



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Producción de biogas mediante la codigestión anaerobia de lodos residuales  
y desecho de cáscara de banano maduro.**

**MENDEZ CEVALLOS LIDIA BELEN  
INGENIERA AMBIENTAL**

**CHIMBAY SALDAÑA GENESIS ABIGAIL  
INGENIERA AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Producción de biogas mediante la codigestión anaerobia de lodos  
residuales y desecho de cáscara de banano maduro.**

**MENDEZ CEVALLOS LIDIA BELEN  
INGENIERA AMBIENTAL**

**CHIMBAY SALDAÑA GENESIS ABIGAIL  
INGENIERA AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**

**Producción de biogas mediante la codigestión anaerobia de lodos  
residuales y desecho de cáscara de banano maduro.**

**MENDEZ CEVALLOS LIDIA BELEN  
INGENIERA AMBIENTAL**

**CHIMBAY SALDAÑA GENESIS ABIGAIL  
INGENIERA AMBIENTAL**

**GARCIA OCHOA JAIME ARTURO**

**MACHALA  
2024**

# PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS RESIDUALES Y DESECHO DE CÁSCARA DE BANANO MADURO

*por* Genesis Abigail Chimbay Saldaña

---

**Fecha de entrega:** 05-ago-2024 06:42p.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2427884476

**Nombre del archivo:** OG\_5\_MEDIANTE\_LA\_CODIGESTI\_N\_ANAEROBIA\_DE\_C\_SCARAS\_DE\_BAN\_1.pdf  
(1.05M)

**Total de palabras:** 13365

**Total de caracteres:** 78324

# PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS RESIDUALES Y DESECHO DE CÁSCARA DE BANANO MADURO

## INFORME DE ORIGINALIDAD

1%	1%	0%	0%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://dspace.uniss.edu.cu">dspace.uniss.edu.cu</a> Fuente de Internet	<1%
2	<a href="http://biocombustibleskiko.blogspot.com">biocombustibleskiko.blogspot.com</a> Fuente de Internet	<1%
3	<a href="http://polodelconocimiento.com">polodelconocimiento.com</a> Fuente de Internet	<1%
4	<a href="http://lookformedical.com">lookformedical.com</a> Fuente de Internet	<1%
5	Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD, UNAD Trabajo del estudiante	<1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Las que suscriben, MENDEZ CEVALLOS LIDIA BELEN y CHIMBAY SALDAÑA GENESIS ABIGAIL, en calidad de autoras del siguiente trabajo escrito titulado Producción de biogas mediante la codigestión anaerobia de lodos residuales y desecho de cáscara de banano maduro., otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Las autoras declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Las autoras como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



---

MENDEZ CEVALLOS LIDIA BELEN

0704606557



---

CHIMBAY SALDAÑA GENESIS ABIGAIL

0705495372

## DEDICATORIA

Primeramente, quiero dedicar a Dios, me ha guiado a lo largo de mi trayecto académico, permitiéndome alcanzar esta meta y orientándome hacia nuevos logros en mi vida.

De manera especial este trabajo de titulación va dedicado para Brumel Méndez y Paola Cevallos, por desempeñar el rol de padres me llenaron de amor, su apoyo incondicional y me guiaron a lo largo de mi vida. Sus constantes alientos y sabios consejos han sido fundamentales para no caer en la mediocridad, este logro también es suyo.

De igual forma para José Chimbay y Olga Saldaña quienes no están en esta vida terrenal, pero sé que estarían orgullosos de saber que su hija si lo logró.

A mis gemelos Ethan y Ezequiel, quienes han sido mi mayor motivación y fuente de inspiración por seguir adelante. Este logro no habría sido posible sin su amor, cada esfuerzo realizado ha sido pensado en su futuro y un ejemplo de perseverancia, gracias por ser mi mayor orgullo y llenar mi vida de alegría.

A mi hermana Diana Chimbay por su constante apoyo, ánimo y comprensión soy muy bendecida de tenerte a mi lado.

Por otra parte, para Eunice, Lidia, Josías este es el resultado de un viaje que hemos recorridos juntos como familia, lleno de experiencias, lagrimas, alegrías y momentos inolvidables. Gracias a cada uno de ustedes por ser mi apoyo, por ser mis cómplices, confidentes y por llenarme de amor.

También para aquellos amigos que han estado en las buenas y malas gracias por ratos recuerdos.

A mi estimado tutor, Jaime García Ochoa y estimado cotutor, Hugo Romero Bonilla, por su invaluable guía, paciencia y dedicación. Gracias por compartirme sus conocimientos y por ayudarme a convertir mis ideas en realidad.

Génesis Abigail Chimbay Saldaña.

## DEDICATORIA

Primeramente, quiero dedicar a Dios por su amor y sabiduría en este recorrido que ha sido largo pero satisfactorio.

A mis amados padres, Brumel Méndez, Paola Cevallos cuyo ejemplo de perseverancia y sacrificio ha sido mi guía inquebrantable en este camino académico, por su amor incondicional, sacrificios innumerables y constante apoyo han sido la luz que ha guiado cada paso de este mi trayecto. Gracias por creer en mí, por alentarme a perseguir mis sueños y por ser mi ejemplo de tenacidad y dedicación.

A mi hermosa y amada abuela, Lidia Ramón, quien, a pesar de la distancia, siempre está presente conmigo con sus palabras alentadoras y su amor incondicional. Gracias por ser una fuente constante de inspiración y por demostrarme que con dedicación y esfuerzo, nada es imposible. Su energía y su ejemplo de superación son un faro que guía mi camino.

Para mi abuela, Casimira Correa, cuyo apoyo constante ha sido un faro de inspiración, agradezco infinitamente sus palabras de aliento, sus sabios consejos y su presencia constante en cada etapa de esta travesía. Sus vivencias compartidas han enriquecido mi perspectiva y me han motivado a perseverar en la consecución de mis metas.

A mi estimado tutor, Jaime García Ochoa y estimado cotutor, Hugo Romero Bonilla, por su invaluable guía, paciencia y dedicación. Gracias por compartirme sus conocimientos y por ayudarme a convertir mis ideas en realidad.

Lidia Belén Méndez Cevallos.



### AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios, porque me ha guiado a lo largo de mi trayecto académico, permitiéndome alcanzar esta meta y orientándome hacia nuevos logros en mi vida.

Agradezco a cada ser que forma parte de mi familia, han sido un factor primordial para mi crecimiento profesional y personal, con su apoyo he podido continuar a pesar de todo momento difícil que se han presentado en esta vida.

A mi estimado tutor, Jaime García Ochoa y estimado cotutor, Hugo Romero Bonilla, por su invaluable guía, paciencia y dedicación. Gracias por compartirme sus conocimientos y por ayudarme a convertir mis ideas en realidad.

Génesis Abigail Chimbay Saldaña.

### AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios, por llenarme de sabiduría y por guiarme a lo largo de este camino. A mi familia, les agradezco por su comprensión, apoyo incondicional y motivación constante. Sus palabras de aliento fueron un motor fundamental en los momentos difíciles y un motivo de celebración en los logros alcanzados.

Este trabajo no solo representa mi esfuerzo, sino también el resultado del amor y apoyo constante de mi familia. Espero que este logro sea un testimonio de mi profundo agradecimiento y amor por ustedes.

A mi estimado tutor, Jaime García Ochoa y estimado cotutor, Hugo Romero Bonilla, por su invaluable guía, paciencia y dedicación. Gracias por compartirme sus conocimientos y por ayudarme a convertir mis ideas en realidad.

Lidia Belén Méndez Cevallos.

---

## RESUMEN

La presente investigación aborda la producción de biogás mediante la codigestión anaerobia de lodos residuales y desechos de cáscara de banano maduro, como una solución sostenible para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y aprovechar los residuos agroindustriales en Ecuador, especialmente en la provincia de El Oro. Este estudio destaca la importancia del biogás como una fuente de energía renovable con aplicaciones en calefacción, generación de electricidad y producción de combustibles. La codigestión anaerobia se presenta como una tecnología eficiente que permite la recuperación de energía a partir de diversos desechos, promoviendo una gestión más sostenible de los residuos y contribuyendo a la reducción de impactos ambientales asociados a la actividad bananera. Los resultados de la investigación muestran el potencial de esta tecnología para disminuir las emisiones de metano y dióxido de carbono, ofreciendo una alternativa viable frente a los desafíos energéticos y ambientales actuales.

***Palabras clave* - Codigestión anaerobia, biogás, lodos residuales, cáscara de banano, energías renovables, gases de efecto invernadero, sostenibilidad ambiental.**

## ABSTRACT

This research focuses on the production of biogas through the anaerobic co-digestion of residual sludge and ripe banana peel waste as a sustainable solution to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and utilize agro-industrial waste in Ecuador, particularly in the province of El Oro. The study highlights the importance of biogas as a renewable energy source with applications in heating, electricity generation, and fuel production. Anaerobic co-digestion is presented as an efficient technology that enables energy recovery from various wastes, promoting more sustainable waste management and contributing to the reduction of environmental impacts associated with banana farming. The research results demonstrate the potential of this technology to decrease methane and carbon dioxide emissions, offering a viable alternative to current energy and environmental challenges.

**Keywords** - Anaerobic co-digestion, biogas, residual sludge, banana peel, renewable energy, greenhouse gases, environmental sustainability.

---

 TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	4
ABSTRACT .....	5
I. INTRODUCCIÓN .....	12
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	13
A. <i>Antecedentes</i> .....	13
III. JUSTIFICACIÓN.....	14
IV. OBJETIVOS .....	15
A. <i>Objetivo general</i> .....	15
V. HIPÓTESIS .....	16
VI. MARCO TEÓRICO.....	17
A. <i>Cultivo de banano en el Ecuador</i> .....	17
1) <i>Desechos sólidos generados por el cultivo de banano</i> .....	17
B. <i>Lodos Residuales</i> .....	18
1) <i>Tipos de lodos residuales</i> .....	18
C. <i>Codigestión anaerobia</i> .....	19
1) <i>Etapas de la codigestión anaerobia</i> .....	20
a) <i>Hidrólisis</i> .....	21
b) <i>Etapa fermentativa o acidogénica</i> .....	21
c) <i>Etapa acetogénica</i> .....	21
d) <i>Etapa metanogénica</i> .....	22
1) <i>Aspectos técnicos de la codigestión anaerobia</i> .....	23
D. <i>Parámetros físicos-químicos</i> .....	23
1) <i>Humedad</i> .....	23
2) <i>Potencial hidrógeno (pH)</i> .....	24
3) <i>Sólidos volátiles (SV)</i> .....	24
4) <i>Materia orgánica (MO)</i> .....	24

---

5) <i>Carbono orgánico total (COT)</i> .....	24
6) <i>Nitrógeno total (NT)</i> .....	25
7) <i>Relación carbono nitrógeno (C/N)</i> .....	25
E. <i>Biogás</i> .....	25
F. <i>Potencial de la agroindustria como actor en la producción de biogás</i> .....	25
G. <i>Impacto ambiental de la producción de biogás</i> .....	26
H. <i>Políticas y regulaciones relacionadas con la producción de biogás</i> .....	26
I. <i>Experiencias y casos de éxito en la producción de biogás a partir de la codigestión anaerobia</i> .....	26
J. <i>Diferentes concentraciones de cáscara de banano y lodo residual para la generación de biogás</i> .....	27
VII. METODOLOGÍA.....	28
A. <i>Enfoque de la investigación</i> .....	28
B. <i>Recolección de la muestra</i> .....	28
C. <i>Proceso metodológico para la obtención del Biogás</i> .....	29
D. <i>Determinación fisicoquímica de los sustratos</i> .....	30
1) <i>Caracterización fisicoquímica (Banano)</i> .....	30
a) <i>Humedad</i> .....	30
a) <i>pH</i> .....	30
b) <i>Sólidos Volátiles</i> .....	31
c) <i>Carbono Orgánico</i> .....	31
d) <i>Nitrógeno total</i> .....	32
e) <i>Relación C/N</i> .....	32
2) <i>Caracterización fisicoquímica (Lodo primario)</i> .....	32
a) <i>Humedad</i> .....	32
b) <i>pH</i> .....	33
c) <i>Materia Orgánica y Carbono Orgánico</i> .....	33
d) <i>Nitrógeno Total</i> .....	33

---

e) Relación C/N .....	34
E. Preparación de biodigestores .....	34
F. Constitución de los biodigestores .....	34
G. Monitoreo del Biogás .....	35
H. Determinación del Biogás .....	36
I. Análisis estadístico .....	36
VIII. RESULTADOS .....	37
A. Caracterización de las propiedades fisicoquímico del lodo del estero Huayla y cáscara de banano. ....	37
B. Rendimiento de la producción de biogás .....	37
1) Análisis estadístico (ANOVA) en las experimentaciones de biogás.....	38
C. Porcentaje de CH <sub>4</sub> en los Biodigestores.....	38
1) Análisis estadístico (ANOVA) en los biodigestores de CH <sub>4</sub> .....	40
IX. DISCUSIÓN .....	41
X. CONCLUSIONES.....	43
XI. RECOMENDACIONES .....	44
REFERENCIAS .....	45

---

### LISTA DE TABLAS

TABLA I. POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESIDUOS EN LA PRODUCCIÓN DE BANANO.....	18
TABLA II. FASES DEL PROCESO DE CO-DIGESTIÓN.....	20
TABLA III. TIPOS DE FERMENTACIÓN REALIZADAS EN LA ETAPA FERMENTATIVA.....	21
TABLA IV. ETAPA ACETOGÉNICA.....	22
TABLA V. ETAPA METANOGENICA.....	23
TABLA VI. RELACIÓN SUSTRATO/CÁSCARA DE BANANO MADURO.....	27
TABLA VII DETERMINACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS SUSTRATOS .....	30
TABLA VIII. PROPORCIONALIDAD DE LOS BIODIGESTORES .....	35
TABLA IX. CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES FISICO-QUIMICO DEL LODO DEL ESTERO HUAYLA Y LA CÁSCARA DE BANANO.....	37
TABLA X. ANOVA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	38
TABLA XI. ANOVA CONCENTRACIÓN DE CH <sub>4</sub> .....	40

---

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ETAPAS DE LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA.....	20
FIGURA 2. MAPA DE UBICACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO.....	28
FIGURA 3. MAPA DE UBICACIÓN DE DONDE SE OBTUVIERON LAS MUESTRAS DE CÁSCARA DE BANANO MADURO .....	29
FIGURA 4. DIAGRAMA METODOLÓGICO PARA OBTENER BIOGÁS (CH <sub>4</sub> ) .....	29
FIGURA 5. BIODIGESTOR PARA EL MONITOREO DE BIOGÁS.....	35
FIGURA 6. SENSOR DE GAS MQ-2 .....	36
FIGURA 7. PRODUCCIÓN TOTAL DE BIOGÁS.....	37
FIGURA 8. PORCENTAJE DE CH <sub>4</sub> .....	39

## LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1 .....	30
ECUACIÓN 2.....	31
ECUACIÓN 3.....	31
ECUACIÓN 4.....	32
ECUACIÓN 5.....	32
ECUACIÓN 1 .....	32
ECUACIÓN 4.....	34
ECUACIÓN 5.....	34



---

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

**UTMACH:** Universidad Técnica De Machala

**ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible

**ONU:** Organización de las Naciones Unidas

**GEI:** Gases de Efecto Invernadero

**DA:** Digestión Anaeróbica

**COP28:** Conferencia de las Naciones Unidas del Cambio Climático

**PIB:** Producto Interno Bruto

**EPS:** Economía Popular Solidaria

**MO:** Materia Orgánica

**pH:** Potencial Hidrógeno

**AGV:** Ácidos Grasos volátiles

**ATP:** Adenosín Trifosfato

**SV:** Sólidos Volátiles

**ST:** Sólidos Totales

**COT:** Carbono Orgánico Total

**NT:** Nitrógeno Total

**UE:** Unión Europea

**K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>:** Dicromato de potasio

**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:** Ácido sulfúrico

**FeSO<sub>4</sub>:** Sulfato de hierro

**H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>:** Ácido bórico

**NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>:** Ácido hiponitroso

**(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:** Sulfato de amonio

**NH<sub>3</sub>:** Amoníaco

**CH<sub>4</sub>:** Metano

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de Carbono

**H<sub>2</sub>:** Hidrógeno molecular

## I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la agenda 2030, establecen en su séptimo objetivo "Asegurar que todas las personas tengan acceso a una energía que sea asequible, segura, sostenible y moderna" esto nos recalca el compromiso global para abordar las necesidades energéticas de la población de manera inclusiva, equitativa y respetuosa con el medio ambiente [1]. Tratados internacionales como la Agenda 21 aboga por una transición de energías renovables y la disminución de carbono provocado por el incremento de emisiones de "GEI" asociadas con los combustibles fósiles y el cambio climático relacionado [2].

La transmisión de gases "GEI" asociadas como el "CH<sub>4</sub>" y "CO<sub>2</sub>" derivados de actividades antropogénicas, han provocado el incremento de temperatura a nivel global, dando como consecuencia el deshielo de los polos, extinción de especies, entre otros. Entre las principales fuentes de transmisión de estos gases se incluyen la agricultura y la ganadería [3].

En Ecuador, la producción y exportación de banano representan una de las actividades fundamentales que han contribuido al crecimiento económico. El Oro es el principal productor de banano con más del 42% de las fincas dedicadas a este cultivo en nuestro país [4] [5]. La agricultura genera emisiones de CH<sub>4</sub> mediante actividades como la quema de residuos, obstrucción del suelo y falta de gestión de residuos. La exploración del potencial para producir energía a partir de biomasa es un aspecto actualmente analizado [3].

El "biogás" se representa como un transmisor renovable de energía que puede producirse mediante la codigestión anaeróbica de diversos desechos [6]. El biogás ha demostrado tener un potencial significativo como fuente de energía renovable para aplicaciones industriales y domésticas, considerándose una solución eficiente a la crisis energética global. Se considera (aproximadamente 60 % CH<sub>4</sub> y 40 % CO<sub>2</sub>) un biocombustible gaseoso ecológico y puede utilizarse para calefacción, electricidad y producción de combustible [7]. Siendo, la digestión anaeróbica (DA) un enfoque de tratamiento e ingeniería ampliamente reconocido que tiene la capacidad potencial de gestionar residuos sólidos. Además, puede disminuir las emisiones de GEI que representa reducir costos para producir energía sostenible.

Los beneficios de estos procesos incluyen la recuperación eficiente de energía de diversas biomásas, generando mayores cantidades de metano y permitiendo la reducción de costos al procesar distintas materias primas en un mismo procedimiento [8].

---

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### A. Antecedentes

En las últimas cinco décadas, las transmisiones de (GEI) aumentan la temperatura global, generadas por actividades antropogénicas [6]. Entre los GEI más relevantes se encuentran el  $N_2O$ ,  $CH_4$  y el  $CO_2$  [7]. Específicamente, el  $CH_4$  destaca por su impacto significativo, con una permanencia atmosférica de 9 a 15 años y un potencial de calentamiento 28,5 veces mayor que el  $CO_2$ , generando una emisión anual de 570 millones de toneladas métricas (Mt) [3].

La agricultura, como una actividad que genera grandes cantidades de residuos anualmente, se rige como una contribuyente significativa a las emisiones de  $CH_4$ . Sin embargo, la falta de planificación en la gestión de estos residuos agrícolas agrava la liberación de este gas a la atmósfera [8]. En el contexto específico de Ecuador, la descomposición de los desechos provenientes de la industria bananera emerge como una fuente constante de emisiones de GEI, generando olores desagradables propagando mosquitos y patógenos. Además, los lixiviados filtrados a través de los vertederos de desechos de banano producen la contaminación de fuentes de agua, al contener niveles elevados de materia orgánica (MO) y nutrientes [4].

La provincia de El Oro, reconocida como una de las principales productoras de banano en Ecuador, contribuye de manera significativa a esta problemática. La actividad bananera genera anualmente alrededor de 198,602 toneladas de residuos, compuestos principalmente por fibras lignocelulósicas no aprovechables como pseudotallo, hojas, raquis y cáscaras, convirtiéndose en un foco de contaminación ambiental [9]. La utilización mínima de estos residuos orgánicos ha provocado problemas ambientales, centrados en la contaminación de recursos agua, suelo y aire así como la proliferación de vectores [10].

En este contexto, la implementación de la codigestión anaerobia de lodos residuales y cáscaras de banano se presenta como una alternativa prometedora. Esta iniciativa tiene como objetivo producir biogás, reducir los desechos emitidos por las agroindustrias bananeras en la región contribuyendo en la disminución de impactos ambientales para la producción de banano ofreciendo una solución innovadora y sostenible para abordar la problemática de las emisiones de GEI en la provincia. [11].

---

### III. JUSTIFICACIÓN

Acorde, la COP28 (Conferencia de la ONU) centrada en el cambio climático presentada en Dubái en diciembre del 2023, 198 países establecieron la reducción sustancial de emisiones GEI con un enfoque especial en la emisión de metano para el año 2030 [12].

La energía se posiciona como un recurso crucial en el diseño de estrategias socioeconómicas a escala global. El incremento de la población y la consiguiente necesidad de recursos, especialmente la electricidad, ha creado una urgencia imperante en la búsqueda de fuentes de energía alternativas y sistemas de generación eléctrica innovadores, centrados en el aprovechamiento de recursos energéticos renovables [13].

La matriz energética del Ecuador se centra en el uso de fuentes no renovables representando el 91,36% del total energético fundamentalmente de recursos hídricos, en cambio, el 8,64% restante es proveniente de fuentes renovables como fotovoltaica [14].

Para Ecuador y países de la región, los mayores desafíos energéticos pasan por avanzar hacia un sistema energético más eficiente, asequible y sostenible que nos permita responder de manera inmediata a las necesidades actuales [15]. Por ello, en Ecuador se debe desarrollar una gestión energética integral en los procesos industriales para gestionar y optimizar la energía, con la finalidad de acelerar la competitividad de las empresas y reducir el nivel de contaminación mediante el uso de energías renovables [13].

El uso de biodigestores en la generación de biogás como energía, ha ganado popularidad en la comunidad científica actualmente, considerándolo una tecnología con grandes beneficios socioeconómicos y ambientales, debido a los resultados emitidos en la reducción de residuos y su viabilidad en la producción de energía [16].

En Ecuador, la especie Musáceas, que incluye el banano, genera una cantidad significativa de residuos debido al elevado consumo de esta fruta en el país. La alta demanda se centra en el fruto, mientras que los residuos, como las cáscaras, suelen ser desaprovechados. Resulta beneficioso aprovechar adecuadamente estos materiales, especialmente las cáscaras para la obtención en la producción de biogás [11]. La opción de generar gas metano mediante de la codigestión anaeróbica de residuos orgánicos bananeros se presenta como una alternativa viable. Su eficiente manejo de residuos no solo constituye una solución práctica, sino que también aborda los problemas ambientales en la ciudad de Machala [17].

## IV. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Evaluar la producción de biogás CH<sub>4</sub>, mediante la codigestión anaerobia de los lodos residuales del estero Huayla y desecho de cáscara de banano agroindustrial, como una alternativa de remediación y mitigación de las emisiones de GEI.

### *B. Objetivos específicos*

- Caracterizar las propiedades fisicoquímico de los lodos del estero Huayla y cáscara de banano.
- Determinar la producción de biogás considerando las diferentes concentraciones de cáscara de banano y lodo residual en biodigestor de 1000 mL de capacidad.
- Cuantificar la concentración del metano obtenido a partir de cada una de las muestras propuestas.

## V. HIPÓTESIS

La codigestión anaerobia de lodos residuales y cáscara de banano en la Provincia de El Oro tiene el potencial de ser una tecnología eficiente y sostenible para la producción de biogás. Se espera que la combinación de estos residuos orgánicos genere mayores volúmenes de biogás, especialmente metano, en comparación con procesos de digestión anaerobia individual. Además, se postula que esta práctica contribuirá a la gestión sostenible de residuos.

---

## VI. MARCO TEÓRICO

### A. *Cultivo de banano en el Ecuador*

El cultivo de banano es importante en exportaciones en regiones tropicales, beneficiando el desarrollo socioeconómico del territorio [18]. En Ecuador, la exportación de banano representa el 2% del producto interno bruto nacional y 35% de aportaciones del sector agrícola. Su producción en el territorio se desarrolla principalmente por medianos y pequeños productores, representando el 78% de la productividad nacional, se establece como un sector de significativa fuente de empleo para áreas rurales [19]. En este sentido, se observan tres provincias de mayor producción: Los Ríos (34%), Guayas (16%) y El Oro (41%), reconociendo a esta última como territorio de dominancia en cultivo de banano con principal presencia de pequeños productores [20].

Acorde a información de la “Sociedad Ecuatoriana de Vendedores de Banano de Ecuador”, se exportó 234.42 millones de cajas de banano en el período 2022 principalmente a la Unión Europea [21].

#### *1) Desechos sólidos generados por el cultivo de banano*

La producción de cultivos musáceos (banano y plátano) son generadores de grandes cantidades de desechos orgánicos, considerando la gestación de hasta doscientas T/ha anualmente [22]. En este sentido, se emplea un porcentaje de estos residuos con fines de aprovechamiento: alimento, fertilizantes y energéticos. Se estima que alrededor del 50% de desechos podrían ser aprovechados con el propósito de generar energía al considerar su producción calorífica [23].

Debido a los problemas ambientales ocasionados de la generación de residuos bananeros surge el interés para obtención de derivados, enfocados en reducir la cantidad de desechos y producción de productos/servicios brindando un valor añadido [24]. Esta revisión muestra la importancia implementar la biomasa residual de los cultivos musáceos en Ecuador como potencial energético para la gestación de fuentes alternativas

De acuerdo con Solano et al. [25], en el Ecuador la producción de banano es de 8'237.546 toneladas anuales, generando diversos tipos de desechos como pencas, tallos, entre otros. Estos residuos presentan un estimado de producción energética de 8.565 GW/h (TABLA I).

TABLA I.  
POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESIDUOS EN LA PRODUCCIÓN DE BANANO

Cultivo	Producción t/año	Tipo de residuo	Masa de residuo t/año	Potencial energético TJ/año	Potencial energético GW/h
		Raquis	8 237.546	3536	982
Banano	8 237.546	Vástago	41 187.730	23220	6450
		Rechazo fruta	1 235.632	2173	604

**Fuente:** Adaptado de [25].

### B. Lodos Residuales

Los lodos residuales se destacan por su abundante contenido en materia orgánica, metales pesados y micro/macroelementos, esenciales en la gestación de microorganismos patógenos con efectos nocivos en humanos, animales y plantas [26].

La correcta disposición final de este tipo de residuos conlleva un elevado coste financiero centrado en el proceso de tratamiento (biodigestor/sistemas de estabilización), se han desarrollado diferentes tecnologías de estabilización que permiten su aprovechamiento como la recuperación de materia orgánica como fertilizante agrícola (tratamiento químico, incineración, deshidratación, compostaje y vermicompostaje) [27] [28].

La utilización de estos lodos se centra en la generación de energía (biogás), a partir de este como único sustrato o en la incorporación con diferentes componentes para favorecer las condiciones y producción (procesos de codigestión) [29].

#### 1) Tipos de lodos residuales

Como se mencionó previamente, los lodos residuales cuentan con diferentes componentes orgánicos que representan un riesgo al entorno donde se localicen [30]. Entre los tipos de lodos podemos observar:

- **Lodos primarios:** Se caracterizan por tener aproximadamente un 97% de humedad, presencia de materia orgánica y olor fuerte, tendiendo a ser pretratados, estabilizados y reducidos en porcentaje de humedad antes de su disposición final.
- **Lodos secundarios:** Subproducto conocido como lodo activado proveniente del tratamiento biológico. Tiene una apariencia floculante y un ligero olor.



- 
- **Lodos terciarios:** Estos lodos proceden del tratamiento terciario, que descarta los contaminantes que no fueron eliminados durante el tratamiento anterior para mejorar la calidad del agua y los lodos. Se caracteriza por una disminución del contenido de humedad de aprox. 90% a 30%.

### C. Codigestión anaerobia

La codigestión anaeróbica (CoDA) es una tecnología que convierte los desechos orgánicos en biogás usados en energía renovable reduciendo su impacto en el ambiente. La CoDA utiliza dos o más desechos para lograr el equilibrio de C/N, mantener la estabilidad de la mezcla y asegurar una digestión, optimizando la producción de biogás y el estado del biofertilizante. La cantidad de cada sustrato determina la sinergia de producción de CH<sub>4</sub> a partir de carbohidratos y lípidos [31].

La codigestión ayuda a resolver los problemas de la monodigestión y tiene otros beneficios añadidos. A continuación, se presentan algunas ventajas de la codigestión sobre la digestión única [32]:

- La mezcla de sustratos orgánicos para la codigestión proporciona una relación C/N para la digestión anaeróbica (C/N 20 % a 30 %).
- Dilución de compuestos potencialmente tóxicos presentes en los respectivos sustratos auxiliares.
- Regulación del contenido de humedad.
- Regulación del pH.
- Proporcionar la capacidad de buffer necesaria.
- Incrementar el contenido de materiales biodegradables.
- Equilibrio entre macro y micronutrientes.
- Ampliar la gama de cepas bacterianas implicadas en este proceso.
- Reducir olores y patógenos, mejorando la seguridad ambiental.
- Beneficios ecológicos, técnicos y económicos.

Existen factores relevantes que se consideran para seleccionar la mezcla de residuos adecuada para la codegradación, como la relación equilibrada de C/N, debido a que los microorganismos necesitan una cantidad suficiente de carbono y nitrógeno para asegurar el correcto crecimiento celular y el desarrollo de diversas reacciones metabólicas. Dentro del proceso de codigestión podemos encontrar las siguientes etapas en la TABLA II:

TABLA II.  
FASES DEL PROCESO DE CO-DIGESTIÓN

FASES	PROCESOS
Hidrólisis	Etapa inicial de la digestión anaeróbica, desechos orgánicos experimentan hidrólisis, transformándose en moléculas como ácidos grasos volátiles (AGV), entre otros.
Acidogénesis	Los desechos orgánicos disueltos, originados a través del proceso de hidrólisis, se transforman en derivados como ácidos grasos volátiles (AGV)
Acetogénesis	Estos microorganismos producen hidrógeno para descomponer los ácidos orgánicos, como el ácido propiónico.
Metanogénesis	Se emplean como productos finales que se emplean como suministro para la producción de metano.

**Fuente:** Adaptado de [31].

### 1) Etapas de la codigestión anaerobia

La codigestión anaerobia se establece como un procesamiento complejo producto a su implementación en numerosas reacciones bioquímicas, desarrolladas por microorganismos. En este sentido, se determinan las siguientes etapas dentro del proceso:

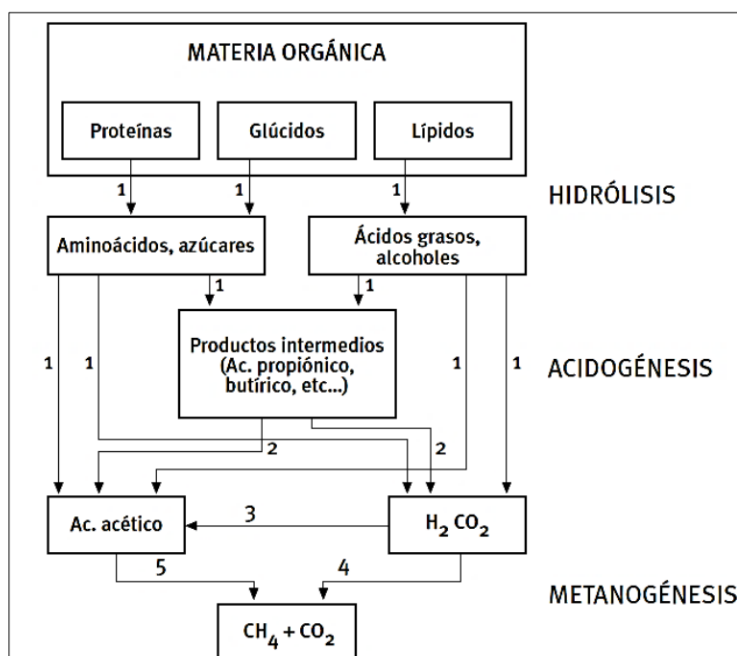


Figura 1. Etapas de la codigestión anaerobia

**Fuente:** Tomado de [14]

a) *Hidrólisis*

En la primera parte, es importante saber cuánto tiempo dura la digestión anaeróbica. La cantidad total de sólidos en el sustrato es crucial porque si hay más sólidos, más tiempo se necesita para el proceso. Esta fase está influida por la temperatura, el tiempo de retención, la composición bioquímica del sustrato, el tamaño de las partículas, el pH y la concentración de  $\text{NH}_4$  [31]. Es importante que las proteínas en el sustrato se hidrolizan en aminoácidos y péptidos. Algunos de estos elementos se emplean directamente en la elaboración de nuevo material celular, mientras que el resto se vierte en dióxido de carbono, ácidos volátiles, hidrógeno, amonio y azufre [33].

b) *Etapa fermentativa o acidogénica*

Etapa crucial que se distingue por su capacidad para producir  $\text{H}_2$ , por medio de la implementación de una variedad de especies microbianas. En el proceso de producción de productos finales, se producen diferentes sustancias orgánicas como: etanol, acetona, ácido acético, ácido láctico, ácido propiónico y butanol; en esta fase casi no se produce energía proporcionada por el metabolismo de la mayoría de los azúcares, en cambio, se generan diferentes tipos de fermentación detallado en la siguiente tabla.

TABLA III.  
TIPOS DE FERMENTACIÓN REALIZADAS EN LA ETAPA FERMENTATIVA

<b>Tipo de fermentación</b>	<b>Producto</b>
<b>F. Láctico</b>	Lactato
<b>F. Alcohólico</b>	Etanol, Dióxido de Carbono
<b>F. Ácido-Mixto</b>	Etanol, Dióxido de Carbono, Formiato, Lactato, Succinato, Acetato
<b>F. Butilénglicólico</b>	Butilénglicol, Dióxido de Carbono
<b>F. Acetato-Butírico</b>	Etanol, Dióxido de Carbono, Hidrógeno Molecular, Butanol, Acetato, Butirato, Acetona

Fuente: [22]

c) *Etapa acetogénica*

En esta etapa, los microorganismos acetogénicos descomponen productos simples como: compuestos aromáticos, ácidos grasos volátiles y etanol, y los transforman en  $\text{H}_2$  y el ácido acético y también pueden ser empleados en la fase de metanogénesis en diferentes acciones, como:

TABLA IV.  
ETAPA ACETOGÉNICA

<b>Etanol y láctico</b>	
Etanol + H <sub>2</sub> O → Acetato + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+9,6
Lactato <sup>-1</sup> + 2H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-4,2
<b>Ácidos Grasos</b>	
Acetato <sup>-1</sup> + 4H <sub>2</sub> O → H <sup>+</sup> + 4H <sub>2</sub> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	+104.6
Propionato <sup>-1</sup> + 3H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> + 3H <sub>2</sub>	+76.1
Butirato <sup>-1</sup> + 2H <sub>2</sub> O → 2Acetato <sup>-1</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+48.1
Valerato <sup>-1</sup> + 3H <sub>2</sub> O → 3Acetato <sup>-1</sup> + 2H <sup>+</sup> + 4H <sub>2</sub>	+96.2
<b>Aminoácidos</b>	
Alanina + 3H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+7.5
Aspartato <sup>-1</sup> + 4H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	-14.0
Leucina + 3H <sub>2</sub> O → isovalerato <sup>-1</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+4.2
Glutamato <sup>-1</sup> + 4H <sub>2</sub> O → propionato <sup>-1</sup> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	-5.8
Glutamato <sup>-1</sup> 7H <sub>2</sub> O → acetato <sup>-1</sup> + 3HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + 3H <sup>+</sup> + 5H <sub>2</sub>	+70.3

**Fuente:** Tomado de [14]

*d) Etapa metanogénica*

Etapa importante en el proceso de fermentación anaeróbica, donde el CH<sub>4</sub> es el producto final. Un grupo extenso de bacterias estrictamente anaeróbicas actúa sobre los productos generados en las etapas previas detallados en la TABLA IV [34]. Que ocurren a través de dos vías, la primera es la etapa de degradación del acetato caracterizada por un aumento en el número de microorganismos. Aumenta el sustrato del acetato integrando las vías bioenergéticas y biosintéticas para producir ATP, centrado en la presencia de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> [35]. Los microorganismos anaerobios emplean sustratos que unen covalentemente los átomos de carbono al acetato, CO<sub>2</sub>, metilaminas y metanol [9].

TABLA V.  
ETAPA METANOGENICA

<b>Etanol y láctico</b>	
Etanol + H <sub>2</sub> O → Acetato + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+9,6
Lactato <sup>-1</sup> + 2H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-4,2
<b>Ácidos Grasos</b>	
Acetato <sup>-1</sup> + 4H <sub>2</sub> O → H <sup>+</sup> + 4H <sub>2</sub> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	+104.6
Propionato <sup>-1</sup> + 3H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> + 3H <sub>2</sub>	+76.1
Butirato <sup>-1</sup> + 2H <sub>2</sub> O → 2Acetato <sup>-1</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+48.1
Valerato <sup>-1</sup> + 3H <sub>2</sub> O → 3Acetato <sup>-1</sup> + 2H <sup>+</sup> + 4H <sub>2</sub>	+96.2
<b>Aminoácidos</b>	
Alanina + 3H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+7.5
Aspartato <sup>-1</sup> + 4H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	-14.0
Leucina + 3H <sub>2</sub> O → isovalerato <sup>-1</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+4.2
Glutamato <sup>-1</sup> + 4H <sub>2</sub> O → propionato <sup>-1</sup> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	-5.8
Glutamato <sup>-1</sup> 7H <sub>2</sub> O → acetato <sup>-1</sup> + 3HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + 3H <sup>+</sup> + 5H <sub>2</sub>	+70.3

Fuente: Tomado de [14]

### 1) Aspectos técnicos de la codigestión anaerobia

La codigestión es un proceso de fermentación en condiciones muy bajas de oxígeno. La producción de biogás está compuesta de gases como: CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. También se produce un lodo acuoso que contiene microorganismos responsables de descomponer la materia orgánica [36].

Este método de digestión, combina residuos de frutas, verduras, ganaderos, lodos de depuradora, entre otros; para controlar variables. Según diversos hallazgos, se ha demostrado la efectividad de este enfoque y proceso mediante la utilización de las mezclas. [37].

### D. Parámetros físicos-químicos

#### 1) Humedad

Cantidad de vapor de agua en estado gaseoso, medida en términos de humedad absoluta o relativa. La temperatura que alcanza el gas es crucial, ya que determina la cantidad de vapor que contiene. Su importancia radica en diversos factores, interviniendo en aspectos ambientales, procesos y sistemas de tratamientos. Un manejo pertinente permite mejorar la eficiencia de estos sistemas, manteniendo condiciones estables en áreas de producción como biogás. [38]

---

Dentro de la producción de biogás por codigestión se establecen los siguientes rangos óptimos de humedad en porcentajes entre 50 – 60%. [39]

### 2) *Potencial hidrógeno (pH)*

Medida consistente a la acidez o base presente en una solución/sólido. Su valor corresponde a un rango entre 0-14, considerando pH de 7 un valor neutro, menores a este sugiere una acidez y mayores establecen una alcalinidad. Su importancia en la generación de biogás reca en mantener la actividad microbiana y la eficiencia del proceso, por lo tanto, monitorear y ajustar el pH es fundamental para mantener condiciones óptimas en la producción de biogás. Su rango óptimo de pH se encuentra entre 6.5 – 7.5. [40] [41]

### 3) *Sólidos volátiles (SV)*

Correspondiente a medida de sustancias presentes en una muestra, referidas a fracción de sólidos en una muestra que se pierde durante un proceso de calentamiento a temperaturas altas, alrededor de 550 °C. Los sólidos volátiles radican en que son la materia prima principal para la producción de biogás, cuanto mayor sea la cantidad de sólidos volátiles presentes en los sustratos utilizados, mayor será la cantidad de biogás generado. Se establece como rangos óptimos de sólidos volátiles porcentajes entre 50 – 80% del peso seco [42] [43]

### 4) *Materia orgánica (MO)*

Compuestos que contienen carbono producidos por organismos vivos. Su importancia radica en su capacidad para servir como fuente de energía renovable. Al descomponerse, la materia orgánica libera compuestos que son consumidos por bacterias específicas, que a su vez generan biogás como producto de desecho. Su presencia y concentración pueden ser medidas de diferentes maneras, como a través del contenido de carbono orgánico total (COT) o la demanda química de oxígeno (DQO). Sus rangos óptimos para la producción de biogás se establecen entre 50 – 80% del peso seco. [43] [44]

### 5) *Carbono orgánico total (COT)*

Medida que cuantifica la cantidad total de carbono presente en forma de compuestos orgánicos en una muestra. El COT es componente principal que las bacterias anaeróbicas utilizan como sustrato para la producción de biogás. Cuanto mayor sea la concentración de carbono orgánico en los sustratos alimentados al digestor anaeróbico, mayor será la producción potencial de biogás. Esto se debe a que las bacterias presentes en el digestor descomponen las moléculas orgánicas complejas en compuestos más simples como ácidos grasos volátiles y luego en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Sus rangos óptimos de COT corresponden entre 45 – 55% en peso seco [44] [45].

### 6) *Nitrógeno total (NT)*

Parámetro que cuantifica la cantidad total de nitrógeno presente en una muestra, como nitrógeno orgánico, amoníaco, nitritos y nitratos. NT es esencial para bacterias en la descomposición de la materia orgánica en codigestión anaeróbica. Un adecuado suministro de nitrógeno asegura que las bacterias puedan mantener una actividad metabólica saludable, lo cual es fundamental para la descomposición efectiva de los sustratos y la producción sostenida de biogás. Se establece como rangos óptimos de NT entre 1.7 – 4.0% del peso seco [46] [47]

### 7) *Relación carbono nitrógeno (C/N)*

Medida que expresa la proporción entre la cantidad de carbono y nitrógeno en una muestra. La relación C/N radica en su influencia directa sobre la actividad microbiana y la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica. Un C/N adecuado permite mantener un equilibrio óptimo en la descomposición de la materia orgánica por parte de las bacterias presentes en el digestor. Se indica como rangos óptimos de C/N relaciones entre 20:1 – 30:1. [48] [49]

### *E. Biogás*

El biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub>, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia del aire, por la acción de un grupo de microorganismos, si las condiciones ambientales y operaciones son óptimas a próximamente en un período de 15 días se produce biogás [50]

El biogás es un gas que se genera en medios naturales en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, entre otros), y otros factores, en ausencia de oxígeno (esto es, en un ambiente anaeróbico). Para producir biogás es posible utilizar cualquier tipo de estiércol ya sea de vaca, cerdo, cabra, aves e incluso emplear los desechos humanos [51].

### *F. Potencial de la agroindustria como actor en la producción de biogás*

La biomasa se presenta como una fuente de energía alternativa catalogada como renovables, la cual hace uso de desechos orgánicos en la obtención de energía. En el sector agrícola, la biomasa se refiere a los subproductos obtenidos durante la cosecha, el procesamiento del cultivo y los subproductos asociados con el trabajo cultural del cultivo, como la poda de diversas malezas y el procesamiento mecánico en el campo. La biomasa se puede convertir en combustibles gaseosos, líquidos y sólidos de diferentes maneras, mediante

---

conversión térmica o biológica, esta conversión se puede convertir en biocombustible o biogás del cual se puede obtener calor, electricidad o energía [52].

### *G. Impacto ambiental de la producción de biogás*

En el proceso de implementación de un codigestión anaerobio se identifica distintas afecciones negativas ambientales en diferentes fases desde la construcción, tales como: impacto directo al suelo, impacto al paisaje y cambio de hábitat, pero se puede restaurar fácilmente al principio en las fases de construcción y operativas tomando medidas correctivas que permitan reducir significativamente los efectos [53]. De igual manera en las fases operativas se producen malos olores, lodos terciarios, emisiones a la atmósfera, entre otros.

### *H. Políticas y regulaciones relacionadas con la producción de biogás*

De acuerdo con el Art. 413 de la Constitución Ecuatoriana se establece la búsqueda de fuentes de energías alternativas, incentivando la diversificación de las fuentes de matriz energética, reduciendo el consumo de combustibles derivados de fuentes no renovables. Según lo establecido, se pretende aprovechar los desechos de los sectores agrícolas, pecuarios y domiciliarios mediante el uso de biodigestores para la producción de biogás [54].

El Ministerio de Energías y Minas mediante el “Programa Nacional de Construcción de Biodigestores”, se ha catalogado como un proyecto prioritario por los Art. 28 y 32 a través de leyes presupuestarias del sector público, debido a la expansión de la construcción y producción de biogás. En la actualidad existen pocos biodigestores considerables en el Ecuador, sin embargo, se observan pequeños digestores: Jardín Botánico de Quito, Biodigestores de la empresa Aqualimpia, Biodigestor de la empresa PRONACA [32].

### *I. Experiencias y casos de éxito en la producción de biogás a partir de la codigestión anaerobia*

Según Castro et al. [55], en la investigación titulada "La producción de biogás mediante la congestión de estiércol bovino y los residuos de la cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)", la codigestión anaerobia se establece como la oportunidad de incorporar los residuos en la producción de energía a través de desechos derivados del tomate y estiércol de vaca. Este enfoque posibilita la obtención de energía alternativa mediante el proceso de producción de biogás combustible. Recomendando usar una mezcla de purín y residuos de tomate permitiendo que el carbono y el nitrógeno se relacionen y que la digestión sea más eficiente.

En cambio, de acuerdo con Martínez et al. [56] sobre cómo se producen residuos orgánicos en Cuba, se descubrió que la biomasa con un mejor rendimiento en la producción de



CH<sub>4</sub> resultó del girasol y maíz. En cambio, la biomasa producto del maní y excretas bovinas son las que presentaron menores rendimientos específicos de CH<sub>4</sub>. Mientras tanto, Núñez [52] en el estudio “Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta”, los biocombustibles y el biogás son alternativas a combustibles no renovables (fuentes fósiles, gas natural, carbón, entre otros.), que se utilizan para generar electricidad especialmente en áreas remotas donde los sistemas eléctricos son inestables o tienen problemas de conectividad. Siendo que, perfeccionar los contextos económicos, sociales y ambientales en comunidades específicas debe incluirse como estrategias de producción energética en las diferentes naciones.

*J. Diferentes concentraciones de cáscara de banano y lodo residual para la generación de biogás*

De acuerdo con diferentes estudios la relación sedimento/cáscara de banano maduro, para la producción de biogás y contenido de CH<sub>4</sub> se ha estudiado según las siguientes concentraciones (TABLA VI):

TABLA VI.  
RELACIÓN SUSTRATO/CÁSCARA DE BANANO MADURO

Biodigestor	Relación (sust/cas) (g.)	Producción de biogás 1 (l)	Producción de biogás 2 (l)	Producción de biogás 3 (l)	Contenido de metano 1 (%)	Contenido de metano 2 (%)	Contenido de metano 3 (%)
A	60/30	0,13	0,15	0,15	No se detectó	No se detectó	No se detectó
B	90/60	0,18	0,2	0,21	0,24	0,27	0,29
C	60/60	0,13	0,15	0,17	0,12	0,14	0,16

Fuente: [57]

## VII. METODOLOGÍA

### A. Enfoque de la investigación

La investigación fue experimental, analizando las variables dependientes cruciales; la concentración de CH<sub>4</sub> y el volumen de biogás generado. Estas fueron examinadas en relación con las variables independientes; cáscara de banano maduro y los lodos residuales obtenidos del Estero Huayla.

### B. Recolección de la muestra

Se recolectó 4kg de lodos primarios del estero Huayla, Parroquia Puerto Bolívar, al sureste del cantón Machala fig. 2, las muestras fueron recolectadas a las 5h00. Para preservar la calidad del sustrato se lo transportó en refrigeración al Laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud en la Universidad Técnica de Machala.

La empresa Diana Food S.A, ubicada en la Peaña km 13 ½. Del cantón Pasaje, provincia de El Oro figura 3, nos facilitó 4kg de sustrato de cáscaras de banano.

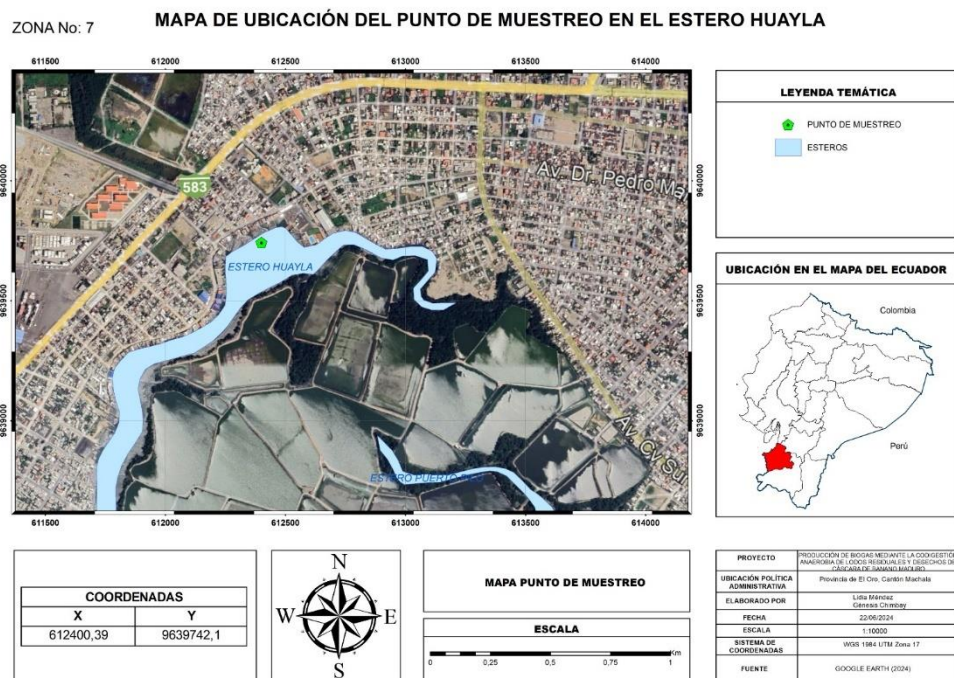


Figura 2. Mapa de Ubicación del punto de muestreo

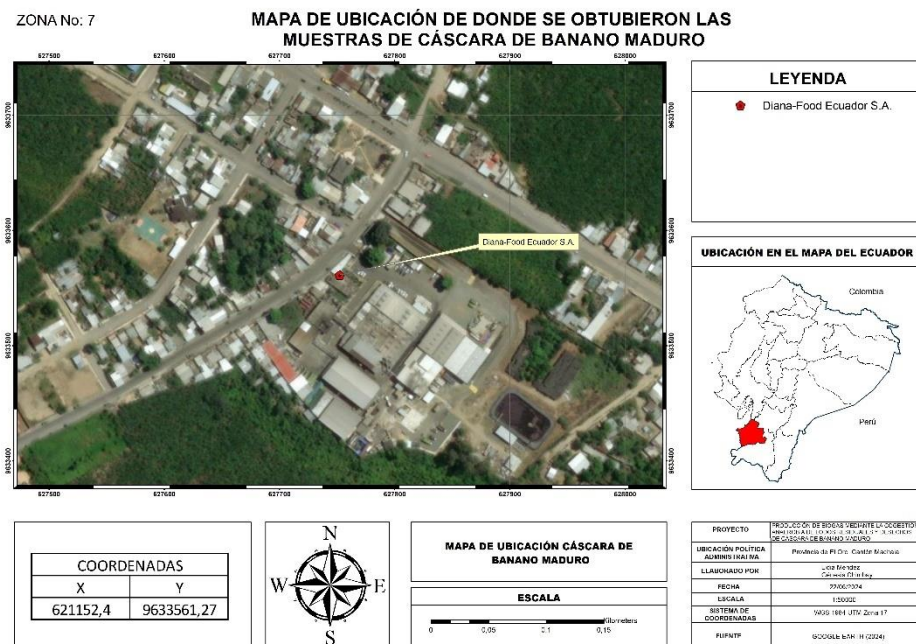


Figura 3. Mapa de ubicación de donde se obtuvieron las muestras de cáscara de banana maduro

*C. Proceso metodológico para la obtención del Biogás*

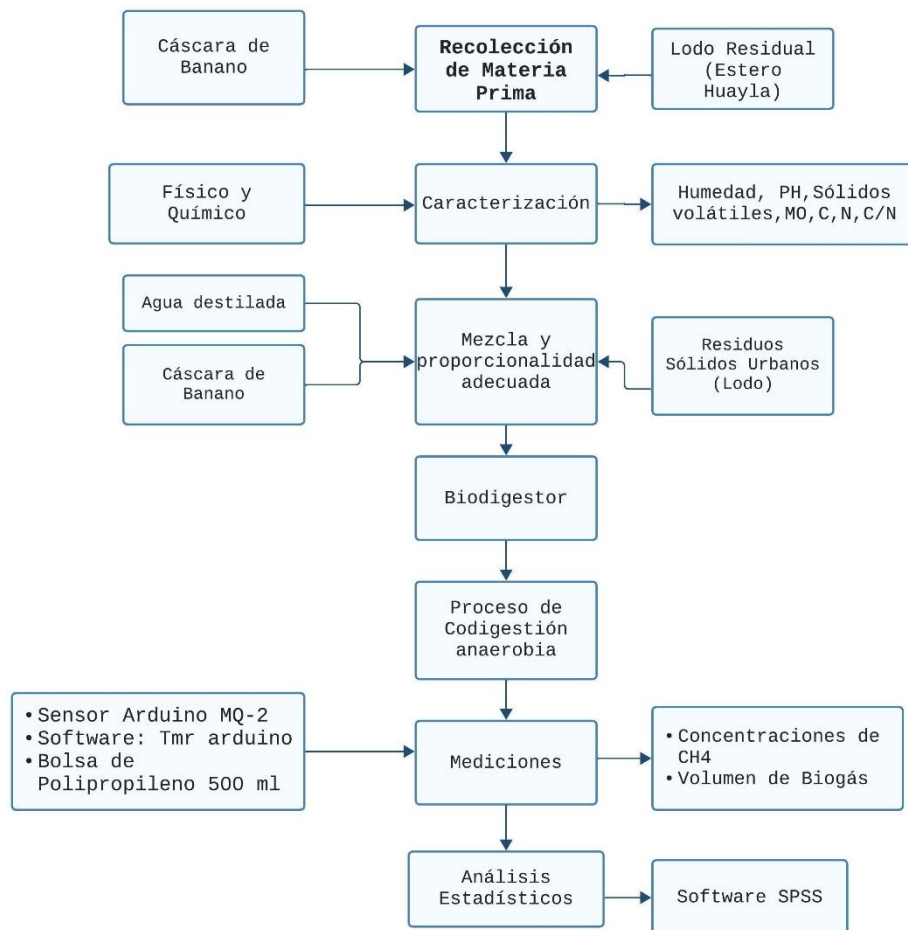


Figura 4. Diagrama metodológico para obtener biogás (CH4)

#### D. Determinación fisicoquímica de los sustratos

Los parámetros para la caracterización física y química de los sustratos se establecieron de acuerdo con el Manual de Biogás [58]. Estos incluyen:

TABLA VII.  
DETERMINACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS SUSTRATOS

Sustratos	Parámetros Físicos-Químicos					
<b>Cáscara de Banano</b>	Humedad	pH	Sólidos	Carbono	Nitrógeno	C/N
			Volátiles	Orgánico	Total	
				Total		
<b>Lodos Primarios</b>	Humedad	pH	Materia	Carbono	Nitrógeno	C/N
			Orgánica	Orgánico	Total	
				Total		

##### 1) Caracterización fisicoquímica (Banano)

###### a) Humedad

- **Equipos:** Balanza analítica, estufa de secado, desecador
- **Materiales:** Crisol, paleta, papel de filtro

#### Procedimiento:

El contenido de humedad en los sustratos se determinó a través de la gravimetría [59], reconocida por su precisión y fiabilidad en la medición.

- En un crisol de cerámica se colocaron 10g de la muestra
- Se deshidrató en una estufa a una temperatura constante de 105°C, durante 24 horas.
- La muestra se transfirió a un desecador para eliminar la humedad residual.
- La muestra deshidratada fue pesada.
- El contenido de humedad se calculó empleando la fórmula.

$$H(\%) = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100$$

Ecuación 1

Donde:

H% = porcentaje de humedad

P1 = Peso de la muestra humedad en g

P2 = Peso de la muestra seca en g

###### a) pH

- **Equipos:** Potenciómetro
- **Materiales:** Vaso precipitado, piceta
- **Reactivos:** solución buffer de pH 4, 7, 10 y agua destilada

### Procedimiento:

El pH se lo midió con la metodología propuesta por Durán [60]. Donde indica que para las muestras sólidas se debe diluir 1:5 (muestra: agua).

- Se trituró las cáscaras de banano y se pesó 15g del sustrato.
- Se calibró el potenciómetro utilizando soluciones buffer estándar.
- Limpieza del electrodo con agua destilada.
- Dilución (1: 5) los 15 g del sustrato y se agregó 75 ml de agua destilada.
- Colocar la muestra en un vaso de precipitación y proceder a medir.

#### *b) Sólidos Volátiles*

De acuerdo con lo propuesto en APHA (American Public Health Association) [61].

- Los ST y SV se realizaron sometiendo la muestra de biomasa en una placa de evaporación limpia a un secado a 105 °C durante 24 horas.
- Luego de enfriarlo en un desecador, se pesó para obtener los ST.
- Se calcinó la misma muestra a 550 °C durante una hora en un horno de mufla.
- Se dejó enfriar y se obtuvo el peso de las cenizas para la determinación del contenido en SV.
- El porcentaje de ST y el de SV se calculó a partir de [62]:

$$SV(\%) = \frac{\text{Peso}_{105^{\circ}\text{C}} - \text{Peso}_{550^{\circ}\text{C}}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

#### *c) Carbono Orgánico*

El laboratorio NemaLab, situado en la Av. Ferroviaria en el cantón Machala de la provincia de El Oro, llevó a cabo el análisis del carbono orgánico utilizando la metodología de Walkley Black. Esta técnica determina el carbono orgánico del suelo mezclando una muestra con  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , lo que oxida el carbono a dióxido de carbono. Luego, se mide el dicromato no reaccionado mediante una titulación con  $\text{FeSO}_4$ . La cantidad de dicromato que reaccionó indica el contenido de carbono orgánico en la muestra [63]. Finalmente, la cantidad de carbono orgánico en la muestra se calcula utilizando una fórmula específica [64].

$$\%CO = \frac{(V1 - V2) \times N \times 0.003 \times (100 + pW)}{Wm} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

V1= volumen de la solución titulante

V2= volumen de la solución titulada

N= normalidad del sulfato ferroso

pW= % humedad de la muestra

Wm= Peso de la muestra original

*d) Nitrógeno total*

El laboratorio Nermalab llevó a cabo la determinación del nitrógeno total mediante la metodología de Micro Kjeldahl. Este método consiste en digerir la muestra con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado, lo que convierte el nitrógeno en amoníaco. Luego, el amoníaco se destila en una solución de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> y se titula con un ácido estándar, permitiendo calcular el contenido total de nitrógeno en la muestra [65] [66].

$$\%NT = \frac{(\text{mL ácido valorante} - \text{mL blanco}) \times 1,4007}{\text{peso de la muestra (g)}} \quad \text{Ecuación 4}$$

*e) Relación C/N*

La relación C/N indica la proporción entre la cantidad de carbono y la cantidad de nitrógeno en el sustrato, expresada como un valor decimal, donde el numerador representa la cantidad de carbono y el denominador, la cantidad de nitrógeno. Para calcular la relación C/N de los sustratos, es necesario disponer de los valores de carbono orgánico y nitrógeno total.

$$\text{Relación C/N} = \frac{\text{CO}}{\text{NT}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

CO = Carbono orgánico

NT = Nitrógeno total

*2) Caracterización fisicoquímica (Lodo primario)*

Los parámetros de humedad y materia orgánica en (%), se caracterizaron en referencia al método de calcinación, mientras que el pH y temperatura conforme al Standard Methods [67].

*a) Humedad*

El laboratorio Nermalab llevó a cabo el contenido de humedad en los sustratos se determinó con la técnica gravimétrica [59], reconocida por su precisión y fiabilidad en la medición. Para el calculo se utilizó la siguiente fórmula:

$$H(\%) = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

H% = porcentaje de humedad

P1 = Peso de la muestra humedad en g

P2 = Peso de la muestra seca en g

b) *pH*

El laboratorio NemaLab llevó a cabo el cálculo del pH utilizando el potenciómetro.

c) *Materia Orgánica y Carbono Orgánico*

Para la determinación de los parámetros de CO y MO en suelo, se utilizó la metodología de Walkley Black en el Laboratorio NemaLab, ubicado frente a la Universidad Técnica de Machala. Este método consiste en oxidar el carbono orgánico del suelo mediante dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) en un medio ácido con ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Durante el proceso, la muestra de suelo se mezcla con una cantidad específica de  $K_2Cr_2O_7$ , y el exceso de dicromato no reaccionado se titula con sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ). La diferencia entre el dicromato inicial y el que permanece tras la titulación se utiliza para calcular el contenido de carbono orgánico, teniendo en cuenta un factor de corrección que ajusta por la incompleta oxidación del carbono. Finalmente, el valor obtenido se multiplica por 1.724 para convertir el carbono orgánico a materia orgánica, bajo la premisa de que la materia orgánica del suelo está compuesta aproximadamente por un 58% de carbono [63] [64].

d) *Nitrógeno Total*

El nitrógeno total fue determinado mediante el método de Kjeldahl en el Laboratorio NemaLab, que implica un proceso de digestión ácida, destilación y titulación para cuantificar el amonio liberado. Inicialmente, la muestra se digiere con ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) concentrado a alta temperatura (aproximadamente  $350^\circ C$ ) en presencia de un catalizador, lo que convierte el nitrógeno orgánico en sulfato de amonio ( $(NH_4)_2SO_4$ ).

Posteriormente, la solución resultante se neutraliza con hidróxido de sodio (NaOH), liberando el amonio en forma de gas ( $NH_3$ ), el cual se destila hacia un receptor que contiene ácido bórico ( $H_3BO_3$ ). El amonio gaseoso reacciona con el ácido bórico para formar borato de amonio ( $NH_4H_2BO_3$ ), el cual es finalmente titulado con una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) de concentración conocida. La cantidad de nitrógeno total en la muestra se calcula utilizando una fórmula específica, basada en la cantidad de ácido necesario para alcanzar el punto final de la titulación. [66].



$$\%NT = \frac{(\text{mL ácido valorante} - \text{mL blanco}) \times 1,4007}{\text{peso de la muestra (g)}} \quad \text{Ecuación 7}$$

e) *Relación C/N*

La relación C/N indica la proporción entre el contenido de carbono y el contenido de nitrógeno en el sustrato, y se representa como un valor decimal, donde el numerador corresponde al contenido de carbono y el denominador al contenido de nitrógeno. Para calcular la relación C/N de los sustratos, es necesario conocer previamente los valores de carbono orgánico y nitrógeno total, para luego aplicar la fórmula siguiente.

$$\text{Relación C/N} = \frac{\text{CO}}{\text{NT}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

CO = Carbono orgánico

NT = Nitrógeno total

E. *Preparación de biodigestores*

Para este proceso se construyeron 4 biodigestor con botellas plásticas recicladas con un volumen de 1000 mL de capacidad. El procedimiento comenzó con la perforación de un agujero en la tapa de la botella con un hierro a alta temperatura para poder insertar un tapón de caucho y un tubo de recolección de sangre. En este tapón se selló con silicona acética y se colocó una aguja de 4 cm de longitud para conectarla a un tubo de venoclisis de 12 cm de longitud. Luego este conjunto se conectó a otra aguja que se insertó en una bolsa de propileno de 500 mL destinada a la recolección del biogás.

F. *Constitución de los biodigestores*

La determinación de los biodigestores y el mezclado eficaz para lograr la máxima producción en volumen de biogás tomando en cuenta como principal al metano (CH<sub>4</sub>) se realizó en base a la metodología de Zuma Lalangui, et al. [57], lo cual en cada biodigestor se introdujo la cáscara de banano maduro, lodo primario y agua destilada. Las cáscaras de banano se pretrataron almacenándolas en ambiente mesófilos durante cuatro días para optimizar la producción de CH<sub>4</sub> y biogás. Los biodigestores fueron llenados hasta el 80 % de su totalidad para dejar un espacio vacío del 20 % o a su vez 200 mL libres para la correcta producción del biogás, como se muestra en la TABLA VIII:



TABLA VIII.  
 PROPORCIONALIDAD DE LOS BIODIGESTORES

N. Biodigestor	Agua (mL)	Cáscara de banano maduro (g)	Lodo Estero Huayla (g)
R1	200	360	240
R2	200	240	360
R3	320	120	360
R4	320	360	120

### G. Monitoreo del Biogás



Figura 5. Biodigestor para el monitoreo de biogás

Se emplearon bolsas de propileno esterilizadas de 500 ml como medio de muestreo para determinar la cantidad de gas producido. Esta elección se basó en sus notables ventajas en términos permeabilidad, esterilización y durabilidad, convirtiéndolas en una solución óptima para el almacenamiento seguro del biogás. Se registró la producción diaria de gas como se puede observar en la siguiente *fig. 4* para los distintos tratamientos a lo largo de los días de digestión, desde el inicio del proceso el día 1 hasta el día que cesó la producción de biogás o se mantuvo constante.

### *H. Determinación del Biogás*

El  $\text{CH}_4$  generado en el biogás se midió directamente en el laboratorio antes mencionado, lo cual se utilizó un sensor de gas MQ-2 y el software Arduino IDE 2.3.2. El sensor posee un componente físico clave para la identificación de la cantidad de  $\text{CH}_4$ , por su sensibilidad a este gas. Cuando el sensor se expone con el gas  $\text{CH}_4$ , la conductividad eléctrica del elemento aumenta y lo detecta. Con ayuda del software Tmr Arduino, que es creado a base de un lenguaje de programación c++ y compilado a un lenguaje de ensamblador, utiliza su conversor analógico-digital (ADC) para convertir el voltaje leído del sensor a través de un ordenador.

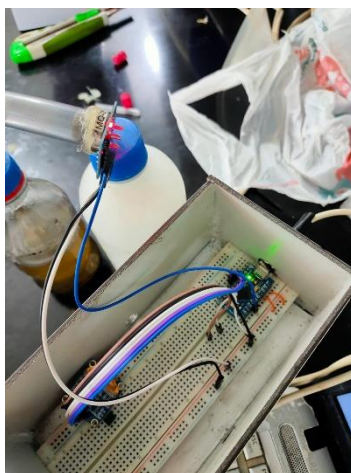


Figura 6. Sensor de gas MQ-2

### *I. Análisis estadístico*

Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA), utilizando el software IBM SPSS para investigar las posibles discrepancias significativas entre los distintos tratamientos y para examinar estadísticamente las relaciones entre las variables dependientes e independientes.

## VIII. RESULTADOS

### A. Caracterización de las propiedades fisicoquímico del lodo del estero Huayla y cáscara de banano.

La caracterización fisicoquímica de los lodos del estero Huayla, se efectuó en el laboratorio NEMALAB S.A y para la caracterización de la cáscara de banano se realizó en el laboratorio de Agronomía de la UTMACH. A continuación, en la TABLA IX se presentan la caracterización fisicoquímica de lodo primario y cáscara de banano.

TABLA IX.  
CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES FISICO-QUIMICO DEL LODO DEL ESTERO HUAYLA Y LA CÁSCARA DE BANANO

Sustratos	Parámetros Físicos-Químicos						
	Humedad (%)	pH	Sólidos Volátiles (%)	Materia Orgánica (%)	Carbono Orgánico Total (%)	Nitrógeno Total (%)	C/N
<b>Cáscara de Banano</b>	76.45	4.7	75.50	-	33.89	0.83	7.98
<b>Lodos primarios</b>	61.50	7	-	2.20	1.28	0.18	7.22

### B. Rendimiento de la producción de biogás

En la Fig. 6, muestra la producción total de biogás (mL) generados en los cuatro biodigestores aplicados durante los 13 días de codigestión anaerobia.

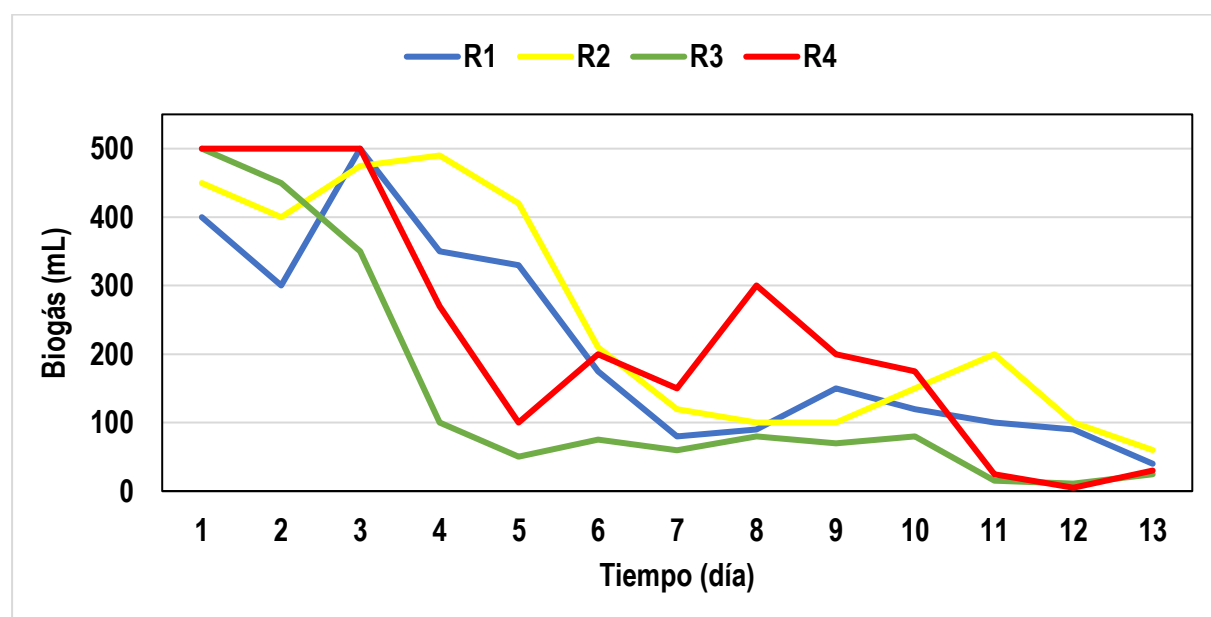


Figura 7. Producción Total de Biogás

En la producción diaria de biogás, el biodigestor R1 comienza con 400 mL y alcanza 500 mL en el día 3, seguido de una disminución constante hasta 40 mL en el día 13. El biodigestor R2 muestra un comportamiento similar, comenzando con 450 mL, alcanzando un pico de 490 mL en el día 4, y disminuyendo constantemente hasta 60 mL el día 13. El biodigestor R3 inicia con 500 mL el primer día, pero muestra una caída drástica después del día 4, alcanzando un mínimo de 11 mL en el día 12 y recuperándose ligeramente a 25 mL el día 13. El biodigestor R4, por su parte, muestra una producción constante y alta en los primeros tres días (500 mL), con una disminución gradual, manteniéndose relativamente alta en comparación con los otros biodigestores y alcanzando 30 mL el día 13.

Comparando la producción de biogás, el biodigestor R2 tiene el volumen acumulado más alto (3275 mL), seguido por R4 (2955 mL), R1 (2725 mL), y R3 (1866 mL). R4 destaca por su estabilidad y alta producción inicial, mientras que R3 tiene la menor producción acumulada y mayor variabilidad. R2 y R1 muestran patrones similares de alta producción inicial seguida por una disminución continua.

#### 1) Análisis estadístico (ANOVA) en las experimentaciones de biogás

En la TABLA X se refleja el análisis de varianza (ANOVA) con respecto a la producción de biogás evaluada en los biodigestores durante un periodo de 13 días de digestión. El ANOVA muestra que si el *valor crítico para F* es mayor que *F* indica que no hubo diferencias significativas entre los biodigestores experimentados y cuando *valor crítico para F* es menor que *F* afirma que hubo diferencias significativas dentro de los biodigestores aplicados.

TABLA X.  
ANOVA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
<b>Entre grupos</b>	83978,5192	3	27992,8397	1,010622	2,79806064
<b>Dentro de los grupos</b>	1329534	48	27698,625		
<b>Total</b>	1413512,52	51			

\*Nivel de significancia del 0.05

El ANOVA refleja un *valor crítico para F* de 2,7980 mayor que el valor de *F* de 1,0111. Esto indica que no existen diferencias significativas entre la producción de biogás producido por los biodigestores.

#### C. Porcentaje de CH<sub>4</sub> en los Biodigestores

En la Fig. 7, demuestra el porcentaje de CH<sub>4</sub> en función de los biodigestores aplicados para los 13 días de digestión anaerobia.

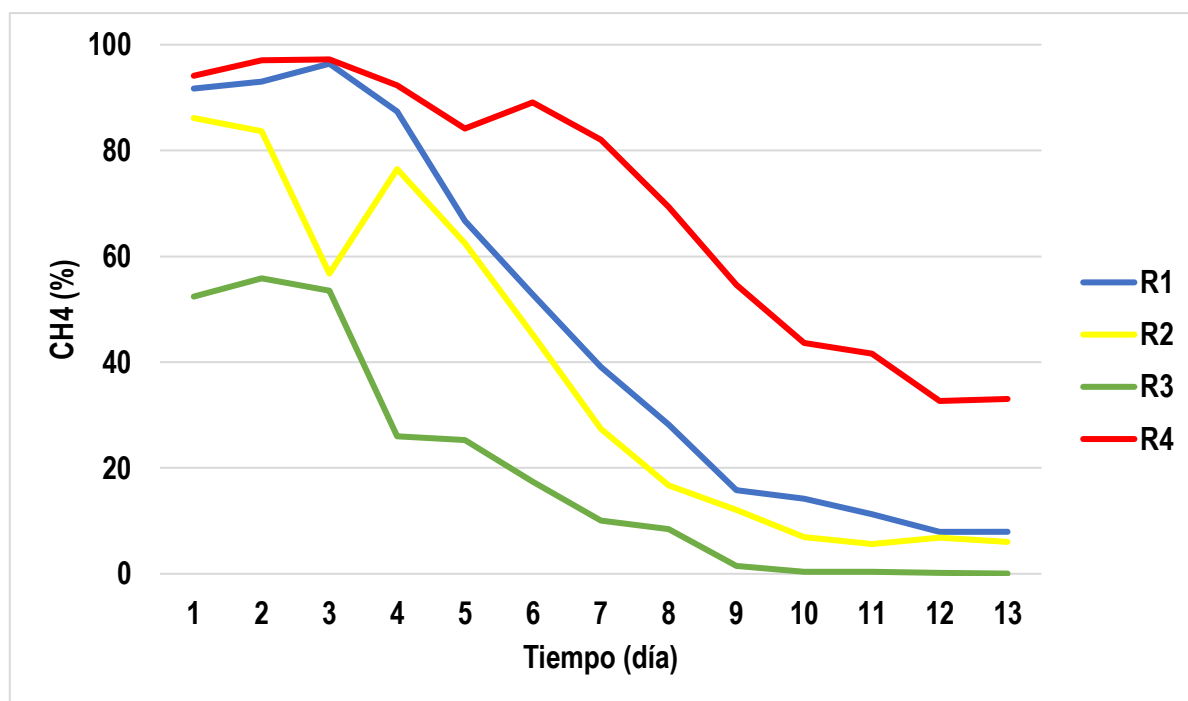


Figura 8. Porcentaje de CH<sub>4</sub>

La gráfica de producción diaria de CH<sub>4</sub> para el biodigestor R1 muestra un inicio alto con 92% en el día 1, seguido de un ligero aumento hasta el 96% en el día 3. A partir de ese punto, hay una disminución progresiva hasta llegar a un 8% en el día 13.

En el biodigestor R2, el porcentaje mayor de CH<sub>4</sub> comienza en 86% en el primer día, los valores de producción diaria de CH<sub>4</sub> del biodigestor no son constantes y varían notablemente de un día a otro durante los primeros días de observación, mientras que en los días 10, 11, 12 y 13 obtuvo valores similares de 7 y 6 % de CH<sub>4</sub>, destacando una inconsistencia en la producción.

El biodigestor R3 empieza con un 52% de CH<sub>4</sub> el primer día, con ligeras variaciones hasta el día 3. Posteriormente, al igual que R2, muestra días con bajas concentraciones desde el día 10 hasta el 13 alcanzando el 0%. Esto refleja una baja eficiencia en la producción de CH<sub>4</sub> desde el inicio del periodo de prueba.

El Biodigestor 4 fue el más eficiente en la producción de metano, su porcentaje más alto se registró el día 1 y 2 con 97 %, y aunque hubo una disminución en los días siguientes, R4 mantuvo una producción relativamente alta en comparación con los otros biodigestores. La menor concentración diaria en R4 fue de 33 % en el día 12 y 13, lo que aún es mayor que la mínima producción diaria en los otros biodigestores.

Al comparar la media en porcentaje de producción diaria de CH<sub>4</sub> entre los biodigestores, R4 es el más eficiente y consistente con una media del 70%, seguido por R1 con una media del 47%. El biodigestor R2 tiene una media del 38%, mostrando menor eficiencia en comparación con R4 y R1, mientras que el biodigestor R3 es el menos eficiente con una media del 19%,

reflejando la menor producción y estabilidad en la generación de metano a lo largo del período de 13 días.

*1) Análisis estadístico (ANOVA) en los biodigestores de CH<sub>4</sub>*

En la TABLA XI presenta análisis de varianza (ANOVA) de la concentración de metano (%) medida en porcentaje durante 13 días de experimentación.

TABLA XI.  
ANOVA CONCENTRACIÓN DE CH<sub>4</sub>

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	17337,3134	3	5779,10448	6,7714427	2,79806064
Dentro de los grupos	40965,7184	48	853,452467		
Total	58303,0319	51			

\*Nivel de significancia del 0.05

En este caso, el análisis ANOVA pertenece a la concentración de CH<sub>4</sub> en porcentaje, reflejando un valor crítico para F de 2,7980 siendo menor que F con un valor de 6,7714. Este resultado revela que existen diferencias significativas entre las concentraciones de CH<sub>4</sub> producidas por los diferentes biodigestores. Es decir, al menos uno de los biodigestores tiene una producción de metano significativamente distinta a los demás.

---

## IX. DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados de la TABLA IX la caracterización fisicoquímica de los lodos residuales y la cáscara de banano maduro reveló propiedades esenciales para la digestión anaerobia, como la relación carbono/nitrógeno (C/N), humedad, contenido de materia orgánica y pH. Estos parámetros son fundamentales para asegurar un ambiente adecuado para las bacterias metanogénicas [58].

En el lodo primario del estero Huayla se obtuvo un pH de 7 es decir neutro; para la cáscara de banano se registró un pH ácido de 4.7. Según Ramírez et al. [68], el rango óptimo para la generación de CH<sub>4</sub> mediante la codigestión anaerobia oscila entre 6.5 y 7.5. Los resultados mostraron que ambos sustratos tienen una relación C/N óptima, 7.22% en el lodo primario y un valor de 7.98 % en la cáscara de banano, lo cual es consistente con Julio [69], este valor es ideal para la producción de biogás ya que se encuentra dentro de los valores que generalmente presentan este tipo de residuos, 6 a 9. Así mismo, Fonoll et al. [70], sostiene que para poder obtener una alta producción de biogás sin afectar el proceso anaeróbico la relación C/N no debe estar inferior a 7 %.

El presente estudio experimental, alcanzó su mayor producción de biogás en el biodigestor 2 (40:60 % v/v Cáscara de banano/lodo primario) con un volumen acumulado de 3275 mL. Así mismo el R4 logró su máxima concentración de CH<sub>4</sub> de 97% en el día 2 y su concentración total medio de CH<sub>4</sub> durante los 13 días de digestión fue de 70%.

En términos cuantitativos, la mezcla de lodos residuales con cáscaras de banano aumentó el volumen total de biogás producido. Este incremento puede atribuirse a la sinergia entre los lodos, que proporcionan nutrientes esenciales para las bacterias anaerobias [71], y las cáscaras de banano, que aportan una fuente rica de materia orgánica fácilmente biodegradable [72].

Nuestros resultados coinciden con estudios previos que han mostrado mejoras en la producción de biogás mediante la codigestión con residuos de frutas. Por ejemplo Zuma et al. [57] menciona que el biodigestor B (90:60 % v/v de Cáscara de banano y sedimento estero El Macho) produjo la mayor cantidad de biogás de 2100 mL con un 0,24 % después de 3 días de digestión.

En otro estudio por Divyabharathi et al. [73], se demostró que la mayor producción de biogás fue de 3850 mL para una proporción de 75% de cáscara de banano triturada con 25% de estiércol de vaca y el contenido de CH<sub>4</sub> del biogás producido en el mismo tratamiento, mostró un promedio superior de 54,2 % durante el periodo de 42 días de proceso.

---

En otra investigación realizada por Romero et al. [62], se indica que el mayor rendimiento de CH<sub>4</sub> alcanzo el 0,39 % con un volumen de biogás de 400 mL, durante un periodo de digestión de 19 días para una proporción de sedimento, cáscara de banano y agua (75:15:15 % v/v).

En la TABLA X y XI se presentan los análisis de varianza (ANOVA) correspondientes a la producción de biogás y al rendimiento de CH<sub>4</sub> en porcentaje. Se observa que no hay diferencias significativas en la producción de biogás mientras que en el rendimiento de CH<sub>4</sub> existen diferencias significativas en los diferentes tratamientos durante los 13 días de experimentación.

Zuma et al. [57] en su investigación basada en tres biodigestores anaerobios con relaciones diferentes de sedimento/cáscara de banano: A (2:1); B (3:2); y C (1:1) indica que, si existen diferencias significativas en la producción media de biogás, mientras que para la media del contenido de CH<sub>4</sub> las diferencias solo se presentan en dos tratamientos.

La diferencia en la producción de metano también podría atribuirse a la naturaleza del pretratamiento y almacenamiento del sustrato [74]. Por otro lado, para utilizar el potencial de las cáscaras de banano como materia prima para una producción óptima de biogás, es necesario conservarlas durante un máximo de cuatro días para aportar el factor de nutrientes [75]. Esto significa que nuestro mayor rendimiento de metano y biogás durante los primeros días fue debido al pretratamiento de cuatro días que se realizó a las cáscaras de banano antes de iniciar el proceso de digestión anaerobia.



---

## X. CONCLUSIONES

- Se caracterizó las propiedades fisicoquímicas de lodos del estero Huayla y cáscara de banano en base al Manual de Biogás y Standard Methods. Los resultados del lodo primario obtuvieron 61.50 % de humedad, 7 de pH, 2.20 % MO, 1.28 % COT, 0.18 % N y 7.22 % C/N y los resultados de la cáscara de banano fueron 76.45 % de humedad, 4.7 pH, 75.50 mg/L SV, 33.89 % COT, 0.83 % N y 7.98 % C/N.
- Los biodigestores de 1000 mL de capacidad fueron mezclados con agua destilada, cáscara de banano y lodo primario, sus relaciones volumétricas son R1 (25, 45, 30 % v/v), R2 (25, 30, 45 % v/v), R3 (40, 15, 45 % v/v) y R4 (40, 45, 15 % v/v), respectivamente. La cantidad de biogás se monitoreó a través de las bolsas de propileno esterilizadas de 500 ml. Según los resultados, la producción de biogás en R2 tiene el volumen acumulado más alto (3275 mL), seguido por R4 (2955 mL), R1 (2725 mL), y R3 (1866 mL).
- Finalmente, se cuantificó la concentración de CH<sub>4</sub> utilizando un sensor de gas MQ-2 y el software Arduino IDE 2.3.2. El R4 fue el más eficiente y consistente con una media del 70% CH<sub>4</sub>, seguido por R1 con una media del 47% CH<sub>4</sub>. El biodigestor R2 tiene una media del 38% de CH<sub>4</sub> mostrando menor eficiencia en comparación con R4 y R1, mientras que el biodigestor R3 es el menos eficiente con una media del 19% CH<sub>4</sub>, reflejando la menor producción y estabilidad en la generación de CH<sub>4</sub> a lo largo del período de 13 días.

## XI. RECOMENDACIONES

- Analizar en los biodigestores las bacterias metanogénicas que intervienen en el proceso de digestión anaerobia para mejorar la producción de CH<sub>4</sub> y biogás.
- Determinar el contenido de carbohidratos, proteínas, lípidos, celulosa, lignina y cenizas para comprender la biodegradabilidad de la materia prima y predecir la producción potencial de biogás.
- Optimizar las condiciones de operación del biodigestor como la temperatura y agitación para maximizar la actividad microbiana y la producción de biogás.
- Determinar el tamaño de partícula óptimo de la cáscara de banano para asegurar una digestión anaeróbica homogénea.
- Fomentar el desarrollo de investigaciones científicas en materia de bioenergía, biogás y energías renovables que contribuya a la transición hacia una economía energética más sostenible y resiliente.

## REFERENCIAS

- [1] C. Nava Escudero, «Water desalination and energy justice. The 2030 Agenda for Sustainable Development.,» *Cuestiones Constitucionales*, n° 47, pp. 243-272, 2022.
- [2] M. Barasa y O. Akanni, «Biogas production and applications in the sustainable energy transition,» *Hindawi*, vol. 1, n° 1, pp. 1-43, 2022.
- [3] J. Gallardo, R. Jasso, D. Robledo, L. Sanchez y E. Tapia, «El gas metano: del efecto invernadero al tratamiento de enfermedades humanas,» *Temas de Ciencia y Tecnologia*, vol. 27, n° 79, pp. 19-27, 2023.
- [4] A. Haro, A. Borja y S. Triviño, «Análisis sobre el aprovechamiento de los residuos del plátano, como materia prima para la producción de materiales plásticos biodegradables,» *Dominio de las Ciencias*, vol. 3, n° 2, pp. 506-525, 2017.
- [5] M. M. Loja-Chillo Gallo, M. M. Saavedra-Jaramillo y L. L. Vega-González, «Covid-19: Impacto económico al sector bananero de la provincia de El Oro, Ecuador, periodo 2019-2020,» *Polo del Conocimiento*, vol. 7, n° 2, pp. 92-111, 2022.
- [6] G. Hernandez, «Emisiones de gases de efecto invernadero y sectores clave en Colombia,» *El Trimestre Economico*, vol. 88, n° 2, pp. 523-550, 2021.
- [7] W. Ordoñez, S. Posada y R. Rosero, «Emisiones de gases de efecto invernadero por aplicación de excrementos bovinos al suelo,» *Informacion Tecnologica*, vol. 34, n° 1, pp. 101-116, 2023.
- [8] I. Diaz, M. Ancco, G. Peña, R. Ancco, G. Davila y H. Jimenez, «Efectos del biocarbon obtenido a partir de residuos agrícolas de uva en la generación de biogas,» *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 24, n° 4, pp. 278-288, 2022.
- [9] L. Maldonado, L. Maldonado, P. Manzano, F. Cuesta, Y. Cedeño y N. Zevallos, «Caracterización físico-químicas de las fibras obtenidas del pseudotallo de la planta de banano (*Musa paradisiaca*), procedente del cantón El Guabo de la provincia de El Oro,» *Yachana*, vol. 2, n° 1, pp. 17-20, 2013.
- [1] H. Romero, O. Tinoco y K. Davila, «Hidrólisis enzimática de residuos agroindustriales del banano para la obtención de jarabe glucosado aplicando tres pretratamientos,» *Industria Data*, vol. 18, n° 1, pp. 101-107, 2015.
- [1] A. Solano, W. Ponce y F. Zambrano, «Biodigestión anaeróbica de residuos de musáceas: 1] Caso Ecuador,» *Biotempo*, vol. 19, n° 1, pp. 51-63, 2022.

- 
- [1 Pacto Mundial Red Española, «Pacto Mundial Red Española,» 19 diciembre 2023. [En 2] línea]. Available: <https://www.pactomundial.org/noticia/cop28-el-inicio-del-fin-de-los-combustibles-fosiles/#:~:text=Conclusiones%20de%20la%20COP28,-El%20primer%20balance&text=Para%20limitar%20el%20calentamiento%20global,de%20carbono%20cero%20para%202050..> [Último acceso: 25 febrero 2024].
- [1 R. Barragan y E. Llanes, «La generacion de energia electrica para el desarrollo industrial 3] en el Ecuador a partir del uso de las energias renovables,» *Universidad, Ciencias y Tecnologia*, vol. 24, n° 104, pp. 34-46, 2020.
- [1 A. Barragan, J. Olmedo, J. Currillo y E. Zalamea, «Assessment of Power Generation Using 4] Biogas from Landfills in an Equatorial Tropical Context,» *Sustainability*, vol. 12, n° 1, pp. 1-18, 2020.
- [1 A. Olarte, «La eficiencia energetica, desafios y oportunidades en Ecuador,» *Dominio de 5] las Ciencias*, vol. 8, n° 2, pp. 1434-1441, 2022.
- [1 M. Garcia, J. Moguel, M. Morales y E. Hernandez, «Modelado y simulacion de la digestion 6] anaerobia de residuos de la planta de platano para la produccion de biogas,» *Memorias*, vol. 12, n° 14, pp. 212-217, 2022.
- [1 H. Romero, C. Vega, J. Zuma, F. Pesantez, A. Camacho y F. Redrovan, «Comparison of 7] the methane potential obtained by anaerobic codigestion of urban solid waste and lignocellulosic biomass,» *Energy Reports*, vol. 6, n° 1, pp. 776-780, 2020.
- [1 F. Miranda, V. Garzón, H. Carvajal y J. Rentería, «Análisis de la producción y 8] exportaciones del sector bananero ecuatoriano en el período 2010-2020,» *Polo del Conocimiento*, vol. 7, n° 8, pp. 650-664, 2022.
- [1 J. León, M. Espinosa, H. Carvajal y J. Quezada, «Análisis de la producción y 9] comercialización de banano en la provincia de El Oro en el período 2018-2022,» *Revista Multidisciplinar Ciencia Latina*, vol. 7, n° 1, pp. 7494-7507, 2023.
- [2 R. Quezada, H. Carvajal y S. Barrezueta, «Impacto económico de la producción bananera 0] en el Ecuador en el período 2008-2016,» *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, vol. 4, n° 2, pp. 148-157, 2021.
- [2 Asociación de Exportadores de Banano del Ecuador, «Ficha Sectorial: Banano y Plátano,» 1] Corporación Financiera Nacional, Quito, 2023.
- [2 V. Beteta, J. Díaz, L. Oré, W. Loarte, G. García, L. Díaz y J. Malpartida, «El compostaje 2] de cáscara de *Musa paradisiaca* L. para la producción de biogás y biometano como

- 
- estrategia de preservación de la salud ambiental,» *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, vol. 62, n° 5, pp. 1048-1054, 2022.
- [2 J. Vera, S. Torres, H. Macías, J. Galarza, L. Piña, W. Morán, L. Rivera y Ó. Cabrera,  
3] «Valoración nutricional de los residuos orgánicos de banano en el cantón La Troncal, Ecuador,» *Revista Universitaria del Caribe*, vol. 26, n° 1, pp. 78-86, 2021.
- [2 K. Garibaldi, N. Montesdeoca, R. Baquerizo, D. Oliva, Y. Gómez y I. Pereda, «Anaerobic  
4] co-digestion of solid waste from coffee benefit, banana pseudo-stem and pig manure: Kinetic, energy and environmental criteria,» *Revista Centro Azúcar*, vol. 49, n° 2, pp. 60-72, 2022.
- [2 A. Solano, W. Ponce y F. Zambrano, «Biodigestión anaeróbica de residuos de musaceas:  
5] Caso Ecuador,» *Biotempo*, vol. 19, n° 1, pp. 51-63, 2022.
- [2 J. Flores, E. Almedo, M. Hidrogo y M. Torres, «Compostaje de lodos residuales para  
6] mejorar los suelos con base en indicadores microbiológicos,» de *Innovación y Suelos Sanos para el Desarrollo Sustentable*, Ciudad de México, D. R., 2022, pp. 458-463.
- [2 R. Saldaña y J. Castillo, «Alternativas para la estabilización de lodos generados en  
7] estaciones depuradoras de aguas residuales desde un enfoque sistémico: Una revisión,» *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 13, n° 1, pp. 175-194, 2022.
- [2 D. Reyes, M. Mora, J. Lugo y P. Del Águila, «Estabilización por vermicomposteo de lodos  
8] residuales aplicados en la productividad de albahaca (*Ocimum basilicum* L.),» *Rev. Int. Contam. Ambie.*, vol. 36, n° 2, pp. 371-381, 2020.
- [2 M. Medina, M. Negrete, F. Gámez, D. Álvarez y E. Conde, «La aplicación de lodos  
9] residuales afecta, a corto plazo, la biomasa microbiana y su actividad en suelos sódicos,» *Rev. Int. Contam. Ambie.*, vol. 36, n° 3, pp. 577-591, 2020.
- [3 J. Domínguez, F. Alcázar, M. Rodríguez, L. de la Peña y R. Valencia, «Co-digestión  
0] anaerobia de lodos residuales y estiércol porcino para mejorar la producción de biogás,» *RINDERESU*, vol. 5, n° 2, pp. 734-747, 2020.
- [3 S. Barrenechea, J. Reyes, M. Estela y R. Steinmetz, «Valorización energética de  
1] macroalgas marinas, residuos pesqueros y de vegetales como sustrato de codigestión anaerobia en la Bahía de Pucusana, Lima-Perú,» *Red de Biodigestores para Latinoamérica y el Caribe*, vol. 5, n° 1, pp. 9-14, 2022.

- 
- [3 L. Sillero, M. Pérez y R. Solera, «Beneficios de la co-digestión anaerobia de lodos, vinaza  
2] y gallinaza en el marco de la economía circular,» Universidad de Salamanca, Salamanca,  
2022.
- [3 J. Diaz, A. Miranda y E. Almirall, «Metodología para obtencion de biogas a partir de  
3] residuos de cosechas del arroz utilizando como inoculo aguas residuales,» *Revista Científica Avances*, vol. 18, nº 4, pp. 325-333, 2016.
- [3 M. Castelao y M. de Vita, «La construcción de capacidades en las industrias basadas en  
4] recursos naturales: la bioenergía en Argentina,» *Pymes, Innovación y Desarrollo*, vol. 10,  
nº 2, pp. 2-23, 2022.
- [3 K. Garibaldi, N. Montesdeoca, R. Baquerizo, D. Oliva, Y. Gómez y I. Pereda, «Anaerobic  
5] co-digestion of solid waste from coffee benefit, banana pseudo-stem and pig manure:  
Kinetic, energy and enviromental criteria,» *Revista Centro Azúcar*, vol. 49, nº 2, pp. 60-  
72, 2022.
- [3 M. Sarabia, J. Laines, J. Sosa y E. Escalante, «Produccion de biogas mediante codigestion  
6] anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta  
de aguas residuales,» *Rev. Int. Contam. Ambie.*, vol. 33, nº 1, pp. 109-116, 2017.
- [3 J. Velasquez, O. Calle, L. Miramontes y L. Alonso, «Evaluacion economica y ambiental  
7] de las tecnologias de utilizacion del biogas y perspectivas del analisis multicriterio,»  
*Revista ION*, vol. 36, nº 1, pp. 29-47, 2023.
- [3 G. Plotnikow, M. Accoce, E. Navarro y N. Tiribelli, «Acondicionamiento del gas inhalado  
8] en pacientes con vía aérea artificial. Revisión narrativa.,» *Rev. Bras. Ter. Intensiva*, vol.  
30, nº 1, pp. 86-97, 2018.
- [3 L. Appels, J. Lauwers, J. Degreve, L. Helsen, B. Lievens, K. Willems, J. Van Impe y R.  
9] Dewil, «Anaerobic digestion in global energy production: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, nº 7, pp. 1787-1806, 2008.
- [4 I. Koster y G. Lettinga, «Anaerobic digestion of sewage sludge and other waste waters,»  
0] *Environmental Science & Technology*, vol. 22, nº 5, pp. 472-478, 1988.
- [4 Y. Santosh, T. Sreerishnan, S. Kohli y V. Rana, «Enhancement of biogas production from  
1] solid substrates using different pretreatment methods – A review,» *Bioresource*, vol. 95, nº  
1, pp. 1-10, 2008.
- [4 A. Mshandete y W. Parawira, «Biogas production from co-digestion of cassava and cow  
2] dung in a batch system,» *Bioresource Technology*, vol. 100, nº 2, pp. 606-610, 2009.

- 
- [4 V. Vavilin y R. Kinet, «Effect of solid content on the performance of anaerobic digestion,»  
3] *Water Research*, vol. 30, n° 10, pp. 2382-2388, 1996.
- [4 P. Weiland, «Biogas production: Current state and perspectives,» *Applied Microbiology*  
4] *and Biotechnology*, vol. 85, n° 4, pp. 849-860, 2010.
- [4 C. Miller y T. Zhang, «Characterization of the organic fraction of municipal solid waste  
5] and its implications for anaerobic digestion,» *Waste Management*, vol. 34, n° 1, pp. 86-96,  
2014.
- [4 D. Karr y K. McMahon, «Nutrient requirements and limitations for anaerobic digestion,»  
6] *Environmental Science & Technology*, vol. 40, n° 14, pp. 4695-4701, 2006.
- [4 G. Tchobanoglous y H. Stensel, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGraw-  
7] Hill Education, 2002.
- [4 D. Saredo y G. Tchobanoglous, «Optimizing the Carbon-to-Nitrogen Ratio in Anaerobic  
8] Digesters,» *Journal of Environmental Engineering*, vol. 133, n° 9, pp. 1034-1041, 2007.
- [4 M. Higgins y H. Shih, «Effect of Carbon-to-Nitrogen Ratio on Anaerobic Digestion  
9] Performance,» *Water Environment Research*, vol. 76, n° 6, pp. 555-560, 2004.
- [5 J. Mamani, F. Llumipanta, S. Ramos, J. Rea, J. Alucho, D. Saltos, F. Llanos y C. Jacome,  
0] «Sistemas de produccion de biogas: fundamento, tecnicas de mejora, ventajas y  
desventajas,» *Agroindustrial Science*, vol. 11, n° 2, pp. 239-247, 2021.
- [5 E. Reyes, «Generacin de biogas mediante el proceso de digestion anaerobia, a partir del  
1] aprovechamiento de sustratos organicos,» *Revista Cientifica de FAREM*, vol. 6, n° 24, pp.  
60-81, 2017.
- [5 D. Nuñez, «Uso de residuos agricolas para la produccion de biocombustibles en el  
2] departamento del Meta,» *Tecnura*, vol. 16, n° 34, pp. 142-156, 2012.
- [5 A. Tobon, «Evaluacion del impacto ambiental en biodigestores anaerobicos en el SENA,  
3] Regional Cesar,» *Revista RETO*, vol. 5, n° 5, pp. 39-49, 2017.
- [5 R. Soria y P. Carvajal, «Biogas: Una alternativa para la expansion de generacion electrica  
4] en el Ecuador,» *Energia*, vol. 9, n° 1, pp. 38-45, 2013.
- [5 R. Castro, M. Solis, V. Chicatto y A. Solis, «Produccion de biogas mediante codigestion  
5] de estiercol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum L.*),» *Rev. Int.*  
*Contam. Ambie.*, vol. 36, n° 3, pp. 529-539, 2020.

- 
- [5 C. Martínez, H. Mathieu y E. Marañón, «Estudio de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la producción de biogás en Cuba,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 23, n° 2, pp. 63-69, 2014.
- [5 J. Zuma, A. Camacho, J. Acaro y H. Romero, «Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos mediante su co-digestión anaerobia con cascara de banano maduro,» *Conference Proceedings UTMACH*, vol. 2, n° 1, pp. 172-178, 2018.
- [5 FAO, «Manual de Biogás,» de *Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables*, vol. 64, Santiago de Chile, Proyecto CHI/00/G32, 2011, pp. 1-119.
- [5 L. E. Leal, V. Juárez y M. Terán, «Composición química de la madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden procedente de Finca Las Maravillas, Departamento de Orán, Salta,» *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, vol. 19, n° 1,2, pp. 75-83, 2011.
- [6 D. M. Durán Hernández, *Aprovechamiento energético de la codigestión anaeróbica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y residuos de cosecha de plátano para la producción de biogás*, Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2020.
- [6 APHA-AWWA-WPCF, *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, Madrid: S. A. Editorial Díaz de Santos, Ed., 1992.
- [6 B. Arhoun, *Digestión y Codigestión Anaerobia de Residuos Agrícolas, Ganaderos y Lodo de depuradora*, Málaga: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga, 2017.
- [6 Norma Técnica Colombiana [NTC] 5167, *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*, Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2011.
- [6 J. García Galvis y M. I. Ballesteros González, «EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD PARA LA DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS,» *Revista Colombiana de Química*, vol. 34, n° 2, 2005.
- [6 J. G. Lanza, P. C. Churión y N. Gómez, «COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO KJELDAHL TRADICIONAL Y EL MÉTODO DUMAS AUTOMATIZADO ( N CUBE ) PARA LA DETERMINACIÓN DE PROTEÍNAS EN DISTINTAS CLASES DE ALIMENTOS,» *SciELO*, vol. 28, n° 2, 2016.
- [6 PanReac Applichem, «Determinación de nitrógeno por el Método Kjeldahl,» 2011. [En línea]. Available:



- 
- [https://www.itwreagents.com/download\\_file/brochures/A173/es/A173\\_es.pdf..](https://www.itwreagents.com/download_file/brochures/A173/es/A173_es.pdf..) [Último acceso: 27 Abril 2024].
- [6 L. L. Bridgewater et al, *Standard methods for the examination of water and wastewater*,  
7] *23rd edition*, Washington, DC: American Public Health Association, 2017.
- [6 M. Ramírez, E. Deago, L. Luque, N. Pitty, J. Arias y A. Chen, «Codigestión Anaeróbica  
8] de Lodos y Residuos Orgánicos Municipales en Clima Tropical,» *Revista de I+D  
Tecnológico*, vol. 20, nº 1, pp. 82-93, 2024.
- [6 I. C. Julio Guerrero, *Evaluación del potencial de Biometanización de la co-digestión de  
9] lodos provenientes del tratamiento de Aguas Residuales Municipales mezclados con  
Residuos de Alimentos.*, Medellín : Universidad de Antioquia, 2016.
- [7 X. Fonoll, S. Astals, J. Dosta y J. Mata-Álvarez, «Codigestión anaeróbica de lodos de  
0] depuradora y residuos de frutas: evaluación de los estados transitorios cuando se cambia el  
cosustrato,» *Revista de ingeniería química*, vol. 262, pp. 1268-1274, 2015.
- [7 W. Zhongzhong , H. Yuansheng , W. Shun , W. Guangxue y Z. Xinmin , «A critical review  
1] on dry anaerobic digestion of organic waste: Characteristics, operational conditions, and  
improvement strategies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 176, nº  
113208, pp. 1364-0321, 2023.
- [7 V. B. Barua, V. Rathore y A. S. Kalamdhad, «Anaerobic co-digestion of water hyacinth  
2] and banana peels with and without thermal pretreatment,» *Renewable Energy*.
- [7 R. Divyabharathi, R. Angeleswaran, K. Jagadeeshkumar y S. Pugalendhi, «Characterization  
3] and Batch Anaerobic Digestion Study of Banana Wastes,» *International Journal of  
Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 6, nº 7, pp. 2307-2315, 2017.
- [7 D. Kerubo Oyaró, Z. Isaboke Oonge y P. Meshack Odira, «Anaerobic Digestion of Banana  
4] Wastes for Biogas Production,» *Journal of Civil & Environmental Engineering*, vol. 10, nº  
3, p. 5, 2020.
- [7 D. Kerubo Oyaró, Z. Isaboke Oonge y P. Meshack Odira, «Anaerobic Digestion of Banana  
5] Wastes for Biogas Production,» *Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 10,  
nº 3, pp. 1-5, 2020.
- [7 E. Ponce, «Metodos sencillos en obtencion de biogas rural y su conversion en electricidad,»  
6] *IDESIA*, vol. 34, nº 5, pp. 75-79, 2016.
- [7 W. Cortes y C. Guerrero, «Oxidacion catalitica selectiva para la conversion de metano a  
7] metanol: Una revision,» *Ciencia e Ingenieria Neogranadina*, vol. 28, nº 1, pp. 45-71, 2017.

- 
- [7 D. Nuñez, «Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el  
8] departamento del Meta,» *Tecnura*, vol. 16, n° 34, pp. 142-156, 2012.
- [7 N. J. Bone Lemos y C. I. López Villalta, *EVALUACIÓN DE RESIDUOS  
9] AGROINDUSTRIALES DE LA EMPRESA PROCESADORA DE FRUTAS PROFRUTAS  
CIA LTDA PARA SU APROVECHAMIENTO INTEGRAL.*, Guayaquil : Universidad de  
Guayaquil, 2021.
- [8 D. M. Durán Hernández , *Aprovechamiento energético de la codigestión anaeróbica de la  
0] fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y residuos de cosecha de plátano para la  
producción de biogás*, Bogotá : Universidad Nacional de Colombia, 2020.
- [8 M. A. Sarabia Méndez, J. R. Laines Canepa, J. A. Sosa Olivier y E. Escalante Espinosa ,  
1] «PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE  
EXCRETAS DE BORREGO Y RUMEN ADICIONADAS CON LODOS  
PROCEDENTES DE UNA PLANTADE AGUAS RESIDUALES,» *Revista Internacional  
de Contaminación Ambiental*, vol. 33, n° 1, pp. 109-116, 2017.
- [8 Secretaría de desarrollo urbano y ecología, departamento del distrito federal. Norma NMX-  
2] AA-21., *Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos  
municipales.*, México , 1985.
- [8 C. Gámez-Ávila, M. Lozano-Triana, C. A. Cervera-González y J. A. Quintero-Jaramillo,  
3] «Producción de biogás a partir de procesos de digestión y codigestión anaerobia usando  
estiércol de cerdo y residuos vegetales,» *Red de Biodigestores para Latinoamérica y el  
Caribe*, vol. 6, n° 1, pp. 34-39, 2022.
- [8 P. Dhull, R. Kumar Lohchab, . S. Kumar, M. Kumari y S. &. A. Kumar Bhankhar ,  
4] «Anaerobic Digestion: Advance Techniques for Enhanced Biomethane/Biogas Production  
as a Source of Renewable Energy,» *Bioenergy Research*, vol. 17, pp. 1228-1249, 2024.
- [8 B. A. Quilumba Chorlango , *Evaluación de la producción de biogas al mezclar estiércol  
5] vacuno con residuos orgánicos urbanos de Pedro Moncayo Mediante Digestión  
Anaerobia*, Ibarra: Universidad Técnica del Norte , 2021.
- [8 P. Shiyou, C. Wen, Q. Lui, Y. Chi, H. Mi, Z. Li, L. Du, R. Huang y Y. Wei, «A novel  
6] hydraulic biogas digester controlling the scum formation in batch and semi-continuous  
tests using banana stems,» *Bioresource Technology*, vol. 286, n° 1, p. 121372, 2019.
- [8 P. Nipon, B. Siriorn y S. Haosagul, «Feasibility of Biomethane Production from Banana  
7] Peel,» *Energy Procedia*, vol. 50, n° 1, pp. 782-788, 2014.

