

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Evaluación del uso de la digestión anaerobia como tratamiento para reducir los  
desechos de pedúnculo en casas empacadoras de banano

INGE-2216

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingenieras en Alimentos**

Presentado por:

Marianela Michell Montalván Toala

Ana Mercedes Vega Caiza

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## **Dedicatoria**

---

Esta tesis la dedico con todo mi corazón y afecto. A mis padres, por su apoyo constante, tanto económico como moral, que fueron el pilar de mi camino académico. Su apoyo incondicional desde el primer día fue mi fortaleza y motivación. A mis queridas hermanas por siempre darme un motivo para seguir adelante. A mis amigos, a quienes considero una familia extendida.

**Ana Vega**

Dedico este trabajo con mucho cariño a mis padres por su apoyo en esta travesía académica. A mis hermanos, parte importante de mi vida. A mis amigos, por su aliento, alegría y complicidad en esta etapa universitaria. A mi prima Nadia, por ser una gran compañía y siempre motivarme con sus palabras de aliento. Y especialmente a Moisés, por creer en mí y ser mi fortaleza durante los momentos más difíciles.

**Marianela Montalván**

## **Agradecimientos**

---

Agradezco a Dios, cuya guía y fortaleza han sido fundamentales en este camino académico y profesional. También, agradezco al PhD. César Moreira, mi tutor de tesis, por su apoyo y dedicación constante a nuestro proyecto. Agradezco de manera infinita a los laboratorios FCV y CIBE, así como a la Ing. María José Acuna por su atención y paciencia. Además, agradezco a mi compañera de tesis, Marianela, por su colaboración y su compromiso durante todo el proceso.

**Ana Vega**

Agradezco a Dios que ha sido una guía en este camino. A nuestro tutor PhD. César Moreira, por su enseñanza, paciencia y apoyo durante todo el proyecto. A mi compañera Ana, por su perseverancia y dedicación en este trabajo.

**Marianela Montalván**

## Declaración Expresa

---

Nosotros Marianela Michell Montalván Toala y Ana Mercedes Vega Caiza acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 3 de febrero del 2024.



Marianela Montalván

Autor 1



Ana Vega

Autor 2

## **Evaluadores**

---

**MSc Andrea Desiré Ortega Suasnavas**

Profesor de Materia

---

**PhD Cesar Miguel Moreira**

**Valenzuela**

Tutor de proyecto

## Resumen

Este estudio tuvo como objetivo realizar un diseño de proceso de digestión anaerobia del pedúnculo de banano para reducir los desechos producidos por casas empacadoras de banano en el Ecuador, analizando la viabilidad de emplear este proceso para generación de un recurso práctico, específicamente metano, para su uso como fuente de combustible. Para alcanzar este objetivo se llevó a cabo un análisis del potencial bioquímico del metano generado durante el proceso. En la investigación se empleó un diseño factorial  $3 \times 2 \times 2 \times 1$  para evaluar la producción de metano utilizando pedúnculo de plátano como sustrato (en jugo, fibra y trozos). El experimento implicó temperaturas variables de 30 y 50°C, concentraciones de sólidos totales (ST) de 25 y 30% y un tiempo de 34 días. La variable respuesta fue medida en  $\text{mlCH}_4/\text{g SV}$  y los datos resultantes analizados estadísticamente. Los resultados revelaron la digestibilidad efectiva de los pedúnculos de banano para la producción de biometano, observándose rendimientos óptimos en muestras que contenían 30% ST a 30°C. Esto indica que la utilización sostenible de los desechos del banano mediante la digestión anaeróbica es factible, presentando aplicaciones potenciales en la generación de biogás con fines energéticos.

**Palabras Clave:** metano, potencial bioquímico de metano, sólidos totales, biogás

### **Abstract**

*The objective of this study was to design an anaerobic digestion process of the banana peduncle to reduce the waste produced by banana packing houses in Ecuador, analyzing the feasibility of using this process to generate a practical resource, specifically methane, for use as a fuel source. To achieve this objective, an analysis of the biochemical potential of the methane generated during the process was carried out. In the research, a 3x2x2x1 factorial design was used to evaluate methane production using banana peduncle as a substrate (in juice, fiber, and chunks). The experiment involved varying temperatures of 30 and 50°C, total solids (TS) concentrations of 25 and 30%, and a time of 34 days. The response variable was measured in mlCH<sub>4</sub>/g SV and the resulting data were statistically analyzed. The results revealed the effective digestibility of banana peduncles for biomethane production, with optimal yields being observed in samples containing 30% ST at 30°C. This indicates that the sustainable use of banana waste through anaerobic digestion is feasible, presenting potential applications in the generation of biogas for energy purposes.*

**Keywords:** *methane, biochemical methane potential, total solids, biogas*

## Índice general

Resumen .....	I
<i>Abstract</i> .....	II
Índice general .....	III
Abreviaturas .....	V
Simbología .....	VI
Índice de figuras .....	VII
Índice de tablas .....	VIII
Índice de Ecuaciones .....	IX
Capítulo 1 .....	1
1.1    Introducción.....	2
1.2    Descripción del problema.....	3
1.3    Justificación del problema .....	3
1.4    Objetivos.....	4
1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....	4
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	4
1.5    Marco teórico.....	5
1.5.1    Residuos de la plantación de banano.....	5
1.5.2    Pedúnculo .....	5
1.5.3    Digestión anaerobia.....	5
1.5.4    Sistemas utilizados para la digestión anaerobia .....	7
1.5.5    Temperatura de operación en la digestión anaerobia .....	8
1.5.6    Potencial Bioquímico de Metano .....	9
Capítulo 2 .....	11
2.1    Metodología.....	12
2.1.1    Diseño experimental.....	12
2.1.2    Muestras de estiércol.....	12

2.1.3	Sustrato.....	12
2.1.4	Molido .....	13
2.1.5	Cortado .....	13
2.1.6	Determinación de sólidos totales de estiércol vacuno.....	13
2.1.7	Determinación de sólidos totales de pedúnculo de banano .....	14
2.1.8	Determinación de sólidos volátiles de pedúnculo de banano.....	14
2.1.9	Preparación de inóculo .....	15
2.1.10	Adición de sustrato.....	16
2.1.11	Distribución de inóculo y sustrato.....	16
2.1.12	Medición del volumen del gas producido .....	17
2.1.13	Determinación del Potencial Bioquímico de Metano (BMP) .....	19
2.1.14	Análisis estadístico.....	19
2.1.15	Producción y proyección de espacios de trabajo.....	19
Capítulo 3	.....	19
3.1	Resultados y análisis.....	20
3.1.1	Caracterización fisicoquímica del inóculo .....	20
3.1.2	Caracterización fisicoquímica del sustrato.....	20
3.1.3	Producción de Metano.....	20
3.1.4	Análisis BMP .....	23
3.1.5	Proyección de espacios.....	28
3.1.6	Costos de producción .....	31
Capítulo 4	.....	33
4.1	Conclusiones y recomendaciones .....	34
4.1.1	Conclusiones .....	34
4.1.2	Recomendaciones.....	34
Referencias	.....	36
Apéndices	.....	41

## Abreviaturas

BMP	Biochemical Methane Potential (Potencial Bioquímico de Metano)
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles
PET	Polietileno Tereftalato
TRA	Tabla Relacional de Actividades
SLP	Systematic Layout Planning
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno

## Simbología

ml	Mililitros
g	Gramo
pH	Potencial de Hidrógeno
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Ácido Fosfórico
NaHCO <sub>3</sub>	Cobre
NaOH	Hidróxido de Sodio

## Índice de figuras

Figura 1.1 Etapas metabólicas y grupos microbianos que intervienen en la digestión anaerobia ...	6
Figura 2.1 Muestras de pedúnculo en secador de bandejas.....	14
Figura 2.2 Medición de metano a partir del método volumétrico.....	18
Figura 3.1 Producción de metano acumulada en los tres sustratos utilizados.....	20
Figura 3.2 Gráfico de medias correspondiente al tipo de sustrato .....	23
Figura 3.3 Gráfico de medias correspondiente a la temperatura.....	23
Figura 3.4 Gráfico de medias correspondiente a los sólidos totales .....	24
Figura 3.5 Gráfico de medias correspondiente al tiempo.....	24
Figura 3.6 Gráfico de interacciones entre los tipos de sustrato y sólidos totales.....	25
Figura 3.7 Gráfico de interacciones entre la temperatura y los sólidos totales.....	26
Figura 3.8 Gráfico de interacciones entre la temperatura y el tiempo .....	27
Figura 3.9 Gráfico de interacciones entre los sólidos totales y el tiempo.....	27
Figura 3.10 Diagrama de proceso básico del proceso de producción de metano.....	28
Figura 3.11 Tabla de Relación de Actividades del proceso de producción de metano.....	29
Figura 3.12 Lay-out tentativo de las áreas de la planta.....	31

**Índice de tablas**

Tabla 1.1 Rangos de temperatura y tiempo de digestión .....	8
Tabla 2.1 Distribución de muestras de inóculo y sustrato en condiciones termófilas .....	17
Tabla 2.2 Distribución de muestras de inóculo y sustrato en condiciones mesófilas .....	17
Tabla 3.1 Características fisicoquímicas del estiércol vacuno .....	20
Tabla 3.2 Características fisicoquímicas del pedúnculo de banano en sus tres presentaciones ....	20
Tabla 3.3 Estimación de área por departamento .....	30
Tabla 3.4 Costos de inversión para producción de metano.....	31
Tabla 3.5 Flujo de ingresos y egresos totales .....	31
Tabla 3.6 Valores de la inversión inicial con tasa de interés .....	32
Tabla 3.7 Resultados VAN Y TIR .....	32

## Índice de Ecuaciones

Ecuación 2.1 Sólidos totales.....	13
Ecuación 2.2 Sólidos volátiles .....	15
Ecuación 2.3 Sólidos volátiles añadidos .....	16
Ecuación 2.4 Cálculos de BMP .....	19

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

El Ecuador es uno de los principales productores y exportadores de banano en el mundo, cubriendo un 29% del mercado internacional. De acuerdo con la Asociación de Exportadores de Banano del Ecuador de enero a noviembre del año 2022 se exportaron 234,42 millones de cajas de banano. De esta manera en el país existen alrededor de 162.236 hectáreas sembradas de banano destinado a exportación, siendo las provincias de El Oro, Guayas y Los Ríos las de mayor producción (León et al., 2023). Esta actividad trae como consecuencia una generación significativa de desechos que se producen principalmente en las casas empacadoras de banano, entre los que se destaca el pedúnculo, proveniente de los racimos cosechados. Estos desechos generalmente no tienen ningún uso posterior, por lo que son colocados en espacios abiertos o en áreas cercanas a las empacadoras, lo que genera olores y gases que afectan al medio ambiente y a las comunidades alrededor.

La gestión de estos residuos se vuelve una oportunidad emergente para el desarrollo e implementación de metodologías que ayuden a tratar con estos desechos, para que se contribuya no solo con su eliminación, sino también el desarrollo de fuentes de energía renovable. La digestión anaerobia es una estrategia utilizada para el tratamiento y reducción de desechos en la industria alimentaria y la producción de biocombustibles a partir de biomasa. Este proceso se lo puede llevar a cabo en diferentes condiciones de temperatura, las cuales son termofílicas y mesofílicas, así como también se toma en cuenta factores como sólidos totales y sólidos volátiles que afectan en el desarrollo de la digestión. Además, en este proceso, se genera un efluente que conserva los nutrientes necesarios para ser utilizado como fertilizante (Cárdenas et al., 2016).

El objetivo de este proyecto plantea evaluar la viabilidad de utilizar la digestión anaerobia para transformar el pedúnculo de banano en un producto aprovechable, ya sea este biogás, para utilizar como combustible o un fertilizante a partir de lo generado en el proceso.

## **1.2 Descripción del problema**

Cada año el sector bananero produce aproximadamente 106.54 millones de toneladas de banano para abastecer la demanda global, esta cantidad de producción representa casi el 16% de la alimentación a nivel mundial (Pazmiño et al., 2017). En el transcurso de mantenimiento de estas plantaciones y durante el proceso de cosecha existen desechos como hojas, tallos, bananos de baja o alta calibración y pedúnculos.

En Ecuador existen algunas casas empacadoras que usan los residuos, incluidos los pedúnculos, tallos que sostienen a la fruta con los rizomas. Según García et al. (2020) estos pedúnculos se utilizan para la obtención de biocarbón aplicando la tecnología térmica, pero debido a que la mayor parte del sector bananero está constituida por productores pequeños que no tienen la facilidad de invertir en maquinarias costosas, estos pedúnculos son desechados en el suelo como abono, debido a la dificultad de emplear equipos con mayor tecnología para su tratamiento o conversión (Pazmiño et al., 2017).

García et al. (2020) indica que los residuos son una problemática debido a que no todas las casas empacadoras cuentan con algún método para su posterior aplicación por lo que ha llegado a tener un impacto negativo, debido a que ocupan espacio en las plantaciones y también afecta al medio ambiente produciendo gases de efecto invernadero, enfermedades y contaminación en aguas subterráneas (Guerrero et al., 2018). Y es por esto que propietarios de casas empacadoras han buscado una alternativa para usar estos pedúnculos residuales que quedan luego del proceso de cosecha.

## **1.3 Justificación del problema**

Ecuador es uno de los principales exportadores de banano a nivel mundial donde millones de familias depende económicamente de esta producción (León et al., 2020). La cosecha del banano debe realizarse cuando aún la fruta está de color verde, usualmente el tiempo de maduración oscila entre 12 a 14 semanas desde su siembra. El tallo y las hojas quedan en el

lugar de la plantación, mientras la racima de banano es llevada a la empacadora para luego ser dividida en closter. Al final del empaquetado del banano queda el pedúnculo o también conocido como raquis, el cual es desechado en un lado de la empacadora donde es acumulado (Lobo and Montero, 2020). Estos residuos han venido causando controversia ya que bibliográficamente se ha encontrado que una hectárea de plantación de banano puede generar 84 toneladas de desechos (Khatua et al., 2020). A nivel mundial al año se produce aproximadamente 114 millones de toneladas de residuos. Después de la cosecha solo se aprovecha el 20-30% de banano, mientras que el 70-80% es desperdicio que permanece en las casas empacadoras (Gómez et al., 2021). Los pedúnculos son ricos en lignocelulosa, la cual posee un alto contenido industrial, incluyendo componentes como celulosa, hemicelulosa y fibra natural. Este desecho al poseer propiedades de biodegradabilidad puede ser eficazmente utilizado mediante método de digestión anaerobia para la obtención de metano, biogás y fertilizantes (Alzate et al., 2021). Promoviendo el desarrollo de la economía circular del sector bananero y reducción del impacto ambiental.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Realizar un diseño de proceso para la utilización de pedúnculo de banano mediante el uso de la digestión anaeróbica para reducir los desechos en las casas empacadoras.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

1. Aplicar un diseño experimental factorial para la determinación del Potencial Bioquímico de Metano (BMP) del pedúnculo.
2. Seleccionar los parámetros de temperatura y sólidos totales adecuados mediante los resultados obtenidos en la determinación de BMP realizados.
3. Analizar la viabilidad de la propuesta planteada mediante un análisis de costos del tratamiento propuesto, a través de la proyección de una planta piloto.

## **1.5 Marco teórico**

### **1.5.1 Residuos de la plantación de banano**

La producción de banano en Ecuador se da a lo largo del todo el año gracias a las condiciones climáticas, de estas cosechas lo que se aprovecha para comercialización y consumo es el fruto que se encuentra en racimos, mientras que aproximadamente un 95% de toda la planta se desecha y/o se los emplea como abono para el cultivo mediante su descomposición a campo abierto. Sin embargo, estos residuos se generan en grandes cantidades y pueden llegar a causar problemas ambientales por la contaminación y proliferación de bacterias que puedan ocasionar daños en la salud humana y afectaciones en otros cultivos (Haro et al., 2017).

### **1.5.2 Pedúnculo**

La planta de banano está compuesta por tallo, pseudotallo, hojas, flor y fruto. En el tallo se diferencian a su vez tres partes: rizoma, tallo aéreo y el pedúnculo. El primero es una especie de tallo que crece de manera lateral y posee nodos; el tallo aéreo es el que crece de manera vertical sobre el suelo y, el pedúnculo es un tallo que cumple la función de sostener la flor y fijar al rizoma (Averos, 2022).

Los residuos de biomasa procedente de productos agrícolas están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Los desechos de plátano por su parte son una fuente lignocelulósica abundante (Baruah et al., 2022). Debido a su composición, especialmente por su contenido de celulosa y lignina, los residuos del banano se vuelven difíciles de degradar en condiciones de compostaje normales (Awedem et al., 2017).

### **1.5.3 Digestión anaerobia**

La digestión anaerobia es un proceso biológico en donde se aprovechan los residuos orgánicos junto con su contenido bacteriano para llevar a cabo un proceso de degradación en ausencia de oxígeno, dejando como productos aprovechables una mezcla de gases conocida como biogás y también un efluente denominado digestato (Parra et al., 2019). El biogás se encuentra

compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, sin embargo, contienen trazas de otros gases como sulfuro de hidrógeno y amoníaco. Por otro lado, el digestato, al ser un producto de materia orgánica degradada con componentes inorgánicos, posee un gran contenido de nutrientes, por lo que puede ser utilizado como fertilizante (Castro et al., 2020).

El proceso de la digestión anaerobia se lleva a cabo en cuatro etapas principales (figura 1) que se desarrollan según el tipo de microorganismos que intervengan en cada fase como bacterias fermentativas, acetogénicas y arqueas metanogénicas (Castro et al., 2020). Las etapas son:

**Hidrólisis:** En este primer paso se da una descomposición de moléculas de cadenas complejas como los carbohidratos, proteínas y lípidos en moléculas solubles como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Las encargadas de esta degradación son las bacterias hidrolíticas (OECD, 2010).

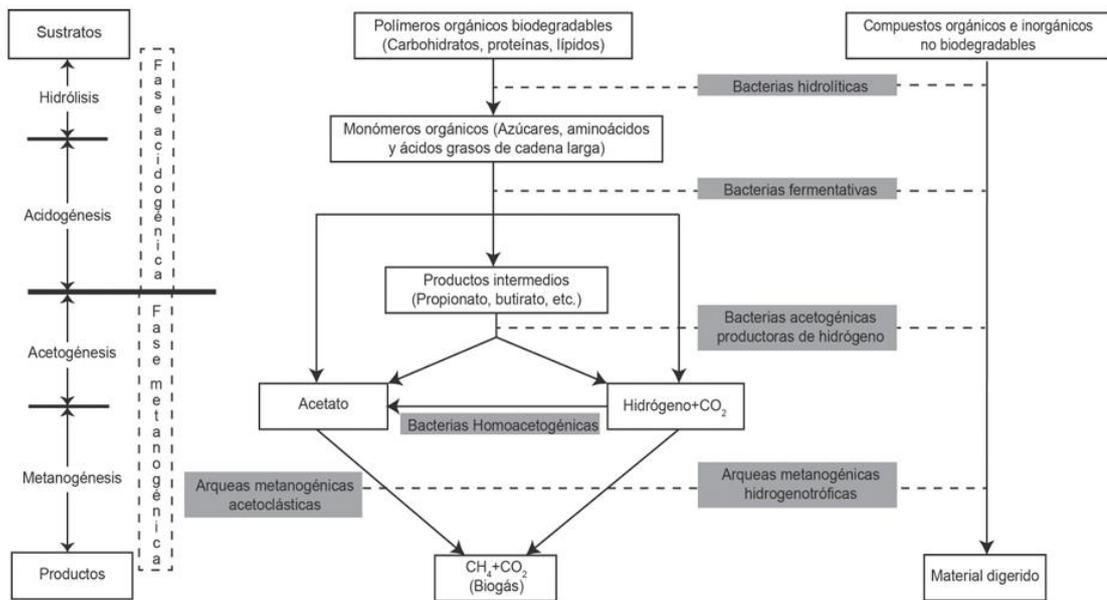
**Acidogénesis:** Los compuestos generados en la etapa anterior se degradan en cadenas cortas de ácidos grasos volátiles, como el ácido butírico (OECD, 2010).

**Acetogénesis:** En esta etapa intervienen las bacterias acetogénicas, convirtiendo los productos resultantes en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono (OECD, 2010).

**Metanogénesis:** En la fase final, se obtiene metano, debido a la acción de bacterias metanogénicas que utilizan el ácido acético y el hidrógeno para producir este gas (OECD, 2010).

### **Figura 1.51**

*Etapas metabólicas y grupos microbianos que intervienen en la digestión anaerobia*



Fuente: Cárdenas et al., 2016

En la digestión anaerobia existen parámetros que tienen que ser tomados en cuenta y controlados para tener un buen proceso de digestión, entre los cuales se destacan la temperatura, pH, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales, sólidos volátiles, relación sustrato/inóculo, entre otros. Los sustratos utilizados pueden variar desde residuos orgánicos, industriales agrícolas hasta lodos y estiércol (Castro et al., 2020).

#### 1.5.4 Sistemas utilizados para la digestión anaerobia

Existen sistemas digestores que operan con diferente concentración de sólidos totales de provenientes de residuos. En Europa dos de los más pedidos son el Dranco y Valorga, sistemas que han trabajado con desechos sea de cocina o de campo.

##### 1.5.4.1 Dranco

Sistema digestor de proceso continuo tiene forma cilíndrica como un silo el cual llega a trabajar con sólidos de 15 a 40% ST (sólidos totales) por el cual es considerado por trabajar con alto contenido de ST, también se conoce por mejorar la eficiencia de la digestión anaerobia ya que introducen el digestato con sustrato fresco al digestor. Esta práctica se realiza para superar restricciones en la transferencia de masa (Akinbomi et al., 2022).

#### 1.5.4.2 Valorga

Este sistema en comparación con el Dranco trabaja con sólidos más bajos ha sido operado entre 25 a 35% ST, es vertical, al igual que Dranco pero cuenta con un flujo a su derecha de manera horizontal también cuenta con una pared interna que favorece a la distribución de la materia orgánica, una desventaja es que consume cierta energía significativa debido a la recirculación forzada (Akinbomi et al., 2022).

#### 1.5.5 Temperatura de operación en la digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia es sensible a los cambios de temperatura, por lo que se procura mantener el reactor en un ambiente de temperatura constante. Este factor interviene en la velocidad de digestión anaeróbica del proceso, por lo que cambios repentinos de temperatura podrían desencadenar en que el proceso se vuelva inestable. Los diferentes rangos de temperatura se muestran la tabla 1, en donde se describen tres niveles de temperaturas: psicrófilico (< 25 °C), mesófilico (25-45 °C) y termofílico (45-70 °C) (FAO, 2011).

**Tabla 1.51**

*Rangos de temperaturas y tiempo de digestión*

<b>Microorganismos</b>	<b>T min.</b>	<b>T máx.</b>	<b>T óptima</b>	<b>Tiempo de digestión</b>
Psicrófilos	4-10 °C	15-18 °C	20-25 °C	Sobre 100 días
Mesófilos	15-20 °C	35-45 °C	25-35 °C	30-60 días
Termófilos	25-45 °C	75-80 °C	50-60 °C	10-15 días

El nivel mesofílico es uno de los más utilizados por la facilidad de mantener el rango de temperatura. Sin embargo, el tiempo de fermentación es un poco elevado en comparación con el rango termofílico que requiere un tiempo de entre 10 a 15 días, esto quiere decir que se obtiene una mayor velocidad en el proceso, por lo que su implementación se ha ido incrementando. Este rango, por otra parte, es generalmente inestable si las condiciones cambian y, además, el riesgo

de toxicidad causadas por compuestos inhibitorios como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga aumenta (FAO, 2011).

### **1.5.6 Potencial Bioquímico de Metano**

El sustrato empleado en el proceso de digestión anaerobia generalmente se define mediante la identificación de su biodegradabilidad, para lo cual lleva a cabo pruebas de laboratorio, siendo uno de los más utilizados el ensayo de Potencial Bioquímico de Metano (BMP por sus siglas en inglés *Biochemical Methane Potential*) debido a que es simple, relativamente rápido y económico. Este ensayo se lo realiza por lotes y determina la máxima producción de CH<sub>4</sub> del sustrato analizado, utiliza también un inóculo anaerobio con determinadas condiciones. La cuantificación del metano generado se puede realizar con métodos como manométrico, volumétrico y cromatografía de gases (Cárdenas et al., 2016).

## Capítulo 2

## 2

### 2.1 Metodología

#### 2.1.1 Diseño experimental

En el siguiente proyecto se implementó un arreglo factorial (A)x(B)x(C)x(D) con diferentes niveles para cada factor y se evaluó la producción de metano como variable respuesta. La primera variable (A) representó al sustrato con 3 niveles: jugo, pedúnculo y fibra. La segunda variable (B) correspondió a la temperatura con 2 niveles: 30 y 50 °C, la tercera variable (C), a la concentración de sólidos totales con 2 niveles de concentración: 30 y 25 % ST y la última variable (D) correspondió al tiempo el cual correspondió a 18 niveles de tiempo. El arreglo factorial se dispuso de la siguiente manera 3x2x2x1 lo que dio lugar a 12 tratamientos. Cada combinación de tratamiento se realizó por triplicado para una mejor confianza en los resultados, obteniendo al final 36 tratamientos. De esta manera se obtuvo una evaluación más completa sobre el potencial de producción de metano en las condiciones experimentales tanto de sustrato, temperatura y porcentaje de solidos totales.

#### 2.1.2 Muestras de estiércol

Se recolectaron 8 litros de estiércol de vacas saludables en una finca ubicada en el cantón La Maná, en la provincia de Cotopaxi, Ecuador. Este estiércol fue agregado manualmente en dos envases plásticos con tapas de 4 litros de polietileno de alta densidad, los cuales fueron previamente lavados, desinfectados y secados. Finalmente fueron almacenado a temperatura ambiente hasta su uso.

#### 2.1.3 Sustrato

El pedúnculo de banano se obtuvo de una casa empacadora de banano ubicada en La Maná, en la provincia de Cotopaxi, Ecuador. Este pedúnculo, perteneciente a la variedad Cavendish, fue recolectado con fin de utilizarlo como sustrato para la investigación, se almacenó

inicialmente a temperatura ambiente en bolsas de plástico y luego fue refrigerado para evitar su maduración y preservar su calidad.

#### **2.1.4 Molido**

El proceso de molienda del pedúnculo de banano se llevó a cabo en un molino marca: CORONA, modelo: L1000. Se molieron 1000 g de pedúnculo de banano, de los cuales se utilizaron 200 ml de jugo y 200 g de fibra (bagazo). Este proceso se recolectó en una bandeja limpia y la separación del jugo y la fibra se realizó mediante exprimido manual, seguido por el uso de una tela fina para optimizar la eficacia del método. El jugo y la fibra extraídos se almacenaron en refrigeración en botellas PET y en bolsas de plástico, respectivamente.

#### **2.1.5 Cortado**

Se pesaron 300 g de pedúnculo de banano y se procedió a cortar en tirillas, para luego cortarlos en trozos pequeños en forma de cubos. Estos fueron almacenados en refrigeración (alrededor de 18°C) en bolsas de plástico hasta el momento de su uso.

#### **2.1.6 Determinación de sólidos totales de estiércol vacuno**

Para la determinación de sólidos totales, se colocaron aproximadamente 100 g de muestra de estiércol en un recipiente de aluminio previamente lavado, secado y pesado (Apéndice A1). Posteriormente se lo colocó en una estufa Blinder ED-5 115-UL a una temperatura de 50°C durante 48 horas. Pasado este tiempo se pesó la muestra seca utilizando una balanza analítica marca Boeco, modelo BAS 31 plus, y se registró el peso final de la muestra. Para obtener el porcentaje de sólidos totales del estiércol, se aplicó la ecuación 2.1 (Awedem et al., 2017).

Ecuación para la determinación de sólidos totales

$$\% \text{ Sólidos Totales} = \frac{\text{Peso MSR} - \text{Peso R}}{\text{Peso MI}} \times 100 \quad (2.1)$$

Donde:

*Peso R: Peso de Recipiente (g)*

*Peso MSR: Peso secado con recipiente (g)*

### **2.1.7 Determinación de sólidos totales de pedúnculo de banano**

Se determinaron los sólidos totales de pedúnculo de banano en tres formas diferentes: trozos, fibra y jugo. Para las muestras en trozos y fibra se pesaron 100g de cada una y se colocaron en las bandeas de aluminio para luego colocarlas en un secador de bandejas a 50°C durante 24 horas, como se muestra en la figura 2.1. Por otra parte, se utilizó 50 ml del jugo de pedúnculo y se agregó a un crisol previamente lavado y pesado que luego fue colocado en una estufa a 60°C por 24 horas. Pasado este tiempo se registró el peso de las tres muestras secas y se utilizó la ecuación 2.1 para la determinación de los sólidos totales.

#### **Figura 2.1**

*Muestras de pedúnculo en trozos y fibra en secador de bandejas para la determinación de sólidos totales*



### **2.1.8 Determinación de sólidos volátiles de pedúnculo de banano**

La determinación de sólidos volátiles se realizó al sustrato cortado en trozos, en fibra y jugo; se separaron 3g de muestra de pedúnculo cortado en trozos pequeños, 3.5g de muestra de fibra y 3.5g de muestra de jugo, los cuales fueron colocados en 3 crisoles previamente pesados y secados en una mufla marca Thermo Scientific modelo F47900 a 550°C (Apéndice A2) por 30

minutos. Se procedió a colocar dentro de la mufla las tres muestras de pedúnculo durante 4 horas, manteniendo al principio la puerta abierta, durante unos segundos para permitir la salida de compuestos que puedan generarse inicialmente y lleguen a afectar el proceso. Luego de este tiempo se pasaron las muestras a un desecador por aproximadamente 20 min hasta que se enfríen y luego se pesó el contenido junto al crisol en una balanza analítica y se volvió a colocar las muestras en la mufla por 30 minutos. Se repitió este procedimiento hasta que el peso no tuvo una variación mayor. Para determinar el porcentaje de sólidos volátiles se utilizó la ecuación 2.2 (Awedem et al., 2017).

$$\%Sólidos Volátiles: \frac{m_3 - m_{nv}}{m_3} \times 100 \quad (0.1)$$

Donde:

$m_3$ : muestra seca (g)

$m_{nv}$ : muestra no volátil (g)

## 2.1.9 Preparación de inóculo

### 2.1.9.1 Inóculo 25% y 30% ST

Se prepararon 12 botellas de vidrio transparentes previamente lavadas con una capacidad de 250 ml, luego se etiquetaron 6 botellas como “Muestra A” para el inóculo correspondiente a 30% ST y las 6 botellas restantes se etiquetaron como “Muestra B” para el inóculo con 25% ST. Se colocaron 160 g de inóculo en cada una, de las cuales 3 de Muestra A y 3 de Muestra B fueron colocadas a temperatura ambiente (entre 27 y 30 °C) dentro de un contenedor de poliestireno expandido para conservar a temperatura y, las otras 6 botellas de las muestras A y B fueron colocadas dentro de una estufa a 45°C los primeros 3 días, luego a 47°C por 3 días y finalmente a 50°C, con el propósito de no causar un choque de temperatura a los

microorganismos presentes en el recipiente. El procedimiento para determinar los sólidos totales a emplear fue guiado mediante la metodología de la tesis de los autores Rosales & Villón (2020).

#### 2.1.10 Adición de sustrato

La alimentación para la digestión anaerobia fue calculada en función de sólidos volátiles del sustrato y para concentraciones de inóculo de entre 10 y 40% ST. La cantidad de sustrato a adicionar se encontraba en un rango de 7 a 14g de sólido volátil, por lo que se utilizó la ecuación 2.3 para determinar el porcentaje de SV correspondiente a cada tipo de sustrato que luego se añadió en cada reactor (Fagbohung et al., 2015).

$$\%SV = \frac{SV}{ST} \times 100 \quad (0.2)$$

Donde:

*SV: sólido volátil obtenido en pedúnculo*

*ST: sólido total obtenido en pedúnculo*

#### 2.1.11 Distribución de inóculo y sustrato

Las botellas previamente etiquetadas como muestra A1, A2 y A3 y que estaban a 50°C, cada una inicialmente con un contenido de 160g de inóculo, fueron destapadas con ayuda de un estilete y distribuidas por triplicado en botellas ámbar, colocando 50g de muestra en cada una. Este mismo procedimiento se llevó a cabo para las muestras B1, B2 y B3. Después de la distribución del inóculo, se añadió 50g de sustrato a cada botella de la muestra A1, y dado que se distribuyó por triplicado, se añadieron aproximadamente 16g a cada una. En la muestra A1 se incorporó jugo de pedúnculo, en la A2 pedúnculo en trozos, y en la A3 se reservó para contener fibra, finalmente se sellaron las botellas con unos tampones de caucho y tapas de aluminio y un sellador manual. Este proceso se replicó con la muestra B, que tenía un 25% de ST. Los detalles sobre la distribución se encuentran descritos en la tabla 2.1 y en la tabla 2.2.

**Tabla 2.1***Distribución de muestra de inóculo más sustrato en condiciones termófilas*

<b>Temperatura 50 °C</b>					
<b>Muestra A 30% ST</b>			<b>Muestra B 25% ST</b>		
	1	Jugo		1	Jugo
A1	2	Jugo	B1	2	Jugo
	3	Jugo		3	Jugo
	1	Pedúnculo		1	Pedúnculo
A2	2	Pedúnculo	B2	2	Pedúnculo
	3	Pedúnculo		3	Pedúnculo
	1	Fibra		1	Fibra
A3	2	Fibra	B3	2	Fibra
	3	Fibra		3	Fibra

**Tabla 2.2***Distribución de muestra de inóculo más sustrato en condiciones mesófilas*

<b>Temperatura 30 °C</b>					
<b>Muestra A 30% ST</b>			<b>Muestra B 25% ST</b>		
	1	Jugo		1	Jugo
A4	2	Jugo	B4	2	Jugo
	3	Jugo		3	Jugo
	1	Pedúnculo		1	Pedúnculo
A5	2	Pedúnculo	B5	2	Pedúnculo
	3	Pedúnculo		3	Pedúnculo
	1	Fibra		1	Fibra
A6	2	Fibra	B6	2	Fibra
	3	Fibra		3	Fibra

**2.1.12 Medición del volumen del gas producido****2.1.12.1 Determinación del potencial de hidrógeno (pH)**

Se pesaron 10g de muestra de estiércol en un vaso limpio y se le adicionó 10 ml de agua destilada y se procedió a homogenizar la muestra durante unos segundos y luego se dejó reposar por 1 hora. Pasado este tiempo se introdujeron tirillas de determinación de pH y se procedió a registrar el valor según el color que se presentó.

### 2.1.12.2 Ajuste de pH

Después de determinar el pH de cada muestra, se analizó cada valor. En caso de que el pH fuera superior a 7.7, se incorporó ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ); si estaba por debajo de 6.5, se añadió bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ). El objetivo fue para mantener un pH adecuado para la digestión anaerobia, que generalmente oscila entre 6.6 y 7.6.

### 2.1.12.3 Medición de Metano por método volumétrico

Los biorreactores empleados tenían una capacidad de 125 ml, el espacio ocupado por la materia orgánica fue de 66 gr quedando un espacio de almacenamiento de biogás generado de 59 ml. La medición del gas generado se realizó por medio del método volumétrico aplicado para la determinación de BMP descrito por Cárdenas et al., 2016, en donde el gas producido en los biorreactores es recogido por medio de jeringas plásticas de 50 ml y luego es pasado directamente a una solución de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) 2N para capturar el  $\text{CO}_2$  y posteriormente, por medio de desplazamiento volumétrico en otra jeringa introducida en el espacio de cabeza de la solución de  $\text{NaOH}$ , recolectar el gas libre de  $\text{CO}_2$  y determinar la producción de metano. En la figura 2.2 se muestra la adaptación de la metodología desarrollada.

### Figura 2.2

*Medición de metano a partir del método volumétrico descrito por Cárdenas et al., 2016*



### 2.1.13 Determinación del Potencial Bioquímico de Metano (BMP)

El potencial bioquímico de metano se determinó mediante la ecuación 2.5 (Sánchez et al., 2016), en donde se dividió la producción de metano acumulada durante 45 días para la cantidad adicionada de sólidos volátiles en cada reactor.

$$BMP = \frac{mL CH_4}{g SV \text{ adicionados al reactor}} \quad (0.3)$$

Donde:

*mL CH<sub>4</sub>*: cantidad de metano en ml

*g SV adicionados al reactor*: Sólido volátil

### 2.1.14 Análisis estadístico

Se empleó el software Statgraphics para un mejor análisis estadístico de los datos obtenidos con respecto al volumen de metano y por consiguiente el BMP hasta el día 34 en los 36 tratamientos realizados. Este software facilitó analizar las variaciones y relaciones entre las variables de temperatura, sólidos totales, tipo de sustrato y tiempo.

### 2.1.15 Producción y proyección de espacios de trabajo

Para estimar la capacidad productiva de una planta a escala piloto se aplicó la metodología Systematic Layout Planning (SLP) (Vanaclocha, 2005), en donde se siguió un proceso sistemático para diseñar la disposición física de una planta. Se realizó un diagrama de proceso básico, la tabla de relación de actividades y se calcularon las necesidades de espacio para las actividades definidas, para obtener una primera aproximación de una planta piloto.

## Capítulo 3

## 3

## 3.1 Resultados y análisis

## 3.1.1 Caracterización fisicoquímica del inóculo

Tabla 3.1

*Características fisicoquímicas del estiércol vacuno*

<b>Características fisicoquímicas</b>	<b>Estiércol</b>
% Sólidos totales (ST)	18,37%
pH	6
% Humedad	81%

## 3.1.2 Caracterización fisicoquímica del sustrato

Tabla 3.2

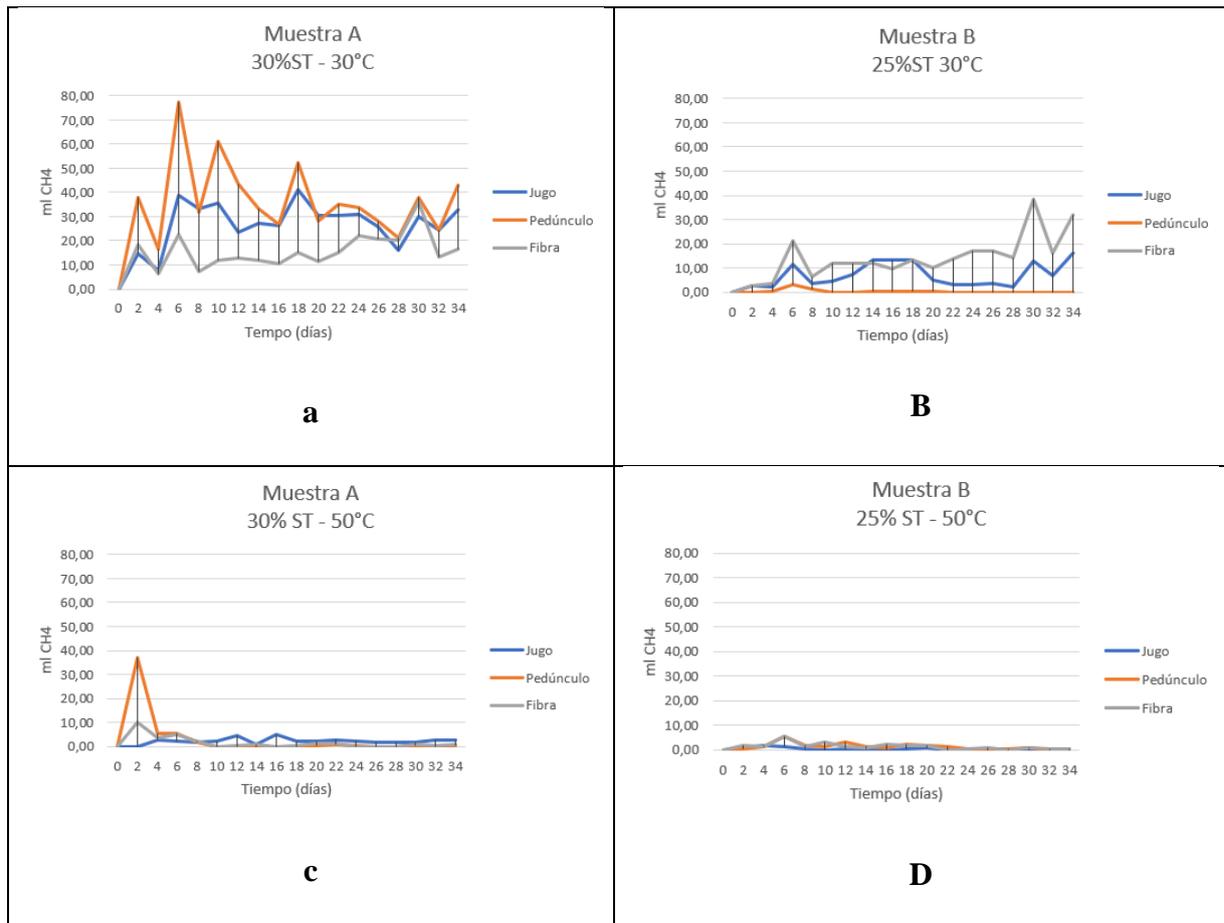
*Características fisicoquímicas del pedúnculo de banano en sus tres presentaciones*

<b>Características fisicoquímicas</b>	<b>Jugo</b>	<b>Pedúnculo trozos</b>	<b>Fibra</b>
% Sólidos totales (ST)	1,6%	5%	14%
% Sólidos Volátiles (SV)	51%	83%	86,5%
% Humedad	98,4%	95%	86%

## 3.1.3 Producción de Metano

Figura 3.1

*Producción de metano acumulada en los tres sustratos utilizados a) 30% ST régimen mesofílico, b) 25% ST régimen mesofílico, c) 30% ST régimen termofílico, d) 25% ST régimen termofílico durante 34 días*



En la figura 3.1, se muestran 4 gráficos que corresponden a la producción de metano generada en los 36 biorreactores que contenían el inóculo junto con el pedúnculo de banano en las tres diferentes presentaciones (jugo, pedúnculo (trozos) y fibra) durante 34 días. La cantidad de metano producido a una temperatura de 30°C fue favorable en el proceso de digestión anaerobia tanto para las muestras a 30% como a 25% de sólidos totales y para los tres tipos de muestras, a excepción de las muestras que contenían trozos de pedúnculo de banano en donde si hubo una diferencia entre los dos tratamientos, ya que en el gráfico b se nota que la producción generada por este no fue favorable, su mayor producción se dio en el día 6 y fue de 3 ml CH<sub>4</sub>. Por otra parte, los tratamientos sometidos a temperatura de 50°C no tuvieron una producción significativa de metano, los gráficos c y d muestran que la producción para cada uno de los tratamientos fue mayormente baja en los tres casos y, que sólo en los primeros 4 días hubo una

producción máxima de 35 ml CH<sub>4</sub> en lo generado por la muestra que contenía pedúnculo y 30% ST. El proceso de digestión anaerobia pudo verse afectado por varias razones. Entre las que se encuentran, las fluctuaciones de temperatura, según Lorenzo & Obaya, (2005) estos cambios pueden dañar el estado fisiológico de los microorganismos que participan en la digestión, debido a que llegan a ser sensibles a las variaciones violentas de temperatura. También menciona que debido al contenido de nitrógeno en el compuesto puede llegar a formarse una cantidad de amonio que llega a ser tóxico para los microorganismos anaerobios al aumentarse la temperatura a la que se encuentra el proceso.

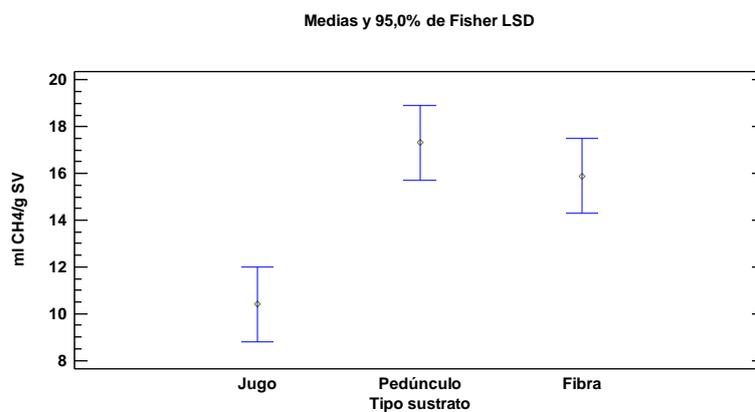
Por otra parte, la generación de metano se pudo ver influenciada por los polifenoles presentes en el sustrato, ya que mediante estudios realizados en el pedúnculo de banano se han determinado la presencia de fenoles (Quiroz, 2022). Estos compuestos estarían interfiriendo en la primera etapa de la digestión anaerobia, es decir, en la hidrólisis donde se descomponen las moléculas más complejas, haciendo que se produzca una cantidad mínima de metano en el proceso (Millegde et al. 2019). Cabe recordar que, para el caso de los reactores termofílicos, estos se mantuvieron en una cámara térmica mientras que los reactores mesofílicos permanecieron en una caja térmica de poliestireno expandido. Sin embargo, la pobre generación de metano se mantiene de manera transversal cuando se opera a régimen termofílico, lo que sugiere que el problema sea un inhibidor que puede ser exceso de nitrógeno o la presencia excesiva de polifenoles. Por otro lado, el pobre rendimiento obtenido en los reactores conteniendo jugo de extracto de pedúnculo sugieren que el problema de inhibición sea la concentración de polifenoles, ya que cuando se trabajó a 30% ST en régimen termofílico se logró obtener mayor cantidad de metano al trabajar con el pedúnculo entero. En todo caso, los resultados apuntan a una mejor performance de la digestión anaerobia cuando se opera en régimen mesofílico y a 30% ST, que será verificado con un análisis estadístico.

### 3.1.4 Análisis BMP

Los factores analizados resultaron significativos con respecto al BMP al realizar un análisis de varianza, tanto el tipo de sustrato, como la temperatura, sólidos totales y el tiempo obtuvieron un valor  $p < 0,05$  con un nivel de confianza de 95%.

#### Figura 3.2

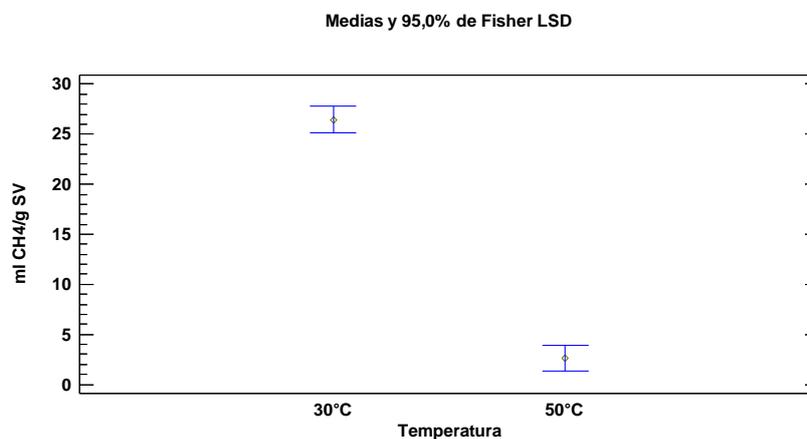
*Gráfico de medias correspondiente al tipo de sustrato*



La figura 3.2 muestra las medias obtenidas del potencial bioquímico de metano generado en la experimentación, con respecto al tipo de sustrato utilizado, se observa que el jugo no tiene una gran relevancia en la producción de metano, mientras que se nota una similitud entre las medias del pedúnculo y la fibra, siendo el primero más significativo.

#### Figura 3.3

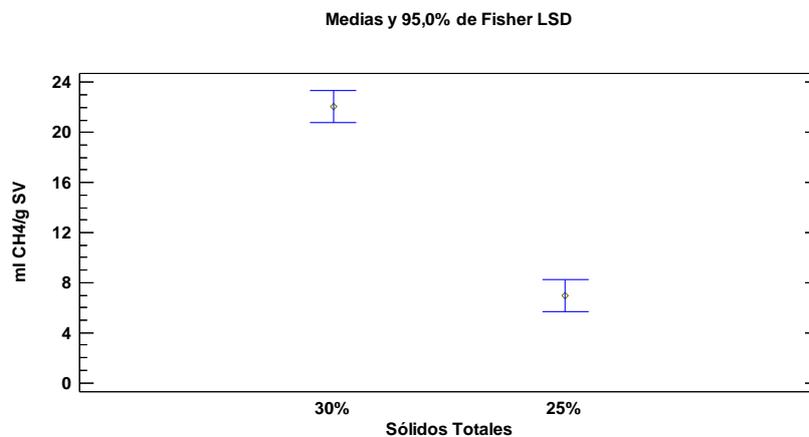
*Gráfico de medias correspondiente a la temperatura*



En la figura 3.3 se observa una separación notable y ausencia de superposición entre las líneas, por lo que existen diferencias significativas entre los tratamientos a temperatura de 30 y 50°C, teniendo la temperatura de 30°C mayor relevancia con respecto a la variable respuesta, es decir, la producción de ml CH<sub>4</sub>/g SV.

### Figura 3.4

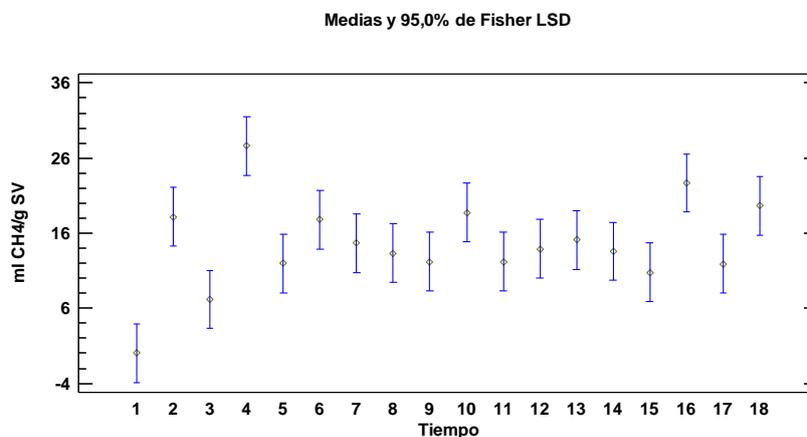
*Gráfico de medias correspondiente a los sólidos totales*



En cuanto a los sólidos totales la media más alta de los datos se encuentra en el valor de 30% de ST y como se observa en la figura 3.4 la distancia entre las líneas de las medias es amplia, por lo que existe gran diferencia significativa entre los dos tratamientos.

### Figura 3.5

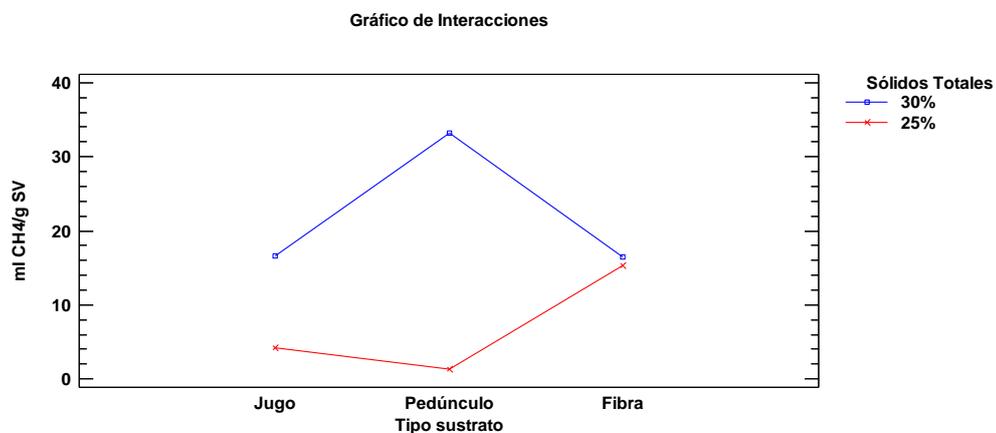
*Gráfico de medias correspondiente al tiempo*



La relación de metano por gramos de sólidos volátiles con respecto al tiempo se puede apreciar en la figura 3.5, en donde la media más alta de los datos analizados se encuentra en el tiempo 4, el cual corresponde al día 6 de la digestión, es decir, el BMP en este punto fue el más alto. El día 30 (tiempo 16) también se resgistró una producción similar de ml CH<sub>4</sub>/g SV.

### Figura 3.6

*Gráfico de interacciones entre los tipos de sustratos y sólidos totales.*



Una de las interacciones significativas en la producción del metano se observó entre el tipo de sustrato y los sólidos totales. En la figura 3.6, se destaca que la interacción más favorable es entre los trozos de pedúnculos y los sólidos totales al 30%. Contrariamente, el nivel más bajo se registra en la interacción con el mismo tipo de sustrato, pero con 25% ST. Además, se observó que la interacción con el jugo de pedúnculo con sólidos totales del 30% resultó en una mayor producción de metano en comparación con la misma interacción, pero con concentraciones del 25% ST.

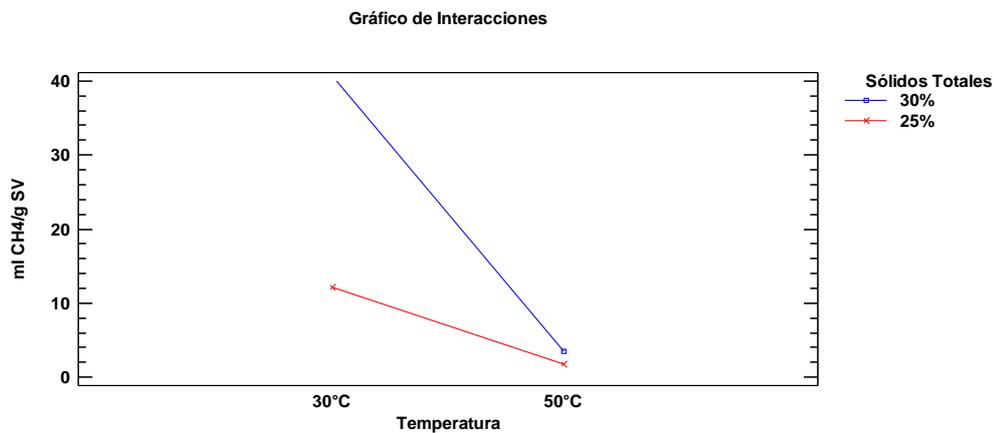
En el contexto de la digestión anaerobia, es crucial considerar el tipo de sustrato para la obtención de metano, ya que todos los componentes orgánicos presentan diversas composiciones. En este estudio, se empleó pedúnculo de banano en diferentes formas: jugo, trozos y fibra. La generación limitada de metano en los tratamientos de fibra y jugo de pedúnculo se atribuye a la presencia de lignina y hemicelulosa en el pedúnculo de banano. El pedúnculo de

banano está compuesto por celulosa 53.44%, hemicelulosa 19.83% y lignina 14.25% (Benish et al. 2022). Estos compuestos requieren tiempo para degradarse, por lo que inhibe la disponibilidad de celulosa y, en consecuencia, dificulta la descomposición rápida del pedúnculo (Kerubo et al. 2021).

La eficiencia de la digestión anaerobia es más pronunciada cuando los sólidos totales son mayores. Por lo tanto, los digestores con un 30% de sólidos totales en el proyecto mostraron mejores resultados en comparación con los que tenían un 25% de sólidos totales. Este comportamiento se atribuye a la presencia de una comunidad microbiana más activa en condiciones de mayor concentración de sólidos totales (Yi et al. 2014).

### Figura 3.7

*Gráfico de interacciones entre la temperatura y los sólidos totales*



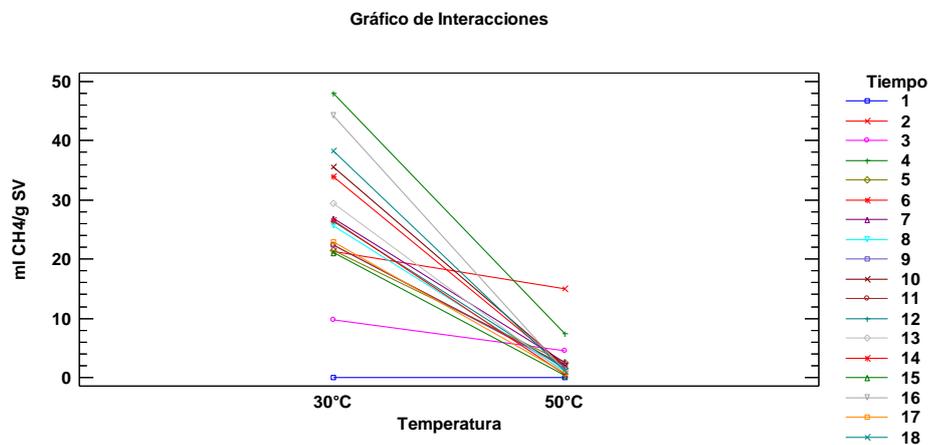
En la figura 3.7 se muestra la interacción entre la temperatura y sólidos totales se observó que a temperatura de 30°C y un 30% ST la cantidad de metano obtenida fue significativamente mayor en comparación con una concentración de 25%. En cambio, en tratamientos a 50°C para ambos porcentajes de concentración de sólidos totales, se generó una cantidad reducida de metano.

Para llevar a cabo esta investigación, se emplearon dos medios: uno mesófilo y otro termófilo. Según diversas investigaciones de varios autores, la digestión anaerobia en un ambiente termófilo tiende a acelerar la velocidad de la reacción, lo que podría generar una

producción más rápida de metano. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que la temperatura es un factor crítico y altamente sensible. A temperaturas elevadas, como de 50°C, existe la posibilidad de afectar la composición microbiana, inhibiendo ciertos microorganismos clave responsables de la digestión de compuestos orgánicos para la generación de metano (Lorenzo & Obaya, 2005).

### Figura 3.8

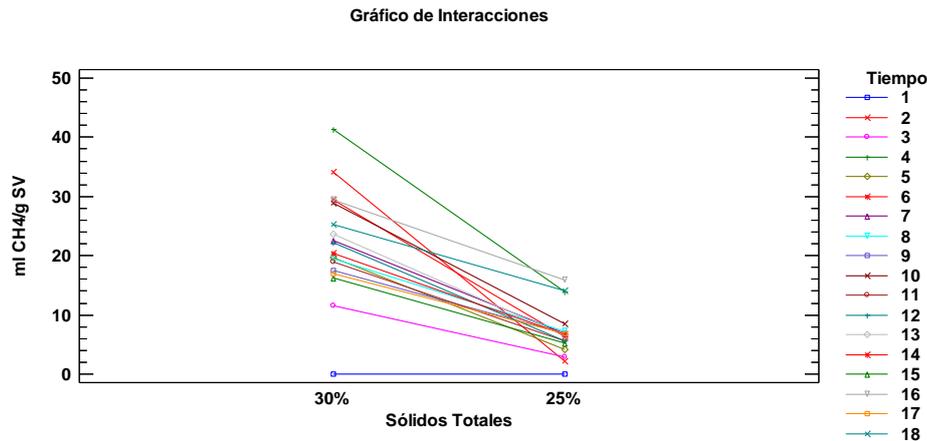
*Gráfico de interacciones entre temperatura y tiempo.*



En la Figura 3.8, se observa la interacción entre la temperatura y el tiempo en la digestión anaerobia. La producción de metano es inferior en condiciones termófilas en comparación con condiciones mesófilas. Esto sugiere que la población bacteriana en el medio termófilo requirió más tiempo para adaptarse y generar metano en comparación con el medio mesófilo.

### Figura 3.9

*Gráfico de interacciones entre los sólidos totales y el tiempo*



De la misma forma en la interacción entre los sólidos totales y el tiempo, mostrada en la Figura 3.9, se pudo visualizar que a mayor cantidad de sólidos totales mayor es el potencial bioquímico de metano. El requerimiento de una cantidad superior de sólidos totales puede deberse a que el sustrato contiene lignina, este compuesto se caracteriza por ser indigerible, es decir, es difícil que se degrade durante la digestión anaerobia (Holden et al., 2021)

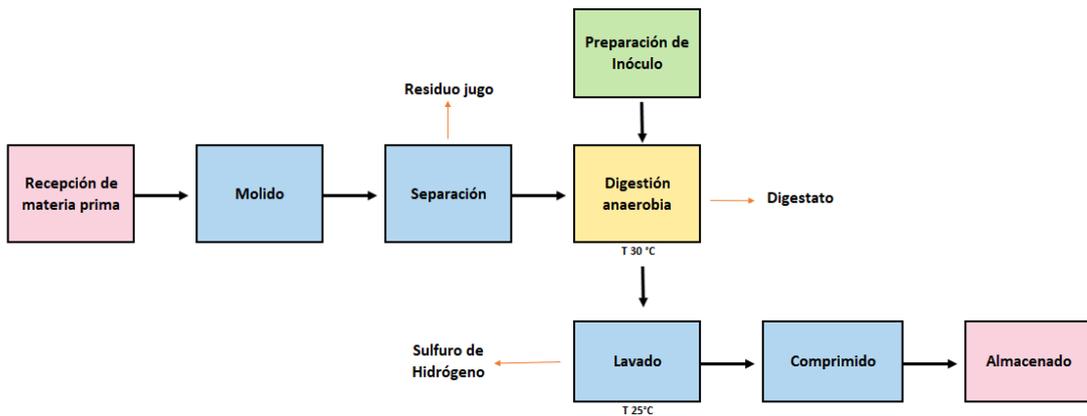
### 3.1.5 Proyección de espacios

#### 3.1.5.1 Diagrama de proceso básico

La figura 3.10 muestra un diagrama de proceso básico para la producción de metano por medio de la digestión anaerobia. La materia prima que se consideró en el proceso fue el pedúnculo de banano, mientras que en la etapa de preparación de inóculo interviene la recepción del estiércol vacuno, para luego continuar con el proceso de digestión anaerobia y posterior recolección y almacenado de metano.

#### **Figura 3.10**

*Diagrama de proceso básico del proceso de producción de metano*



### 3.1.5.2 Tabla relacional de Actividades (TRA)

En la figura 3.11 se muestra la relación de las actividades que se realizan durante el proceso de obtención de metano, esta tabla describe la proximidad de cada área involucrada mediante un código de letras y números que describen también el motivo relacionado.

Código referente a la proximidad:

A: Absolutamente necesario

E: Especialmente necesario

I: Importante

O: Ordinario

U: Sin importancia

X: Rechazable

Código referente al motivo:

1: Proximidad en el proceso

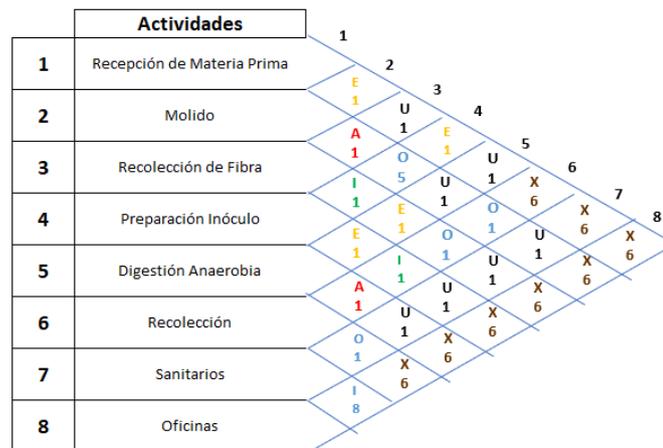
5: Malos olores, ruidos, etc.

6: Seguridad del producto

8: Accesibilidad

### Figura 3.11

*Tabla de Relación de actividades de la producción de metano*



### 3.1.5.3 Estimación de espacios

La tabla 3.3 contiene una aproximación al área necesaria para cada departamento descrito anteriormente para llevar a cabo el proceso en escala piloto. El área de preparación de inóculo se determinó para secar el estiércol al aire libre para ahorrar costos de equipos de secado. Además, en el área de digestión anaerobia se determinaron dos digestores para mejorar los tiempos de producción.

**Tabla 3.3**

*Estimación de área por departamento*

Actividad	Área por departamento (m <sup>2</sup> )
Recepción materia prima	26,91
Molido	2,6
Preparación del Inóculo	16,6
Digestión Anaerobia	13,8
Lavado y Comprimido	7,53
Almacenamiento	5,5

### 3.1.5.4 Distribución alternativa de departamentos de una planta piloto

Se elaboró un diagrama de distribución de los departamentos tentativo con la ayuda del software Corelap (Figura 3.12), en este se incluyeron las actividades descritas en el TRA (Figura 3.11) con las especificaciones de proximidad mencionadas. El flujo del proceso responde a una distribución en “U”.

**Figura 3.12**

*Lay-out tentativo de la distribución de las áreas de la planta*



### 3.1.6 Costos de producción

**Tabla 3.4**

*Costos de inversión para la producción de metano*

	Materiales/ Ingredientes	Cantidad	Unidades	Costo unitario	Costo mensual
<b>Materia prima</b>	Pedúnculo de banano	300	kg	\$ -	0
	Estiércol	300		\$ -	0
<b>Empaque</b>	Funda	2		\$ 50,00	\$ 100,00
<b>Producto</b>		4		\$ 200,15	\$ 800,60
<b>Mantenimiento</b>	Mano de obra	1	operario	\$ 15,00	\$ 15,00
<b>Mano de obra</b>	Mano de obra directa	2	operarios	\$ 2,00	\$ 690,00
<b>Servicios Básicos</b>	Agua	0,1	ml	\$ 2,00	\$ 8,0
	Luz	10	kW/h	\$ 0,10	\$ 30,00

En la tabla 3.4 se tomaron en cuenta los costos de materia prima los cuales fueron el pedúnculo y estiércol de ganado, la cantidad fue de \$0,00 debido a que los productos son residuos que quedan en casas empacadoras.

**Tabla 3.5**

*Flujo de ingresos y egresos totales*

<b>Año</b>	<b>Flujo de ingresos</b>	<b>Flujo de egreso</b>	<b>Flujo Efectivo Neto</b>	<b>Saldo Acumulado</b>
1	\$ 9.607,20	\$ 9.936,00	\$ -328,80	\$ -328,80
2	\$ 11.528,64	\$ 10.929,60	\$ 599,04	\$ 270,24
3	\$ 13.834,37	\$ 12.022,56	\$ 1.811,81	\$ 2.082,05
4	\$ 16.601,24	\$ 13.224,82	\$ 3.376,43	\$ 5.458,47
5	\$ 19.921,49	\$ 14.547,30	\$ 5.374,19	\$ 10.832,67
<b>TOTAL</b>	\$ 71.492,94	\$ 60.660,27	<b>Utilidad proyectada</b>	\$ 18.314,63

En la tabla 3.5 se puede observar el flujo de ingreso y egreso para los 5 años a futuro se describe, donde se puede visualizar que en el quinto año se puede recuperar la inversión con el 20% de intereses.

**Tabla 3.6**

*Valores de la inversión inicial con tasa de interés*

<b>Años</b>	<b>5</b>
<b>Inversión inicial</b>	\$ 3.655,00
<b>Tasa de interés</b>	20%

**Tabla 3.7**

*Resultados de VAN y TIR*

<b>VAN</b>	<b>\$8.633,56</b>
<b>TIR</b>	<b>29%</b>

Para realizar el siguiente análisis de costos y comprobar si el proyecto es rentable o no, se optó por trabajar con 500 kg de pedúnculo y 300 kg de inóculo, considerando la capacidad total del tanque digestor, que es de 600 kg. Es crucial tener en cuenta que el digestor requiere espacio para la generación de metano. Además, al procesar los 600 kg de pedúnculo de banano con la máquina de molinos, se obtiene al menos un 45 % de materia prima, es decir, 225 kg de fibra,

llenando así el digestor con 525 kg. De esta manera, se generarían 10.500 ICH<sub>4</sub> al año, suficiente para abastecer hasta 24 horas diarias de cocina. Esto resultaría en un ahorro aproximado de \$ 4.000 dólares anuales, y se evitaría la contaminación de aproximadamente 30 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, aumentando la economía circular del sector bananero y disminuyendo la contaminación por causas del efecto invernadero.

En cuanto a la inversión inicial, como se observa en la tabla 3.6 se consideró el costo de todos los equipos del diagrama de proceso, sumando un total de \$ 3,655.00. Así mismo, se aplicó una tasa de interés del 20%.

Finalmente, al calcular el Valor Actual Neto (VAN), se obtuvo un valor de la Tasa Interna de Retorno (TIR) del 29% mostrados en la tabla 3.7. Asumiendo un negocio rentable que logra crear una economía circular sostenible en el tiempo.

## Capítulo 4

## 4

### 4.1 Conclusiones y recomendaciones

#### 4.1.1 Conclusiones

- El diseño del proceso de digestión anaerobia del pedúnculo de banano propuesto es una estrategia factible para la utilización y reducción de desechos de las casas empacadoras de banano.
- El potencial bioquímico de metano determinado a partir de la digestión anaerobia utilizando como sustrato el pedúnculo de banano en forma de trozos, jugo y fibra tuvo una alta variabilidad según el entorno en el que fue desarrollado. La fibra y los trozos de pedúnculo tuvieron una alta capacidad de producción de metano, lo que en términos de generación de energía es beneficioso.
- Las condiciones en donde se obtuvieron los valores más altos de metano fueron con el 30% de sólidos totales y a una temperatura de 30°C, tanto para el jugo, los trozos de pedúnculo y la fibra se calcularon altas cantidades de BMP durante los 34 días en comparación con los biorreactores en las otras condiciones estudiadas.
- Al analizar el proceso de generación de metano a partir de pedúnculos de banano, se determinó que el proyecto es rentable. Considerando la capacidad del tanque digestor, el rendimiento del proceso y el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) con una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 29%, se evidencia la viabilidad económica de la iniciativa, respaldada por un ahorro anual estimado de \$4,000 dólares, incrementando la economía circular para casas empacadoras y disminuyendo al menos 30 toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

#### 4.1.2 Recomendaciones

Mediante los resultados obtenidos se recomienda tener precaución al momento de hacer un cambio en la temperatura debido a que la digestión anaerobia es sensible a cambios bruscos.

Es recomendable extender el tiempo de obtención de metano ya que fuentes bibliográficas lo han realizado en un tiempo de 60 días obteniendo favorables resultados.

Realizar un estudio dedicado en los microorganismos presentes de la digestión anaerobia para determinar otras causas de inhibición.

Una vez obtenido el metano analizar la composición del compuesto restante (digestato) para conocer su capacidad como fertilizante para los bananos.

## Referencias

- Akinbomi J., Patinvoh R. and Taherzadeh M. (2022). Current challenges of high-solid anaerobic digestion and possible measures for its effective applications: a review. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 15, 2731-2744.  
<https://doi.org/10.1186/s13068-022-02151-9>
- Alzate, S., Díaz, A., Flores, E. and Grande, C. (2021). Recovery of Banana Waste-Loss from Production and Processing: A Contribution to a Circular Economy. *Molecules*, 26, 1-30. <https://doi.org/10.3390/molecules26175282>
- Averos, G. (2022). *Influencia de microorganismos eficientes en la producción del cultivo de banano (Musa AAA) en el Ecuador*. [Tesis de grado Universidad Técnica de Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/11345>
- Awedem, F., Alleluya, V. K., Emaga, T. H., Boda, M., Fokou, E., Gillet, S., Deleu, M., & Gerin, P. A. (2017). Recovery of fibers and biomethane from banana peduncles biomass through anaerobic digestion. *Energy for Sustainable Development*, 37, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.01.005>
- Baruah, J., Bardhan, P., Mukherjee, A. K., Deka, R. C., Mandal, M., & Kalita, E. (2022). Integrated pretreatment of banana agrowastes: Structural characterization and enhancement of enzymatic hydrolysis of cellulose obtained from banana peduncle. *International Journal of Biological Macromolecules*, 201, 298–307.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.179>
- Benish, P., Mozhiarasi, V., Nagabalaji V., Weichgrebe D. and Srinivasan S. (2022). Optimization of process parameters for enhanced methane production from banana peduncle by thermal pretreatment. *Conv. de biomasa Biorref*, 13, 15251-15265.  
<https://doi.org/10.1007/s13399-022-02917-z>

- Castro, R., Solís, M. M., Chicatto, V., & Solís, A. (2020). Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36, 529–539. <https://doi.org/10.20937/RICA.53545>
- Cárdenas, L. M., Parra, B. A., Torres, P., & Vásquez, C. H. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Revista ION*, 29(1), 95–108. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>
- FAO. (2011). *Manual de BIOGAS*. Recuperado de <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Fagbohung, M., Dodd, I., Herbert, B., Li, H., Ricketts, L. and Semple, K. (2015). High solid anaerobic digestion: Operational challenges and possibilities. *Environmental Technology & Innovation*, 4, 268-284. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2015.09.003>
- García, R, Quevedo, J. and Socorro, A. (2020). Prácticas para el aprovechamiento de residuos sólidos en plantaciones bananeras y resultados de su implementación. *Universidad y Sociedad*, 12, 280-291
- Gómez J., Sánchez O., and Matallana L. (2021). Procesos de Transformación: Perspectiva de Aprovechamiento para los Residuos de la Agroindustria del Plátano. *Producción Limpia*, 16(1), 1-25. <https://doi.org/10.22507/pml.v16n1a1>
- Guerreo A., Ballesteros I. and Ballesteros M. (2018). The potential of agricultural banana waste for bioethanol production. *FUEL*, 213, 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.105>
- Haro, A., Borja, A., & Triviño, S. (2017). Análisis sobre el aprovechamiento de los residuos del plátano, como materia prima para la producción de materiales plásticos

biodegradables. *Revista Científica Dominio de Las Ciencias*, 3(2), 506–525.

<https://doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.2.esp.506-525>

Holden, N., Leigh, M., Arogo, J., & Cummis, E. (2021). *Digestión anaerobia de subproductos alimentarios*. LibreTexts.

[https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa\\_Biol%C3%B3gica/Introducci%C3%B3n\\_a\\_la\\_Ingenier%C3%ADa\\_de\\_Biosystems\\_\(Holden\\_et\\_al.\)/04%3A\\_Recursos\\_Naturales\\_y\\_Sistemas\\_Ambientales/4.04%3A\\_Digesti%C3%B3n\\_anaerobia\\_de\\_subproductos\\_agroalimentarios](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Biol%C3%B3gica/Introducci%C3%B3n_a_la_Ingenier%C3%ADa_de_Biosystems_(Holden_et_al.)/04%3A_Recursos_Naturales_y_Sistemas_Ambientales/4.04%3A_Digesti%C3%B3n_anaerobia_de_subproductos_agroalimentarios)

Khatua Ch., Sengupta S., Balla V., Kundu B., Chakraborti A., and Tripathi S. (2018).

Dynamics of organic matter decomposition during vermicomposting of banana stem waste using *Eisenia fetida*. *Waste Management*, 79, 287-295.

Kerubo, D., Isaboke, Z., and Meshack, P. (2021). Kinetic Modelling of Methane Production from Anaerobic Digestion of Banana Wastes. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 10, 2278, 0181.

León F., Espinoza M., Carvajal H., and Quezada J. (2022). Análisis económico de la producción bananera orgánica y convencional de la Parroquia la Iberia. *Waste Management*, 7, 1404-1420

León, J. P., Espinosa, M. A., Carvajal, H. R., & Quezada, J. (2023). Análisis de la producción y comercialización de banano en la provincia de El Oro en el periodo 2018-2022. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 7494–7507.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i1.4981](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4981)

Lobo M. & Montero M. (2020). Harvesting and Postharvest Technology of Banana. En *Handbook of Banana Production, Postharvest Science, Processing Technology, and Nutrition* (Ed.), 61-80 (pp. Costa Rica). John Wiley & Sons, Ltd

- Lorenzo, Y., & Obaya, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, XXXIX(1), 35–48.
- Milledge, J., Nielsen, B. & Harvey P. (2019). The inhibition of anaerobic digestion by model phenolic compounds representative of those from *Sargassum muticum*, *Journal of Applied Phycology*, 31, 77-786 <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1512-4>
- Miogas, (2024). Biodigestor 7. *Biodigestores para pequeños negocios*.  
<https://miogas.com/biodigestores/biodigestor-7/>
- OECD. (2010). *Bioheat, Biopower and Biogas*. OECD.  
<https://doi.org/10.1787/9789264085862-en>
- Parra, D. L., Botero, M. A., & Botero, J. M. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 149–160.  
<https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019013>
- Pazmiño, M., Moreira, M., & Pullammanappallil, P. (2017). Feasibility assessment of waste banana peduncle as feedstock for biofuel production. *Biofuels*, 10, 473-484.
- Quiroz, A. (2022). *Inhibición del crecimiento de hongos que causan necrosis en el follaje del plátano (Musa spp. Simmonds) usando aceite y lixiviado de raquis en condiciones in vitro* [Tesis de grado Universidad Veracruzana].
- Rosales, M. and Villón, J. (2020). *Desarrollo de una metodología para determinar la biodegradabilidad de películas de origen biológico y fósil, utilizando digestión anaerobia con alto contenido de sólidos aplicando la norma ASTM D5511-02*. [Tesis de grado Escuela Superior Politécnica Del Litoral].

Sánchez, C., Patiño, M., Alcántara, J., Reyes, Y., Pérez, M., & Ortiz, E. (2016).

Determinación del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(2), 191-198. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.05>

Vanaclocha, A. (2005). *Diseño de Industrias Agroalimentarias*. Editorial Mundi-Prensa.

Yi, J., Dong, B., Jin, J. and Dai, X. (2014). Effect of Increasing Total Solids Contents on Anaerobic Digestion of Food Waste under Mesophilic Conditions: Performance and Microbial Characteristics Analysis. *Plos one*. 9(7).  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102548>

## **Apéndices**

## Apéndice A

### Apéndice A1. Pesado de la muestra seca de estiércol vacuno en balanza analítica



### Apéndice A2. Muestras de pedúnculo en trozos y fibra colocadas en una mufla para la determinación de sólidos volátiles



## Apéndice B

### Apéndice B1. Fórmula de determinación de sólidos totales

$$\% \text{ Sólidos Totales} = \frac{\text{Peso MSR} - \text{Peso R}}{\text{Peso MI}} \times 100$$

$$\% \text{ Sólidos Totales} = \frac{(24.349 - 5.952) \text{ g}}{100.171 \text{ g}} \times 100$$

$$\% \text{ Sólidos Totales} = 18.366 \%$$

### Apéndice B2. Fórmula de determinación de sólidos volátiles para el sustrato

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = \frac{m_3 - m_{nv}}{m_3} \times 100$$

#### Fibra

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = \frac{m_3 - m_{nv}}{m_3} \times 100$$

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = \frac{(3.50 - 0.47) \text{ g}}{3.50 \text{ g}} \times 100$$

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = 86.5\%$$

Sólidos Volátiles: 0.003 kg de SV

#### Pedúnculo

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = \frac{m_3 - m_{nv}}{m_3} \times 100$$

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = \frac{(3.04 - 0.52) \text{ g}}{3.04 \text{ g}} \times 100$$

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = \frac{(2.52) \text{ g}}{3.04 \text{ g}} \times 100$$

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = 83\%$$

Sólidos Volátiles: 0.002kg de SV

#### Jugo de pedúnculo de banano

$$\%Sólidos Volátiles = \frac{m_3 - m_{nv}}{m_3} \times 100$$

$$\%Sólidos Volátiles = \frac{(3.00 - 1.45) g}{3.00g} \times 100$$

$$\%Sólidos Volátiles = \frac{1.55g}{3.00g} \times 100$$

$$\%Sólidos Volátiles = 51\%$$

*Sólidos Volátiles: 0.001 kg de SV*

**Apéndice B3. Ecuación para determinar la cantidad de sustrato para distribuir en cada reactor.**

$$\%SV = \frac{SV}{ST} \times 100$$

$$\%SV = \frac{0.5}{3.5} \times 100$$

$$\%SV = 0.14 \times 100$$

$$SV = 14gSV$$

$$\frac{100 g de M}{14gSV} \times 7gSV = 50g de pedúnculo$$

*añadir 50g en cada reactor inicial*