos en la finca Aguas Frías, ubicada en la Tunosa Estelí.

### **5.2. Objetivos específicos**

Determinar la disponibilidad y cantidad del sustrato orgánico de excretas de bovino generados en la finca Aguas Frías.

Caracterizar la demanda energética requerida para la cocción de alimentos en la finca Aguas Frías.

Dimensionar el biodigestor anaerobio tipo continuo para satisfacer la demanda energética.

Estimar la viabilidad económica ambiental del biodigestor tipo continuo en la finca Aguas frías.

## 6. Limitaciones del estudio

El presente estudio se realizó recreando un biodigestor tipo Bach para comprobar la efectividad en la producción de biogás con relación a la producción optima, presentando una limitante en cuanto al tiempo en que se realizó las pruebas de estudio, debido a que la mezcla del sustrato (estiércol bovino) en tan solo un tiempo de 10 días y un biodigestor para hacer una correcta digestión anaeróbica necesita entre 20 a 30 días.

Por razones de tiempo para la validación de esta investigación no se hizo el muestreo por temporada, de igual forma no se obtuvieron más de 1 muestra de estiércol para las mediciones respectivas.

Esto afecta directamente los resultados, ya que, al no cumplir con el tiempo ideal de digestión, la producción de biogás obtenida fue menor a la que realmente podría ganarse con un proceso completo. Además, al trabajar únicamente con una muestra de estiércol, no se pudo comprobar como varia la calidad del sustrato en diferentes días o condiciones del ganado, lo que limita la precisión de las mediciones.

Otra limitación es que no se contó con equipos más avanzados para medir parámetros como temperatura interna del biodigestor, pH del sustrato o cantidad exacta de biogás producido. Esto obligo a basarse en observaciones y cálculos aproximados. También influye que el estudio no considero cambios climáticos o variaciones ambientales que puedan afectar la producción del biogás, ya que solo se trabajó en un periodo corto y en condiciones específicas.

## **7. Hipótesis**

El aprovechamiento del sustrato bovino mediante un biodigestor anaerobio tipo continuo, producirá suficiente biogás para la cocción de alimentos y disminuir el consumo de gas, leña en la finca Aguas Fría.

## 8. Operacionalización de Variables

Objetivos	Variable conceptual	Dimensiones sobre variables.	Indicador	Instrumento			Tipo de variable.
				Entrevista	Observación	Cálculos	
1. Determinar la disponibilidad y cantidad del sustrato orgánico de excretas de bovino generados en la finca Aguas Frías.	Disponibilidad y cantidad de sustrato.	Números de bovinos. -producción diaria de estiércol. -cantidad del sustrato (ST y SV)	-Número de animales. -Kg de estiércol/día -% ST y %SV		✓		Cuantitativa continua
2. Identificar la demanda energética requerida para la cocción de alimentos en la finca Aguas Frías.	Demanda energética.	-Consumo de combustible. -Tiempo de cocción	-Kg de leña o gas -Horas de cocción/día	✓	✓		Cuantitativa continua
3. Dimensionar el biodigestor anaerobio tipo continuo para satisfacer la demanda energética.	Componentes del sistema del biodigestor	-volumen del biodigestor. -carga orgánica -producción de biogás	-volumen (m <sup>3</sup> ) -biogás (m <sup>3</sup> /día)		✓		Cuantitativa continua

4. Estimar la demanda económica ambiental de la implementación del biodigestor tipo continuo en la finca Aguas Frías.	Viabilidad económica y ambiental	-Inversión, ahorro. -reducción de leña.	-VAN, TIR Recuperación -Co <sub>2</sub> /año, Kg			✓	Cuantitativa mixta
---	----------------------------------	--	--	--	--	---	--------------------

**Tabla 1.** *Operacionalización de variables*

## **9. Marco Teórico**

### **9.1 Biodigestión anaeróbica.**

La digestión anaerobia, según Acosta y Abreu (2005) es una cocción microbiana que se presenta al no haber existencia de oxígeno, ocasionando una mezcla de gases (metano y dióxido de carbono), esta se distingue como “biogás” conteniendo microorganismos encargados de la destitución de la materia orgánica.

El resultado primordial de dicha digestion es el biogás, ya que contiene una mezcla de 50 a 70 % de metano y un 30 a 50 % de dióxido de carbono, a la vez hace uso de distintas proporciones de otros componentes como nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno, esta requiere tanto de la materia prima y el procedimiento a lo largo de su proceso.

Digestato: la masa restante biodegradada por los microorganismos llamada digestato, se basa en su funcionalidad como abono para una buena fertilización de suelos y alimentación animal, faceta aún en investigación.

Según Varnero Moreno (2011) más del 90% de la energía disponible por oxidación directa durante la digestion anaeróbica se transforma en metano, utilizando solo un 10% de la energía en el desarrollo bacteriano frente a un 50% degastado en el proceso aerobio.

### **9.2 Fases que componen a la digestión anaeróbica**

La biodigestión se estructura en cuatro períodos, que ocurren al mismo tiempo. La definición de cada una de estas etapas según Academia de las renovables Santa Fe (2017) son las siguientes:

### **9.2.1 Hidrólisis**

El primer paso fundamental a seguir para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos múltiples tiene por nombre hidrólisis, ya que es irrealizable que la materia orgánica pueda ser utilizada por bacterias a menos que se hidrolicen en compuestos solubles que puedan traspasar la pared celular. La hidrólisis de estas moléculas complejas es ejecutada por las enzimas extracelulares e intracelulares de los microorganismos aerobios facultativos. Así, las biomoléculas complejas serán degradadas para dar lugar a sus elementos componentes.

Entre la existencia de estas moléculas las proteínas son muy importantes porque son los principales nutrientes para la división celular, ya que ayudan a que la cantidad de bacterias aumente, es importante tomar en cuenta que esta etapa de hidrolisis suele ser media.

La velocidad de deterioro va a depender de varias fases, como la temperatura, el pH, el tamaño de las partículas, la composición bioquímica del sustrato, entre otros. Cabe mencionar que esta etapa se puede acelerar con algún pretratamiento específico, por ejemplo, triturar el sustrato antes de introducirlo al biodigestor.

### **9.2.2 Etapa fermentativa o acidogénica**

Durante el proceso de esta etapa se da lugar a la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser empleados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico,  $H_2$ ) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que serán estropeados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. Este grupo de microorganismos, se complementa de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, eliminan cualquier traza de oxígeno disuelto en el sistema.

### **9.2.3 Etapa acetogénica**

Esta etapa presenta la participación de dos tipos de microorganismos con dos vías metabólicas distintas, pero con el mismo fin: generar acetato que pueda ser consumido por las bacterias metanogénicas:

- Las bacterias acetogénicas convierten algunas moléculas (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) en acetato e hidrógeno.
- Las bacterias homoacetogénicas también generan acetato, pero lo hacen consumiendo  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ . El hecho de que consuman  $\text{H}_2$ , permite mantener bajas presiones parciales de este gas.

#### **9.2.4 Etapa metanogénica**

El proceso de digestión anaeróbica lo complementa un grupo de bacterias anaeróbicas formando el metano a partir de los compuestos que excretaron los microorganismos en las etapas anteriores. Se pueden implantar dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: Los hidrogenotróficos, que consumen  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  transformándolos en metano (producen el 30% del  $\text{CH}_4$ ); y los acetoclásticos que generan metano a partir de ácido fórmico, metanol, algunas aminas (producen el 70% del metano). Estas bacterias son muy sensibles a los cambios de temperatura y pH, por lo cual es la etapa más importante y delicada de la biodigestión, además de ser una de las más lentas.

### **9.3 ¿Qué es un biodigestor?**

Los biodigestores son sistemas diseñados para optimizar la producción de biogás por medio de desechos orgánicos, lo que permite obtener energía limpia, renovable y de bajo costo. (Rivas-Solano, Faith-Vargas, & Gillén-Watson , 2010)

Es un tanque clausurado donde se lleva a cabo la fermentación anaeróbica de la materia orgánica, como, por ejemplo: desechos agrícolas, agroindustriales y forestales, aguas residuales urbanas e industriales, residuos sólidos urbanos y el estiércol de animales; posteriormente, se produce el biogás. Sus componentes básicos son: área de premezclado, digestor, sistema de captación de biogás y de distribución del efluente (Hossain & Islam, 2008).

## **9.4 Tipos de biodigestores**

Tipos de biodigestores anaerobios domésticos: Según Parra-Ortiz, Botero-Londoño, y Botero-Londoño, (2019), el diseño y la elección de un biodigestor depende de las condiciones climáticas de la zona, la composición y la cantidad disponible de los sustratos. Por ejemplo, un biodigestor instalado en zonas montañosas albergará el mínimo posible de biogás en su volumen, con el fin de evitar pérdidas; mientras que en zonas tropicales los biodigestores se instalan bajo tierra con el fin de aprovechar la energía geotérmica. Existen tres tipos de biodigestores de bajo costo, que son los más comunes en las zonas rurales de Latinoamérica y en países en desarrollo. Estos biodigestores son los de domo fijo, de tambor flotante y tubulares plásticos. El sustrato tiene un tiempo promedio de retención entre 20 y 30 días a temperatura mesofílica y el biogás tarda aproximadamente entre 40 y 45 días en producirse dependiendo de las condiciones ambientales.

### **9.4.1. Biodigestores de domo fijo y tambor flotante.**

Los biodigestores de domo fijo y tambor flotante son construidos bajo tierra, con materiales como cemento, hierro, ladrillos y arena. El de tambor flotante tiene un tambor metálico que sobresale de la superficie de la tierra y modifica su posición de acuerdo al volumen producido de biogás. Este mantiene una presión constante en el biogás de acuerdo al peso ejercido del tambor o masas que se le adicionen. Por otra parte, el biodigestor de domo fijo mantiene el biogás a volumen constante en su propio interior mientras la presión varía a medida que se produce o libera el biogás.

Para la construcción de estos biodigestores, se requiere de mano de obra capacitada que evite al máximo las fugas de biogás y efluente. El tiempo de vida de un biodigestor de domo fijo puede estar entre 15 y 20 años; mientras que un biodigestor de tambor flotante puede tener un tiempo de vida de entre 12 y 15 años, debido a la corrosión. Ambos biodigestores no requieren sistemas de mezclado y operan sin control de temperatura.

Su principal desventaja es la acumulación de sedimentos que reducen el volumen efectivo a lo largo del tiempo, por lo que se aconseja mantenimiento periódico de lavado en su interior.

#### **9.4.1 Biodigestor tubular:**

Un biodigestor tubular consiste en dos mangas de plástico, polietileno o geomembrana concéntricas con tubos de entrada y salida PVC de entre 4 y 6 pulgadas. El conjunto biodigestor es enterrado hasta la mitad con el fin de mantener la fase líquida dentro de una zanja previamente excavada. La fase gaseosa se forma en la parte superior del biodigestor y es extraída mediante tuberías directamente a la cocina o a tanques de almacenamiento. Se implementa una trampa de agua como válvula de alivio y opcionalmente un filtro con viruta de hierro entre el tanque de almacenamiento y la cocina para capturar el H<sub>2</sub>S. En lugares con temperaturas bajas el HRT se aumenta entre 60 y 90 días para permitir una correcta digestión del sustrato, en climas tropicales el HRT es menor y varía entre 20 y 60 días.

El biodigestor tubular se caracteriza por ser de muy bajo costo y operación simplificada, y, en comparación con los modelos de domo fijo y tambor flotante, su costo es aproximadamente la mitad del precio de ellos. Es ideal para comunidades rurales alejadas y con problemas de accesibilidad, ya que su transporte se puede realizar incluso a lomo de mula. No requieren sistemas de mezclados o sistemas complejos de calentamiento. Generalmente se ubica en un invernadero para mantener la temperatura durante la noche. Su construcción y su mantenimiento no requieren mano de obra especializada. Sin embargo, su principal desventaja es el tiempo de vida útil, el cual se estima entre 2 y 5 años para los de plástico. Materiales más elaborados como la geomembrana tienen tiempos de vida útiles hasta de 10 años.

#### **9.5 Relación carbono/nitrógeno del sustrato**

El carbono y el nitrógeno son los principales nutrientes que necesitan las bacterias para vivir. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Por lo tanto, ambos nutrientes deben estar equilibrados, por lo que la relación óptima C/N en el sustrato está en el rango de 30:1 hasta 20:1. En sustratos con una relación C/N > 35:1 la biodigestión ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado.

**Tabla 2** Relación carbono/nitrógeno de algunos de los sustratos más comunes.

<i>RESIDUO</i>	<i>RELACIÓN C/N</i>
FORSU	27:1
PURÍN DE CERDO	16:1
ESTIÉRCOL VACUNO	25:1
DESECHOS DE HUERTA	17:1
ESTIÉRCOL DE AVES	23:1
ESTIÉRCOL CAPRINO/OVINO	35:1
ESTIÉRCOL EQUINO	50:1
ESTIÉRCOL DE CONEJO	23:1
HECES HUMANAS	3:1

*Fuente:* Curso operaciones y mantenimiento de sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala.

### **9.6 Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles**

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). Matemáticamente podemos mostrarlo así:

*% ST: porcentaje de Sólidos Totales = gramos de Sólidos Totales /100 g de mezcla*

El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es muy importante, ya que la movilidad de las bacterias se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores continuos no debe tener más de un 6% a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que funcionan entre un 40 a 60% de sólidos totales. En la unidad III veremos cómo calcular la dilución al realizar la carga.

Los Sólidos Volátiles (S.V.) son aquella porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600°C. Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano. La expresión matemática de los mismos es:

% SV: porcentaje de Sólidos Volátiles = gramos de Sólidos Volátiles /100 g de ST

Para saber calcular las mezclas, debemos saber cuál es el contenido de sólidos de nuestros sustratos, para lo cual contamos con la siguiente tabla (2):

**Tabla 3** *Contenido de sólidos de distintos sustratos.*

<b>Residuo</b>	<b>%ST</b>	<b>%SV</b>
Estiércol vacuno	18.20	83
Estiércol porcino	18	80
Estiércol aviar parrilleros	53	66
Estiércol aviar ponedoras	35	90
Desechos de huerta	11	94
Desechos con almidón o azucarados	19,6	90,6
Sorgo granífero	96	98

### **9.7 El pH**

De acuerdo con Díaz Salazar y Torres Cortes (2019) el pH es un indicador de la acidez de una materia orgánica. El consorcio bacteriano que desarrolla la digestión anaerobia suele gustar de estar en ambientes con pH entre 6.5-7.5 (7 es el valor neutro de pH).

Dentro del consorcio bacteriano, las bacterias que realizan la etapa de acidogénesis y acetogénesis trabajan mejor en pH 5.5 y 6.5, mientras que las metanogénicas lo hacen en un rango 7.8 a 8.2.

La mayoría de estiércoles tienen valores en ese rango, siendo que el estiércol de cerdo es más ácido (en torno a 6.5) y el de vaca más neutro (en torno a 7). En el caso del pH, juegan a favor los cambios suaves para lograr que el consorcio de bacterias se aclimate a condiciones

fuera del rango óptimo. De este modo se puede lograr hacer trabajar un biodigestor con pH 6.

### **9.7.1 Efectos del pH**

Los resultados del pH se muestran en la actividad enzimática de los microorganismos. Durante la actividad microbiana, el pH influye de forma general que puede reducirse de las siguientes formas:

- Cambio de los grupos hidrolizables de las enzimas (grupos carboxilos y aminos).
- Alteración de los compuestos no enzimáticos del sistema (ionización del sustrato, desnaturalización de la estructura proteica de la enzima).

A estos efectos del pH se adiciona la concentración de  $H^+$  que actúa sobre las diferentes reacciones químicas, bioquímicas y biológicas presentes en este sistema. Se plantea en general que el valor óptimo de pH para la digestión anaerobia es 7. En la práctica se ha visto que, al alejarse de este valor, la eficiencia del proceso disminuye, aunque se ha comprobado que para valores fuera del rango el proceso no se inhibe hasta cierto valor particular. En estudios realizados en Cuba, con lodos albañales domésticos presolubilizados con cal se comprobó que trabajando con pH entre 8,2 y 8,4 la anaerobiosis se llevaba a cabo satisfactoriamente.

Para regular el pH en un proceso anaerobio se pueden emplear diferentes métodos:

- Adición de álcali (fundamentalmente cal o sosa).
- Adición de ácido (orgánico o inorgánico).
- Adición de agua al residual al reactor.
- Disminución de la carga orgánica aplicada al proceso.
- AGV.

La presencia de ácidos grasos volátiles (AGV) es fundamental en el proceso que se estudia, ya que constituye el precursor principal de la metanogénesis.

Muchos especialistas consideran que la concentración de AGV en un digestor no debe sobrepasar los 2 kg/m<sup>3</sup>. Se expone generalmente que una concentración de 0.3 kg/m<sup>3</sup> en el digestor puede considerarse óptima. Sin embargo, existen demostraciones de que la concentración de inhibidores de la digestión depende en gran medida del tipo de ácido presente. En general, se ha demostrado que mientras más pequeña es la cadena estructural del ácido, más pequeña es la concentración de éste que puede inhibir el proceso. El conocimiento de la concentración de AGV en el proceso es muy importante para conocer si éste está marchando de forma adecuada, y aún más significativo que el valor absoluto de los AGV, resulta conocer la variación que puedan experimentar éstos. Una cantidad excesiva de AGV en el sistema puede ser provocada por la presencia de una carga orgánica muy elevada, por una caída en la temperatura o por la acumulación de mucha espuma, fundamentalmente.

## **9.8 Subproductos del tratamiento anaeróbico:**

Los productos esenciales del proceso de digestión anaerobia, trabajando en sistemas de alta carga orgánica y en mezcla completa, son el biogás y un efluente estabilizado.

### **9.8.1 Biogás**

Mezcla gaseosa formada principalmente por: metano y dióxido de carbono y pequeñas proporciones de otros gases, como H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>. También se muestran pequeños por cientos de N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. La composición o riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. En la tabla 6 se muestran valores medios de composición del biogás en función del substrato utilizado<sup>20</sup>.

El potencial calórico inferior del biogás es aproximadamente de 5250 kcal/m<sup>3</sup>, para una riqueza en metano de 60 %.

La utilización del biogás únicamente presenta interés económico cuando se trata de grandes plantas. Su conversión en electricidad resulta interesante en el caso de plantas de capacidad equivalente a 20,000 habitantes equivalentes. En pequeñas instalaciones, la utilización del gas plantea problemas de manejo y se consideran interesantes el aprovechamiento del biogás,

indicando que puede satisfacer necesidades básicas, en comunidades pequeñas, como en cocinas o en alumbrados.

La remoción de patógenos, en reactores tipo UASB exige mayor investigación<sup>1</sup>, sin embargo, presentan informaciones de remoción de coliformes total y fecal del orden de un ciclo en la fase líquida del efluente del reactor

### **9.8.2 Efluente**

Las cualidades del efluente dependen del tipo de sistema, se puede decir que el efluente es la mezcla del influente estabilizado y la biomasa microbiana producida. La materia orgánica se transforma en metano durante el proceso anaeróbico, por tanto, lo obtenido de materia orgánica es menor que el influente, a su vez da como resultado un producto más mineralizado que el influente, por lo cual suma el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuye el nitrógeno orgánico.

Cuando el estiércol animal se usa como sustrato en los biodigestores, generalmente en los de diseño convencional, práctica muy difundida en la zona rural, el efluente líquido puede ser utilizado como bioabono debido a aspectos como son la disminución de la relación C/N y la solubilización de algunos nutrientes.

### **9.9 Tratamiento de los lodos.**

El tratamiento que se le dará a los lodos, generados por el biodigestor consiste en su aprovechamiento como fertilizante líquido, considerando que esta alternativa representa la opción más eficiente y sostenible en la finca Aguas Frías. Este tratamiento se fundamenta en que el digestato obtenido tras la digestión anaeróbica presenta un alto grado de estabilización, menor carga de patógenos y nutrientes mineralizados que puedan ser absorbidos fácilmente por los cultivos. Su aplicación diluida en áreas agrícolas y pastoreo permite mejorar la fertilidad del suelo, fortalecer el crecimiento de las plantas y reducir el uso de fertilizantes químicos. Además, este método cumple con los objetivos del proyecto, ya que promueve el uso responsable de los subproductos del biodigestor, cierra el ciclo de nutrientes dentro de la finca y contribuye a la sostenibilidad.

La aplicación de este tratamiento se realiza mediante la distribución de digestato previamente diluido en agua, lo que garantiza su adecuada asimilación por los cultivos. Su incorporación al suelo podrá efectuarse por riego directo, o aplicación manual. Este método resulta técnicamente viable, ya que no requiere equipos especializados ni procesos adicionales como la deshidratación, compostaje o estabilización anaeróbica, los cuales implicarían mayores costos y tiempos de manejo. Asimismo, el uso directo del digestato permite aprovechar inmediatamente los nutrientes disponibles, evitando pérdidas por degradación. Por estas razones se descartan otros tratamientos más complejos o costosos, priorizando una solución práctica, eficiente y acorde con la realidad productiva de la finca Aguas Frías.

### **9.9.1 Bioabono.**

Este se caracteriza como uno de los resultados secundarios del proceso de digestión anaerobia producido en el digestor, es una combinación de la porción no biodegradable de sólidos y bacterias producidas durante el proceso. El sustrato descompuesto es rico en macronutrientes (principalmente nitrógeno, fósforo y potasio) y micronutrientes (Flores, 2010).

En comparación con un sustrato crudo como estiércol animal, el bioabono cuenta con una mejor seguridad veterinaria puesto que durante la digestión anaerobia se inactivan los patógenos y parásitos, hay una reducción de malos olores, mayor disponibilidad de nutrientes y mejor relación C/N (Durazno Coronel , 2018). Pero en todos los casos los residuos de la fermentación deben estar sujetos a medidas de control sanitario y la administración de nutrientes debe realizarse de acuerdo con un plan de fertilización aprobado (McPhail, 2012).

### **9.9.2. Biol.**

Este se define como un efluente líquido, siendo producto de la fermentación de estiércol y materia orgánica en un biodigestor, es de suma importancia para la estimulación y activación de nutrientes de plantas abonadas con este líquido, y para el desarrollo en la capacidad de resistencias de las plantas ante el ataque de insectos y enfermedades.

Según el estudio realizado por (Durazno Coronel , 2018) los resultados proporcionados por el análisis de laboratorio del bioabono se determinó un valor elevado en los macronutrientes pertenecientes al bioabono, hubo una mayor producción de potasio con 879.43 mg/Kg, nitrógeno con un valor de 746.36 mg/Kg y de fósforo con una producción de 573.94 mg/Kg; induciendo el potasio a un mejoramiento en la estructura del suelo y facilitando la actividad

radicular de tal manera que las raíces de las plantas se desarrollen de mejor forma, el nitrógeno es clave para la nutrición mineral debido a que es el encargado del aumento de la fertilización de los suelos y el fósforo provocó en los resultado de estudio de Durazno Coronel un rápido crecimiento de la parte herbácea, aumentando la producción vegetativa del suelo.

### **9.9.3. Agitadores y mezcladores**

Este abastecimiento es parte fundamental del digestor y cumplen un rol importante con respecto al aumento de la eficiencia del proceso por medio de la agitación. Sin embargo, este posee distintos campos de aplicaciones, teniendo cada uno cualidades distintas. Por ejemplo, los agitadores se utilizan de preferencia en reactores tipo laguna y de grandes envergaduras, poseen una velocidad de giro mayor con un menor torque en eje, lo que genera vórtices superficiales que permiten romper las costras que se acumulan en las superficies. Dado que el motor reductor se encuentra en el exterior, facilita las labores de mantención. El equipo debe ser a prueba de explosión, con la certificación Atex correspondiente.

### **9.9.4. Válvula de Seguridad.**

La función principal de la válvula de seguridad es la protección del digestor con respecto a daños físicos o deformaciones permanentes causadas por el aumento de la presión interna o de vacío encontrado en las operaciones normales. En digestores más pequeños, la válvula también puede proporcionar suficiente capacidad de flujo para la ventilación de emergencia. Se debe considerar adicionalmente que los digestores se encuentran expuestos a influencias meteorológicas como calentamiento y enfriamiento entre otros, por tanto, deben ser considerados en los caudales volumétricos.

### **9.9.5 Selección Gasómetro**

La selección del volumen del gasómetro debe considerar los siguientes criterios:

- Continuidad
- Producción y Carga
- Consumo y Descarga
- Falla Producción y Consumo

### **9.10. Influencia del excremento vacuno en un biodigestor anaeróbico**

El estiércol vacuno es un sustrato valioso para biodigestores anaeróbicos, con ventajas en disponibilidad, nutrientes y microbiota inherente. Para maximizar rendimiento de metano y estabilidad operativa, se recomienda usar sólidos totales moderados (~4-8 %), temperaturas mesofílicas (25-35 °C), diluciones adecuadas, y relaciones de co-sustratos que mejoren el C/N. (Passos, dos Santos, & Andrade, 2021)

Los metales pesados y el exceso de amoníaco representan riesgos reales que deben manejarse mediante monitoreo, control de pH, posibles aditivos o bio aumentación.

La investigación futura debe enfocarse en optimizar estrategias de codigestión específicas para climas y vacíos tecnológicos locales, caracterizar más la comunidad microbiana efectiva, y escalar estudios piloto para validar la transferibilidad de las condiciones óptimas. (Agga, Kasumba, Loughrin, & Conte, 2020)

## 10. Diseño metodológico.

### Caracterización del área de estudio.

El estudio se llevó a cabo en la finca Aguas Frías, ubicada en La Tunosa, Estelí (figura 1). Esta finca se dedica principalmente a actividades agrícolas y ganaderas, contando con 40 vacas que sirven como base para el análisis del potencial de producción de biogás mediante un biodigestor continuo. Las coordenadas de ubicación de la finca son: 13°.039269” N, -86°.419583” W.

**Figura 1** Ubicación geográfica de la Finca Aguas Frías



*Nota.* Adaptado de Google Maps, 2024, <https://maps.app.goo.gl/UJakHBupGurCyaSS7>

El presente estudio está dentro del tipo descriptivo, debido a que su principal propósito es caracterizar biomasa, identificar la demanda y de igual forma detallar las condiciones

técnicas necesarias para dimensionar un biodigestor de operación continua. El carácter descriptivo se justifica porque la investigación se centra en identificar, medir y documentar variables. El propósito no es modificar el sistema ni comparar sustratos o tratamientos, no se manipulan deliberadamente variables en cambio se busca describir las propiedades, características y parámetros del sistema.

El diseño de esta investigación es transversal ya que la recolección de datos se realiza en un cierto periodo de tiempo, es decir, mediante un tiempo limitado. A la vez no se hizo comparación entre otras etapas o periodo largos. De igual forma presenta un enfoque cuantitativo por que se basa en cálculos numéricos y la medición de variables técnicas, esto datos permiten evaluar de manera objetiva el rendimiento del biodigestor y sustentar la propuesta técnica con indicadores verificables.

### **10.1. Población y selección de la muestra**

La población de este estudio está conformada por las fincas ganaderas de la comunidad “La Tunosa”, específicamente las que generan suficiente estiércol bovino y que presentan condiciones potenciales para la implementación de biodigestores. Estas representan el universo de sistemas productivos con características ambientales y operativas similares (disponibilidad de biomasa, alimentación de las reses, condiciones climáticas) sobre las cuales los resultados del presente estudio podrían ser aplicables. La muestra corresponde a la finca “Aguas frías” seleccionada como sitio de estudio, la cual cumple con las características necesarias para el desarrollo del proyecto: disponibilidad y estabilidad del sustrato, accesibilidad para la toma de datos. La elección del lugar de estudio se realiza con la intención de garantizar que la finca refleje adecuadamente las dinámicas productivas que caracterizan la zona.

## **11.1 Técnicas, instrumentos y procedimientos para la recolección de datos.**

La recolección de datos es parte fundamental para el enfoque cuantitativo de la investigación, ya que facilita la obtención de información objetiva, medible y verificable para cumplir con los planteados. Debido a que el estudio es descriptivo y transversal, la obtención de datos se realizó en un único momento, sin intervención directa sobre las variables, con el fin de caracterizar la situación de la finca Aguas Frías respecto a la disponibilidad de sustrato, su demanda energética y los parámetros técnicos necesarios para dimensionar un biodigestor anaerobio de flujo continuo.

### **11.1.1 Técnicas de recolección de datos:**

#### **a. Observación Directa**

1. Número de bovinos presentes en la finca.
2. Producción diaria de estiércol.
3. Áreas disponibles para instalación del biodigestor.
4. Condiciones actuales de manejo del sustrato.
5. Prácticas de uso de gas y tiempo de cocción.

#### **b. Entrevista semiestructurada**

1. Consumo mensual y anual de gas butano.
2. Frecuencia de uso del combustible.
3. Proyección de crecimiento de la finca población futura.

## **11.2. Instrumentos utilizados.**

1. Guía de observación estructurada: para registrar la producción de estiércol, número de bovinos, manejo del sustrato y tiempo de cocción.
2. Guion de entrevista semiestructurada: diseñado para obtener información del propietario.
3. -Balanza o sistema de pesaje: para medir la cantidad diaria de estiércol.

### **12.1 Confiabilidad y validez de los instrumentos**

- a. Consistencia interna.

Las mediciones directas como el peso del estiércol se realizaron más de una vez para obtener promedios confiables.

- b. Revisión cruzada.

Los datos obtenidos por observación fueron comparados con valores de literatura técnica para asegurar que los resultados estuvieran dentro de rangos esperados.

### **12.2 Técnicas, instrumentos y procedimientos para el procesamiento y análisis de datos**

El procesamiento y análisis de los datos se realizó bajo el enfoque cuantitativo, utilizando principalmente operaciones matemáticas, conversiones y modelos de cálculo técnico. El objetivo fue transformar las mediciones obtenidas en parámetros útiles para dimensionar el biodigestor y evaluar su viabilidad. Se emplearon operaciones matemáticas básicas: sumas, porcentajes, promedios y conversiones.

-Procesamiento de datos.

-Determinar el peso y volumen del estiércol.

-Calcular los valores de ST y SV según tablas técnicas.

-Establecer el volumen del sustrato diario.

-Determinar el tiempo de retención hidráulica.

Para el análisis económico se aplicaron métodos financieros:

1. Valor Actual Neto (VAN)
2. Tasa Interna de Retorno (TIR)
3. Periodo de recuperación

Para el análisis ambiental se aplicaron factores estandarizados de emisión de CO<sub>2</sub> para gas butano, propano y metano.

Interpretación de resultados

Se comparó la producción estimada de biogás con la demanda actual y futura de gas para cocción.

Se determinó la viabilidad económica mediante la rentabilidad proyectada.

### 13 Análisis y discusión de resultados.

#### 13.1 Determinar la disponibilidad y cantidad del sustrato orgánico de excretas de bovino generados en la finca Aguas Frías.

**Tabla 4** *Estiércol fresco disponible en la zona de estudio.*

Peso de cada estiércol de vaca (kg)	Cantidad de veces que defeca una vaca tabulando	Peso total de estiércol defecado por una vaca tabulando(kg)	Cantidad de vacas en finca	Total, de estiércol de vaca disponible (kg/día)	Estiércol a utilizar (kg/día)
2.4947	3	7.4841	40	299.364	150

##### 13.1.1 Cálculo de generación de estiércol diario de la finca.

Durante la realización de dicho cálculo se toma en cuenta lo producido diariamente en toda la finca incluyendo el número de vacas (40 cabezas de ganado).

$$E_{Tr} = E_{pV} * \# V_r$$

$E_{Tr}$ : cantidad total de estiércol.

$E_{pV}$ : cantidad promedio de estiércol por vaca

$\#V_r$ : número de cabezas de ganado disponible.

$$E_{Tr} = 7.5kg * 40v$$

$E_{Tr}$ : 300 kg.

**Figura 2** *Ganado existente en el área de estudio*



De estos 300 kg disponibles de estiércol fresco, solamente se utilizó el 50 %, debido a que las 40 vacas la mitad del tiempo que pasan tabulando permanecen en un área embaldosada, por ende, el sustrato no se combina con lodo u otras sustancias. Debido a que si el estiércol ingresa con tierra o lodo al biodigestor impide el proceso que se genera dentro del reactor.

### **13.1.2. Cálculo de sólidos volátiles (SV).**

El cálculo de los sólidos volátiles (SV) en un biodigestor es crucial para evaluar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia, ya que los SV representan la fracción orgánica biodegradable del sustrato (como desechos orgánicos o estiércol)

$$\mathbf{SV = EF * Porcentaje de SV}$$

Estiércol= 80%

$$SV= 150 \text{ Kg} * 0.80$$

$$SV= 120 \text{ Kg.}$$

**Figura 3** *Quema de sólidos volátiles*



### **13.1.3. Volumen de estiércol disponible**

El volumen disponible de estiércol es la cantidad de excremento que está en condiciones de ser aprovechada en su totalidad, a su vez debe encontrarse puro y sin residuos de tierra u otro material no degradable, de esta manera el volumen de estiércol utilizado en este caso es aquel producido por 40 cabezas de ganado que se encuentran en el corral, se toma el valor promedio de generación de estiércol por vaca/día (7.5 kg ), adicionalmente se usa el valor de la densidad del estiércol para transformar el peso en volumen.

$$V_{EF} = \frac{E_{Tcf}}{D}$$

$V_{EF}$ : Volumen disponible de estiércol fresco.

$E_{Tc}$ : Cantidad total de estiércol generado en el corral en un día.

$D$ : Densidad del estiércol.

$$V_{EF} = \frac{150kg/día}{1,000kg/m^3}$$

$$V_{EF}: 0.15 \text{ m}^3/\text{día} = 150 \text{ Kg}/\text{día}.$$

**Figura 4** Pesaje de muestra de estiércol fresco recolectada en la zona de estudio.



### 13.1.5. Volumen de sustrato

150kg de estiércol diario

Volumen de la mezcla relación 1;2

$$V_s = V_{EF} + \text{agua}$$

Vs: Volumen de sustrato.

$V_{EF}$ : Volumen disponible de estiércol fresco.

$$150+300\text{L}=450\text{L}$$

Densidad aproximada del estiércol bovino=1000kg/m<sup>3</sup>

$$\text{Volumen del sustrato} = \frac{\text{Masa (M)}}{\text{Densidad(S)}} = \frac{450\text{kg}}{1000\text{kg}/\text{m}^3} = 0.45\text{m}^3$$

Cantidad en m<sup>3</sup> de mezcla diaria mezclando en una proporción 1:2

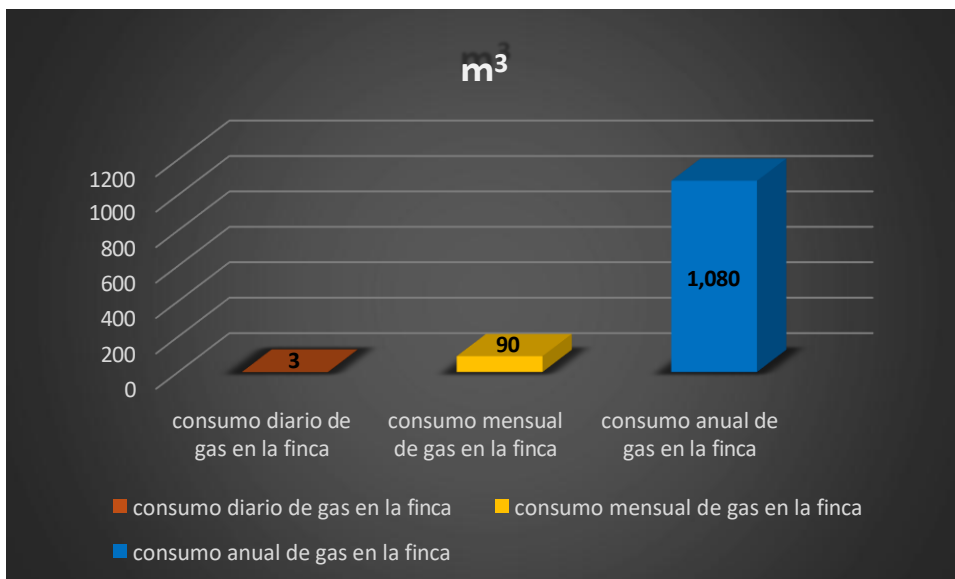
### 13.2. Caracterizar la demanda energética requerida para la cocción de alimentos en la finca Aguas Frías.

La finca Aguas Frías cuenta con un total de 10 personas, encontrándose dentro de ella familiares y trabajadores.

Se procedió a calcular el consumo de gas total por persona en dicha finca durante un día, un mes y un año. Teniendo en cuenta que el consumo promedio de gas por persona para cocinar es de  $0.3 \text{ m}^3/\text{día}$ , ( Ngetuny, y otros, 2025) según la cantidad diaria promedio de biogás necesaria para satisfacer las necesidades de cocina de un hogar unipersonal es de 0,35 a 0,42m según la encuesta, el tamaño promedio de los hogares en estudio es de siete miembros, lo que se traduce en una demanda diaria de biogás de 2,45 a 2,94m.

- Cálculo diario de gas para cocinar:  $0.3 \text{ m}^3/\text{día/persona} * 10 \text{ personas} = 3 \text{ m}^3/\text{día}$ .
- Cálculo mensual de gas para cocinar:  $3 \text{ m}^3/\text{día} * 30 \text{ días} = 90 \text{ m}^3/\text{mes}$ .
- Cálculo anual de gas para cocinar:  $90 \text{ m}^3/\text{mes} * 12 \text{ meses} = 1,080 \text{ m}^3/\text{año}$ .

**Figura 5** Resultados de consumo de gas actual.



Se evaluó cuánto aumentaría la población de la finca dentro de cinco años, para esto se utilizó la fórmula de crecimiento poblacional:

- $P_{\text{futura}} = P_{\text{actual}} (1 + r)^n$

Donde:

$P_{\text{futura}}$  = Población futura

$P_{\text{actual}}$  = 10 personas

r = Tasa de crecimiento (2.06% = 0.02)

n = Número de años a futuro (5)

Reemplazando los datos tenemos la siguiente operación:

- $P_{\text{futura}} = 10 (1 + 0.02)^5 = 11.04 \approx 12.$

Una vez efectuada la operación se obtiene el resultado de 11.04 habitantes a futuro en la finca Aguas Frías, redondeando el resultado el valor es de 12 personas. Esto quiere decir que el crecimiento poblacional dentro de cinco años será de 2 personas.

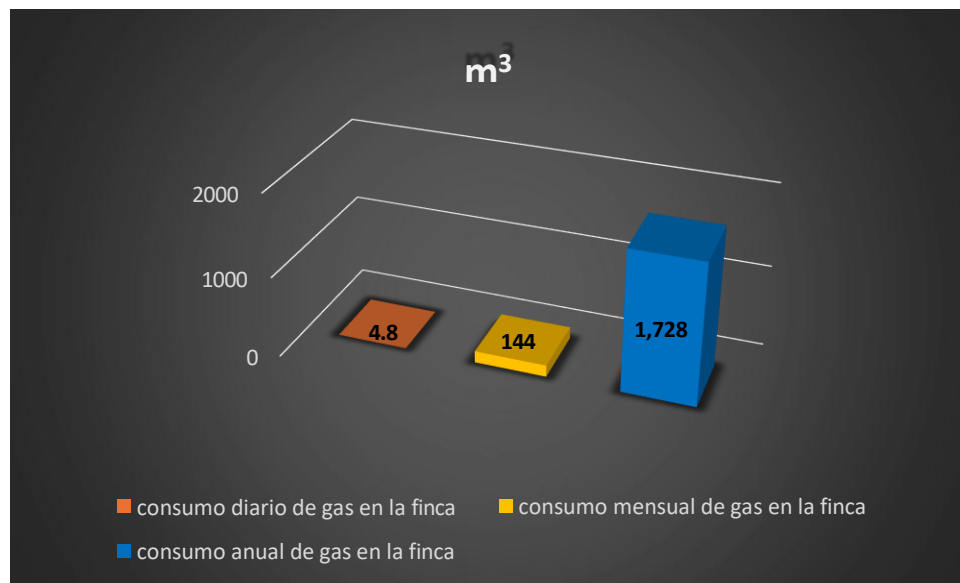
Teniendo en cuenta que en el lugar de estudio es una zona dedicada a la ganadería y a la agricultura se contratarán más trabajadores con el paso del tiempo. Se espera que dentro de cinco años el dueño sumará 4 trabajadores más a su finca. Por consiguiente, se concluye que la proyección a futuro es de 16 personas en total.

Cálculo diario de gas para cocinar:  $0.3 \text{ m}^3/\text{día}/\text{persona} * 16 \text{ personas} = 4.8 \text{ m}^3/\text{día}.$

Cálculo mensual de gas para cocinar:  $4.8 \text{ m}^3/\text{día} * 30 \text{ días} = 144 \text{ m}^3/\text{mes}.$

Cálculo anual de gas para cocinar:  $144 \text{ m}^3/\text{mes} * 12 \text{ meses} = 1,728 \text{ m}^3/\text{año}.$

**Figura 6** Resultados de consumo de gas con proyección a futuro.



### 13.3 Dimensionar el biodigestor anaerobio tipo continuo para satisfacer la demanda energética.

#### Volumen de biogás

El volumen de biogás es la cantidad de biogás producido en un biodigestor, medida en términos de espacio que ocupa. Generalmente, se expresa en metros cúbicos (m<sup>3</sup>) o litros (L) y representa la cantidad de gas generado a partir de la descomposición anaeróbica de materia orgánica (como estiércol, restos de alimentos o residuos vegetales) en un ambiente sin oxígeno.

El volumen de biogás es fundamental para evaluar la eficiencia y la capacidad del biodigestor, y para planificar su uso como fuente de energía. Saber cuánto biogás se produce permite estimar su rendimiento energético, dado que el biogás contiene principalmente metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), siendo el metano el componente que proporciona valor energético.

La producción ajustada de biogás en un biodigestor se refiere al volumen de biogás que se espera obtener, teniendo en cuenta factores como el tipo de sustrato, la cantidad de sólidos volátiles (SV), la eficiencia del sistema, y las condiciones de operación (temperatura, pH, etc.)

Basado en datos teóricos:

Según (Olaya Arboleda & Gonzalez , 2009), el biogás producido en función de sólidos volátiles del estiércol bovino es de  $0.087\text{m}^3/\text{kg}$

La biomasa posee 80% SV y un 14% ST

$$\text{ST} = \frac{\%ST \times MC}{100} = \frac{14 \times 150\text{kg}}{100} = 21\text{kg}/\text{m}^3$$

$$\text{SV} = \frac{\%SV \times MC}{100} = \frac{80 \times 150}{100} = 120\text{kg}/\text{m}^3$$

$$\text{Biogás.} = 120\text{kgSV} \times 0.087 \frac{\text{m}^3}{\text{kgSv}} = 10,45\text{m}^3 \text{ de biogas}$$

### **Volumen del biodigestor**

Para la producción de biogás y bioabono, para obtener el tiempo de retención se necesita conocer las condiciones climáticas de la zona, TRH ideal siendo este entre 15 y 30 días y un factor de corrección de 1.40, a partir de este dato se consideró un tiempo de alimentación de 20 días.

TRH Tiempo de retención hidráulica

TRH= tiempo ideal x factor de corrección

$$= 20 \text{ días} \times 1.40$$

$$\text{TRH} = 28 \text{ días}$$

Volumen de biodigestor= biomasa diaria x TRH necesario

$$= 0.45\text{m}^3 \times 28 \text{ días}$$

$$= 12.6 \text{ m}^3$$

$$\text{Factor de seguridad del 15\%} = 12.6 \text{ m}^3 \times 1.15 = 14.49\text{m}^3$$

$$\text{Volumen final} = 15\text{m}^3$$

Gas al 25% = 3.75m<sup>3</sup>

Mezcla al 75% = 11.25m<sup>3</sup>

**Adicionalmente se incluyó al volumen de carga las siguientes consideraciones:**

#### **13.4. Factor de seguridad FS = 4%**

El factor de seguridad (Fs) en el diseño de un biodigestor se usa para garantizar que el sistema funcione de manera segura y estable, incluso bajo condiciones adversas. Este factor es importante porque ayuda a considerar posibles variaciones en las condiciones de operación, como cambios en la carga orgánica, temperatura, y otras influencias externas.

Dimensionamiento del biodigestor

V<sub>c</sub>= volumen de la cúpula

V<sub>e</sub>= volumen efectivo

V<sub>g</sub>= volumen de almacenamiento de gas

H<sub>c</sub>= altura del volumen complementario

r= radio de la cúpula

Los manuales recomiendan una relación estándar de:

$$\frac{V_e}{V_c} = 10:1$$

Por cada 10 partes de volumen del biodigestor debe haber 1 parte de volumen para el gas.

$$\frac{V_e}{V_c} = \frac{10}{1}$$

Lo que significa que:  $V_e = 10 V_c$

Se recomienda agregar un 4% adicional al volumen del diseño, esto en consideración por razones de construcción, por ende se tiene que:

$$V_e + V_c = 1.04V_d$$

$$= V_c + 10V_c = 11V_c = 1.04V_d$$

$11V_c = 1.04 \times 15\text{m}^3 = 15.6\text{ m}^3 \rightarrow$  teniendo en cuenta el volumen de nuestro biodigestor

$V_c = \frac{15.6\text{m}^3}{11} = 1.41\text{m}^3 \rightarrow$  siendo este destinado a la cúpula

$V_e = 15.6 - 1.41 = 14.16\text{ m}^3 \rightarrow$  volumen del biodigestor útil

Radio de la cúpula.

$$\sqrt[3]{\frac{3}{2\pi} \times V_e} = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi} \times 14.16} = 1.8\text{m}$$

$$H_c = \frac{r}{5} = \frac{1.8}{5} = 0.37\text{m}$$

Volumen del gas

$$V_g = \frac{\pi h}{6} [3a^2 + 3b^2 + h^2] = \text{borde libre} = 0.25$$

$$h = \frac{2r}{5} - \text{borde libre}$$

$$h = 0.47$$

$$a = \frac{4r}{5} = 1.44 \quad b = \frac{r}{2} = 0.9$$

$$V_g = \frac{\pi \times 0.47}{6} [3(1.44)^2 + 3(0.9)^2 + 0.47^2]$$

$$V_g = 2.18\text{m}^3$$

Altura de la mezcla de la cámara

El líquido ocupa un 80% y el 20 % para almacenar biogás

$$V_o = (V_T \times 0.8) \text{ m}^3 = (15.6 \times 0.8) \text{ m}^3 = 13.2\text{m}^3$$

$V_T =$  volumen total

$V_o =$  volumen de operación

$$\text{Entonces} = H = \frac{V_o}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = \frac{13.2\text{m}^3}{\pi \cdot \frac{(3.2)^2}{4}}$$

$$H = 1.6\text{m}$$

Donde  $H$  = altura de la mezcla en la cámara

D= diámetro de la cámara

V<sub>o</sub>= volumen de operación

Cámara de compensación V<sub>c</sub>=V<sub>T</sub>-V<sub>o</sub>

$$V_c = 15.6 - 13.2$$

$$V_c = 2.4 \text{ m}$$

Altura de la cámara de compensación

$$V_c = \pi \cdot R^2 \cdot h_c$$

Despejamos=

$$H_c = \frac{V_c}{\pi \times R^2} = \frac{2.4m}{\pi \times (1.2)^2} = 0.53m$$

**Tabla 5** Dimensiones del biodigestor

<b>Domo</b>	<b>Cámara</b>
D= 3.2m	D= 2.4m
r= 1.8m	r= 1.2m
H=1.6m	H= 0.53m

### 13.4 Estimar la viabilidad económica ambiental de la implementación del biodigestor

#### 13.4.1 Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI):

El biogás captura el metano (CH<sub>4</sub>) que es producido por la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos. Al convertirlo en energía, se evita que el metano, (un gas 25 veces más potente que el CO<sub>2</sub> en términos de calentamiento global), sea liberado a la atmósfera.

Disminuye el uso de combustibles fósiles, reduciendo así las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas.

### 13.4.2 Factores de la emisión de energía

**Tabla 6** Emisiones de CO<sup>2</sup>

Tipo de gas	Volumen	Masa	CO <sup>2</sup> emitido*kg	Total, de emisiones
Butano	12 m <sup>3</sup>	29.76 kg	2.96 kg CO <sub>2</sub> /kg	88.08 kg de CO <sub>2</sub>
Propano	12 m <sup>3</sup>	22.44 kg	2.94 kg CO <sub>2</sub> /kg	65.97 kg de CO <sub>2</sub>
Metano	12 m <sup>3</sup>		1.8 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	21.6 kg de CO <sub>2</sub>

### 13.4.3 Huella de carbono aplicada al dimensionamiento.

Factores de emisión.

- Butano: 2.96 kg CO<sub>2</sub>/kg
- Propano: 3.02 kg CO<sub>2</sub>/ kg

Conversión adicional por densidad.

- Butano: 29.76 kg/ 12L= 2.48kg/m<sup>3</sup>
- Propano: 22.44 kg/12L= 1.87kg/m<sup>3</sup>

Emisión final por m<sup>3</sup>.

- Butano= 2.48kg\* 2.96kg CO<sub>2</sub>/kg = 7.43kg CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup>

Huella de carbono actual en la finca Aguas Frías:

$$3\text{m}^3 * 7.43\text{kg CO}_2/\text{m}^3 = 22.02\text{kg CO}_2/\text{día}$$

Emisiones anuales:

$$22.02\text{kg CO}_2/\text{día} * 365 = 8037.3\text{kg CO}_2/\text{año}$$

$$= 8.04 \text{ toneladas de CO}_2 \text{ por año}$$

Huella de carbono futura en la finca Aguas Frías:

$$4.8\text{m}^3 * 7.34\text{kg CO}_2/\text{m}^3 = 35\text{kg CO}_2/\text{ día}$$

Emisiones anuales futuras producidas en la finca Aguas frías:

$$35.23\text{kg CO}_2/\text{día} \times 365 = 12,860\text{kg CO}_2/\text{año}$$

$$= 12.86 \text{ toneladas de CO}_2 \text{ por año}$$

Huella de carbono usando el biodigestor:

1m<sup>3</sup> de biogás con un 60% de metano produce aproximadamente entre 1.5 – 1.8 kg de CO<sub>2</sub> al quemarse. Se toma en cuenta en consumo diario de gas actual multiplicado por la su generación de CO<sub>2</sub>:

$$3\text{m}^3 \text{ de biogas} \times 1.5 \text{ kg CO}_2 = 4.5\text{kg CO}_2/\text{día}$$

Se hace la comparativa con las emisiones efectuadas por el gas butano obteniendo una menor cantidad de dióxido de carbono producido por el biogás al quemarse.

$$\text{Emisiones evitadas por día} = 17.52 \text{ kg CO}_2/\text{día}$$

**Tabla 7** Emisiones producidas por el consumo de gas en la finca Aguas Frías

Fuente energética	Factor de emisión
Gas butano (kg)	2,96 kg CO <sub>2</sub> /kg de gas butano
Gas propano (Kg)	2,94 kg CO <sub>2</sub> /kg de gas propano
Gas metano (m <sup>3</sup> )	1.8 kg de CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> de gas metano

### 13.4.4 Componentes del biodigestor

**Figura 7** Marca de manómetro seleccionado



1. Manómetro (marca AQUALIMPIA ENGINEERING)

Descripción técnica:

Los manómetros están diseñados específicamente para la medición fiable de la presión en sistemas de biogás, gas de vertedero y gas de depuradora, donde la resistencia a la corrosión, la estanqueidad y la estabilidad a largo plazo son esenciales.

Fabricados con materiales de alta calidad (como acero inoxidable y sellos resistentes al H<sub>2</sub>S y a la humedad), los manómetros garantizan un funcionamiento seguro incluso en condiciones de gas crudos con presencia de condensados y contaminantes.

Ventajas principales:

- Alta precisión en la medición de presión positiva y negativa (vacío).
- Carcasa hermética con protección IP65 o superior, ideal para atmósferas con alto contenido de humedad.
- Escalas personalizables, disponibles en mbar, kPa o psi según requerimiento del sistema.
- Certificación CE y conformidad con normativas ATEX para zonas con riesgo de explosión.

Aplicaciones típicas:

- Plantas de biogás agrícolas e industriales.
- Estaciones de desulfuración y deshumidificación.
- Gasómetros de doble membrana.
- Calderas y sistemas de combustión a biogás.
- Equipos de control y seguridad en redes de gas bajo presión.
- Fiabilidad Alemana:
  - Con décadas de experiencia en instrumentos industrial, combina ingeniería de precisión alemana con innovación tecnológica, ofreciendo instrumentos que aseguran la máxima seguridad operativa y eficiente energética en cada sistema de biogás.
- Exactitud de la medición de los manómetros:
  - En la esfera del manómetro se indica un margen de error que es válido a una temperatura ambiente de +20 °C.
  - La desviación permitida puede ser de aproximadamente +0.4% del valor final de la escala por cada aumento de 10 °C, y de aproximadamente -0.4% del valor final de la escala por cada disminución de 10 °C.

Se suministran con llave de cierre para garantizar una larga vida.

## 2. Válvula de bola (marca WITT)

Se selecciona la marca WITT para las válvulas ya que son de protección fiable contra un auto incendio y poseen aptitud y utilización para PN 40 ratificado en informe BAM.

Son válvulas de bola para gases con rosca hembra, rosca macho y conexiones brida.

Las dimensiones de las válvulas de bola cumplen, generalmente, con las normativas DIN (longitud y bridas).

Las válvulas de bola con rosca hembra para gas natural o gas líquido, se entregan con un número de registro de la DVGW (Asociación Técnica y Científica Alemana de Gas y Agua). En este caso están limitadas al nivel de presión PN 16.

Esta marca de válvula de bola está diseñada para evitar una ignición interna cumpliendo los códigos prácticos. La idoneidad y utilidad del nivel de presión PN 40 está avalado por informes de la BAM.

**Figura 8** Marca de la válvula seleccionada.



### 3. Tubo de carga (Tubería marca PEAD Lisa)

Para el tubo de carga se seleccionó tubería de marca PEAD de tipo lisa, de pared sólida e interior liso utilizado en los sistemas de conducción de agua potable a presión, gas, líneas contra incendios, cableado eléctrico y la industria minera.

Está certificada con la norma oficial mexicana: NOM 001-CONAGUA-2011. “Sistema de agua potable, Toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba”.

Ventajas.

- Materia Prima:

La tubería PEAD Lisa de pared solido e interior liso fabricado con resina bimodal certificada PE4710 o PE100 según aplique. Presenta propiedades mecánicas superiores como dureza, resistencia a la tensión, aplastamiento y abrasión. Es de alta resistencia química, no tóxico y larga vida útil.

- Mayor hermeticidad:

El tubo de polietileno de alta densidad liso puede ser unido por termofusión a socket, solape, electrofusión a tope: método en el cual se consigue una unión monolítica más resistente que la tubería misma 100% hermética.

- Facilidad de instalación:

Este tipo de tubería de polietileno de alta densidad lisa es ligero en peso y flexible, adaptándose a terrenos irregulares y soportando cargas dinámicas, lo que conlleva a su facilidad de instalación de bajo costo.

- Control de calidad:

Está en conformidad con las normas aplicables en el laboratorio acreditado por EMA (entidad Mexicana de Acreditación).

**Figura 9** Tubería seleccionada marca PEAD



Cálculo de dimensiones del agitador mecánico LUZ GIANT MIXFR

Diámetro del agitador: Generalmente entre 1/3 y 1/2 del diámetro del biodigestor.

Altura de las palas: Aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de la altura del biodigestor

Numero de palas: Dependiendo del tamaño generalmente entre 2 y 4 palas.

Por tanto, tenemos:

Diámetro del agitador: 1.6

Altura de las palas: 0.4

**Tabla 8** Dimensiones reales del agitador

Dimensionado de las palas	
Número de palas	3
Material	Acero inoxidable
Longitud	0.5m
Ancho	0.1m
Espesor	0.005m

**Tabla 9** Costo económico de cada componente del biodigestor

Inversión por componente	
Componente	Costo
Sub total materiales de construcción	42205
Sub Total Tubería	2954
Sub total Equipos	4404
Sub Total Mano de Obra	18075
Total, Inversión	-67638.10

**Tabla 10** *Costos económicos de materiales para la implementación del biodigestor*

<b>1</b>	<b>Materiales en General a granel</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precios (US\$)</b>	<b>Total (US\$)</b>
1.1	Arena	3.3	m <sup>3</sup>	25	83
1.2	Piedrín	1	m <sup>3</sup>	40	40
1.3	Cemento	18	Bolsas de 45 kg	10	180
1.4	Ladrillos 30x15x9	500	Unidades	0.3	150
1.5	Malla tipo criba de 2x2	15	m	2.05	31
1.6	Material de relleno	0.38	m <sup>3</sup>	20	8
1.7	Pintura acrílica	1	Galón	44	44
1.8	Varilla de hierro	10	Piezas/6m	6	60
	<b>Sub total materiales de construcción</b>				<b>595</b>

**Tabla 11** *Costos de tuberías*

<b>2</b>	<b>Tubería/Conducción de Biogas</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio (US\$)</b>	<b>Total (US\$)</b>
2.1	Tubería de la cúpula	1	Tubo Hg 1" de diámetro y 60 cm de largo + codo Hg de 1" y en ángulo de 90 grados y reductor Bushing Hg de 1" a 1/2"	20	20
2.2	Tubo PVC de 4" de diámetro (Drenaje)	1	Piezas/6m	8.5	8.5
2.3	Válvula de media vuelta 1/2" HG	2	Unidad	4	8
2.4	Tubo de PVC 1/2" de diámetro	7	Piezas/6m	2	14
2.5	Codos de PVC 1/2" de diámetro 90 grados	6	Unidad	0.5	3
2.6	"T" PVC de 1/2" de diámetro	2	Unidad	0.5	1
2.7	Llave de pase PVC 1/2	2	Unidad	1.0	2
2.8	Niple de Hg 1/2" de diámetro	3	Unidad	1	3
2.9	Teflón	1	Global	1	1
2.10	Pegamento de PVC (1/16 de galón)	1	Libras	1.0	1
2.11	Clavos de 1"	2	Libras	1.0	2
2.12	Clavos de 3"	1	Libras	1	1
2.13	Alambre de amarre No.18	6	Unidad	1.5	9
2.14	Tapón Hembra de 1/2" HG	1	Unidad	1	1

2.15	“T” HG de 1/2”	1	Unidad	1	1
2.16	Brida Metálica 1/2”	8	Unidad	0.5	4
2.17	Adaptador Macho 1/2” de PVC	1	Unidad	1	1
	<b>Sub Total Tubería</b>				<b>81</b>

**Tabla 12** *Costo de equipos a instalar*

<b>3</b>	<b>Equipos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precios (US\$)</b>	<b>Total (US\$)</b>
3.1	Cocina con doble quemador	1	Unidad	120	120
3.2	Manómetro	1	Unidad	-	-
	<b>Sub total Equipos</b>				<b>120</b>

**Tabla 13** *Costos de mano de obra*

<b>4</b>	<b>Mano de Obra</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precios (US\$)</b>	<b>Total (US\$)</b>
4.1	Excavación y preparación del sitio	16	Días Hombres	10	160
4.2	Ayudante de albañil 1	7	Días Hombres	10	70
4.3	Ayudante de albañil 2	9	Días Hombres	10	85
4.4	Albañil	10	Días Hombres	13	123.5
4.5	Maestro de Obra	3	Días Hombres	18	54
4.6	Alimentación	44	Días Hombres		0
	<b>Sub Total Mano de Obra</b>				<b>493</b>

**Tabla 14** Cálculos de VAN y TIR

	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>FF</b>	-C\$ -67,638.10	C\$ 38,382.5 2	C\$ 38,382.5 2	C\$ 38,382.5 2	C\$ 38,382.5 2	C\$ 38,382.5 2
<b>Factor de actualización (12%)</b>	<b>1.0000</b>	<b>0.8929</b>	<b>0.7972</b>	<b>0.7118</b>	<b>0.6355</b>	<b>0.5674</b>
<b>Saldo actualizado</b>	<b>-67,638.10</b>	<b>34,270.1</b> 1	<b>30,598.3</b> 1	<b>27,319.9</b> 2	<b>24,392.7</b> 9	<b>21,779.2</b> 7
<b>Saldo actualizado acumulado</b>	<b>-67,638.10</b>	<b>-</b> 33,367.9 9	<b>-2,769.68</b>	<b>24,550.2</b> 4	<b>48,943.0</b> 2	<b>70,722.2</b> 9
<b>TASA</b>	12%					
<b>VNA</b>	C\$138,360 .39					
<b>VAN</b>	C\$ 70,722.29					
<b>TIR</b>	49%					

<b>Periodo recuperación</b>	<b>de</b>	2.1 año					
---------------------------------	-----------	---------	--	--	--	--	--

## 14. Conclusiones

La presente investigación permitió dimensionar una propuesta técnica para la implementación de un biodigestor anaerobio de flujo continuo en la finca Aguas Frías. A partir del análisis realizado se determinó que la finca dispone de la cantidad suficiente y estable de sustrato orgánico, generando en promedio 150 Kg diario de estiércol utilizable, esto garantiza una continuidad en el proceso de la digestión anaerobia y en la producción constante del biogás.

Los resultados obtenidos demuestran que la demanda energética para la cocción de alimentos en la finca puede ser cubierta por la producción estimada de biogás, la cual alcanza un valor aproximado de 15 m<sup>3</sup>/días, volumen que supera los 3m<sup>3</sup> diario requerido actualmente y los 4.8 m<sup>3</sup> proyectados a futuro.

A si mismo el dimensionamiento técnico permitió definir un biodigestor con un volumen total de 7,800 litros, integrando factores de seguridad, tiempo de retención y espacios de acumulación de gas, asegurando un funcionamiento estable y acorde a las características climáticas y operativas de la finca.

En términos económicos y ambientales, la propuesta demostró ser favorable, el análisis financiero mostró un Valor Actual Neto (VAN) positivo y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 22%, esto demuestra una rentabilidad en el proyecto. Además, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero se presenta como un beneficio significativo, ya que el uso de biogás evita la liberación de metano y disminuye la dependencia de combustibles fósiles, contribuyendo a la sostenibilidad del entorno y mejorando la calidad de vida de las familias involucrada.

Finalmente, se concluye que la implementación del biodigestor no solo es técnica y económicamente viable, sino que representa una alternativa sostenible y replicable en otras fincas rurales con características similares.

## 14 Recomendaciones

A los dueños de la finca Aguas Frías

1 implementar el biodigestor diseñado siguiendo estrictamente las proporciones y parámetros técnicos establecidos en el estudio, especialmente en relación con la mezcla estiércol-agua y el volumen de carga. Esto permitirá evitar fallas como las ocurridas en la instalación anterior y garantizar una producción estable de biogás.

2 establecer un protocolo de operación y mantenimiento, que incluya:

Limpieza periódica de tuberías y trampas de aguas.

Revisión del nivel de carga diaria.

Monitoreo del funcionamiento del sistema de mezcla y la integridad del reactor.

3 capacitar a los miembros de la familia y trabajadores de la finca en la correcta manipulación del biodigestor, para asegurar su funcionamiento continuo y prolongado.

4 evaluar la posibilidad de ampliar el sistema de en el futuro, en caso de que la finca incremente su número de trabajadores su demanda energética crezca, dado que la producción calculada tiene potencial para escalarse.

A la Universidad Unan Managua. CUR Estelí

1 continuar promoviendo estudios aplicados en el área de energías renovables que respondan a necesidades reales de las comunidades rurales, tal como el presente proyecto.

2 fortalecer los vínculos con productores y fincas locales creando espacios donde estudiantes puedan desarrollar proyectos prácticos que mejoren la productividad y la sostenibilidad del sector agropecuario.

3 promover proyectos de investigación continuos que evalúen el desempeño del biodigestor a lo largo del tiempo (producción real de biogás, calidad del digestato, impacto ambiental) generando datos útiles para futuras implementaciones en la región.

4 fortalecer la formación prácticas del estudiantado, incorporando ensayos experimentales, prácticas de laboratorio y estudios de casos en biodigestión anaerobia.

## 15 Referencias Bibliográficas

- Ngetuny, J., Hsaine, J., Mabrouki, A., Rachidi, F., El Asli, A., & Zörner, W. (2025). Biomass Conv. Bioref. *Evaluación de residuos agrícolas para plantas de biogás a pequeña escala e impulsores de su adopción: un estudio de caso de la región de Fez-Mequinez en Marruecos.*, 16.
- Academia de las renovables Santa Fe. (2017). Curso operación y mantenimiento de sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala. *Unidad II: Biodigestión Anaeróbica*, 3-4.
- Agga, G., Kasumba, M., Loughrin, J., & Conte, E. (2020). Anaerobic digestion of tetracycline-spiked livestock manure and poultry litter increased the abundances of antibiotic and heavy metal resistance genes. *Frontiers in Microbiology*, 11.
- Díaz Salazar, S., & Torres Cortes, H. (2019). *Análisis de viabilidad de la implementación de biodigestores como alternativa energética para familias del área rural*. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia - Facultad de Ciencias Económicas .
- Durazno Coronel , A. (2018). *Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas*. Cuenca, Ecuador : Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca .
- Flores, J. (2010). Plan piloto de biodigestores para el aprovechamiento de las heces de porcino obteniendo biogás y biofertilizante. *Universidad De Las Américas* (pág. 50). Quito, Ecuador: Facultad de Ingeniería Agroindustrial y de Alimentos.
- Hossain, M., & Islam, M. (2008). An alternative fuel for motor vehicles. *Energy Sources* , 30.
- Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, XXXIX(1)*, 35-48.
- McPhail, S. (2012). *Fuel Cells in the Waste-to-energy Chain: Distributed Generation Through Non-conventional Fuel Cells*. Springer Science & Business Media.

- Olaya Arboleda , Y., & Gonzalez , L. (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores* . Palmira .
- Parra-Ortiz, D. L., Botero-Londoño, M. A., & Botero-Londoño, J. M. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías* , 152-153.
- Passos, E., dos Santos, I., & Andrade, M. (2021). Effect of feed slurry dilution and total solids on specific biogas production by anaerobic digestion in batch and semi-batch reactors. *Journal Of Material Cycles and Waste Management*, 23.
- Rivas-Solano, O., Faith-Vargas, M., & Gillén-Watson , R. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Revista tecnología En Marcha*, 39.
- Varnero Moreno, P. T. (2011). *MANUAL DE BIOGÁS*. Chile: FAO.

## 16 Anexos.

### FORMATO DE ENTREVISTA:

*1 ¿Cuántas cabezas de ganado bovino tiene actualmente en la finca?*

*2 ¿Cuántas personas viven en la finca?*

*3 ¿Cuántas horas al día se usa la cocina para preparar los alimentos?*

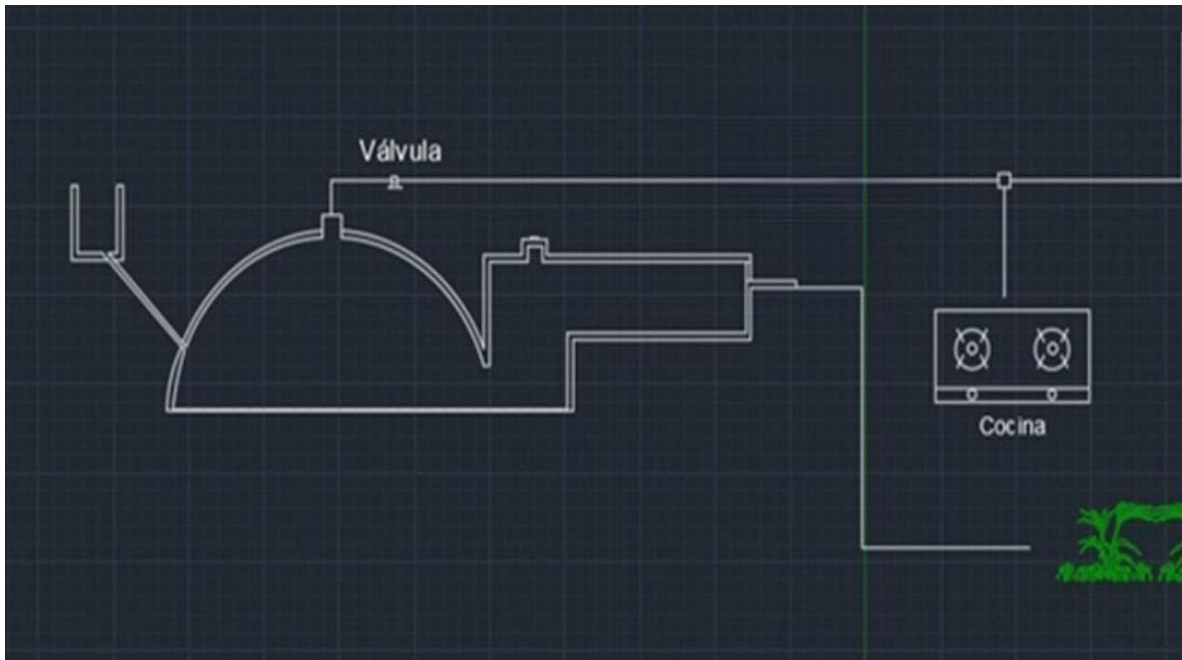
*4 ¿Cuánto dinero gastan mensualmente en la compra de gas y leña para cocinar?*

*5 ¿Qué piensa que fallo para que no funcionara el biodigestor?*

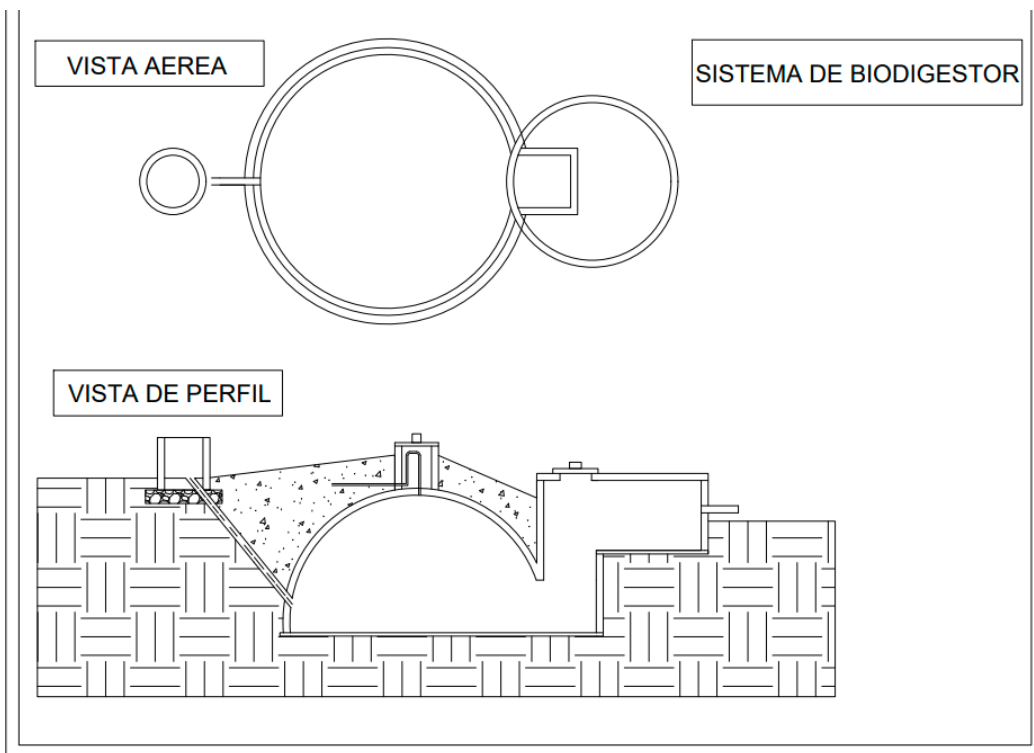
*6 ¿está dispuesto a usar el subproducto el digestato como fertilizante en los pasto y cultivos?*

*7 ¿Qué opina su familia de cocinar con biogás?*

**Figura 10** Diagrama del esquema de interconexión de tuberías.



**Figura 11** Diagrama del biodigestor



**Figura 10** *Llenado de pequeños biodigestores de prueba con distintas relaciones de sustrato.*



**Figura 11** *Relación 1:1 y 1:2 en mini biodigestores de prueba.*



**Figura 12** *Producción de biogás a los 20 días de retención con la relación 1:2.*





*¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!*



