



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**APROVECHAMIENTO DE LA CÁSCARA DE BANANO PARA LA  
OBTENCIÓN DE BIOGÁS: UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICAMENTE  
SOSTENIBLE PARA EL AMBIENTE**

**JIMENEZ ROMERO JAHIR HUGO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MASACHE BRAVO JORGE ORLANDO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**APROVECHAMIENTO DE LA CÁSCARA DE BANANO PARA  
LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS: UNA ALTERNATIVA  
ENERGÉTICAMENTE SOSTENIBLE PARA EL AMBIENTE**

**JIMENEZ ROMERO JAHIR HUGO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MASACHE BRAVO JORGE ORLANDO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**

**APROVECHAMIENTO DE LA CÁSCARA DE BANANO PARA  
LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS: UNA ALTERNATIVA  
ENERGÉTICAMENTE SOSTENIBLE PARA EL AMBIENTE**

**JIMENEZ ROMERO JAHIR HUGO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MASACHE BRAVO JORGE ORLANDO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MAZA MAZA JAIME ENRIQUE**

**MACHALA  
2024**

# APROVECHAMIENTO DE LA CÁSCARA DE BANANO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS: UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICAMENTE SOSTENIBLE PARA EL AMBIENTE

*por* Jorge Masache Bravo

---

**Fecha de entrega:** 05-ago-2024 06:21p.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2427877485

**Nombre del archivo:** TESIS\_FINAL\_IEEE\_UTMACH.docx (7.11M)

**Total de palabras:** 12107

**Total de caracteres:** 64554

# APROVECHAMIENTO DE LA CÁSCARA DE BANANO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS: UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICAMENTE SOSTENIBLE PARA EL AMBIENTE

## INFORME DE ORIGINALIDAD

2%

INDICE DE SIMILITUD

%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

- 1 Yilda Aranza López Pérez. "Uso potencial de la especie vegetal *Eichhornia crassipes* del humedal artificial de la planta piloto Arturo Pazos", *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 2023  
Publicación <1%
- 2 Jesús Águila León. "Modelo y desarrollo de un sistema de gestión óptima para una microrred empleando algoritmos bio-inspirados", *Universitat Politecnica de Valencia*, 2023  
Publicación <1%
- 4 Héctor Moreno Solaz. "Análisis y mejora del sistema integral de gestión de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Castellón de la Plana respondiendo a demandas de sostenibilidad y circularidad", *Universitat Politecnica de Valencia*, 2023 <1%

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

Los que suscriben, JIMENEZ ROMERO JAHIR HUGO y MASACHE BRAVO JORGE ORLANDO, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado APROVECHAMIENTO DE LA CÁSCARA DE BANANO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS: UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICAMENTE SOSTENIBLE PARA EL AMBIENTE, 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.

Los autores 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.

Los autores 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.



JIMENEZ ROMERO JAHIR HUGO

0706195476



MASACHE BRAVO JORGE ORLANDO

0750532277

## DEDICATORIA

Con profunda emoción y sincero agradecimiento, dedico este trabajo de titulación a mi querida madre Mercy Margarita Bravo Balcázar, quien con su amor, paciencia y sacrificio me ha brindado el apoyo incondicional necesario para alcanzar este logro. A ella, que siempre ha creído en mí y me ha dado la fortaleza para seguir adelante, le agradezco de todo corazón. A mi hermana, Dayanna Rodríguez, que, a pesar de su humor particular, siempre ha estado ahí para mí, brindándome su apoyo incondicional en los momentos más difíciles. A mi tía, Marlene Bravo, aunque la distancia nos separa, tu presencia se ha hecho sentir con fuerza en mi vida. Tus palabras de aliento y tu apoyo constante han sido un motor que me ha impulsado a seguir adelante. A mi tío Aníbal Masache, un pilar fundamental en mi vida, siempre ha estado ahí para apoyarme en cada proyecto y trabajo, brindándome tu guía, tus valiosos consejos y tu infinita paciencia. A mi primo Darling Pacheco, más que un primo, un hermano, un amigo y un confidente. Gracias por tus sabios consejos, por tu apoyo incondicional y por estar siempre presente en mi vida.

Finalmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis queridos amigos. A Mayeli F., por su apoyo incondicional en cada paso que he dado, a Paula C. con quien he compartido un camino académico lleno de aprendizajes y emociones. Juntos hemos forjado una amistad inquebrantable, superando juntos los obstáculos y celebrando cada triunfo. Me siento profundamente afortunado de contar con su amistad en este momento tan especial.

**Jorge Orlando Masache Bravo**

Ante todo, quiero iniciar dándole las gracias a Dios por darme la sabiduría y ser la guía en todos mis pasos durante todo este ciclo académico.

La culminación de esta tesis no hubiera sido posible sin el apoyo y la colaboración de muchas personas a lo largo de este arduo pero gratificante camino. A todas ellas, mi más sincero agradecimiento.

Primero, quiero expresar mi profunda gratitud a mi familia, por ser mi pilar fundamental. A mis padres, Marcelo Aparicio Jiménez Asanza y María Marlene Romero Robles, por su amor incondicional y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis hermanos, Cristhian, Joel y Joan, por su comprensión y apoyo inquebrantable durante todo este proceso. Sin ustedes, este logro no hubiera sido posible.

A mis compañeros y amigos, especialmente a Lidia Belén Méndez Cevallos por su apoyo incondicional, durante el camino académico. Su compañía y sus palabras de aliento han sido una fuente de fortaleza y motivación constante.

Este logro es el resultado del esfuerzo colectivo de muchas personas, y a todos ustedes, les dedico esta tesis con profunda gratitud y aprecio.

**Jahir Hugo Jiménez Romero**

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis, especialmente a nuestros padres que siempre han estado ahí para apoyarnos en todo momento. Agradezco también a nuestros hermanos, tíos, tías, abuelos y demás familiares por su cariño, sus palabras de aliento y por estar siempre presentes en los momentos más importantes de nuestra vida.

A su vez agradecer a nuestro tutor Ing. Jaime Enrique Maza Maza, y cotutor Dr. Hugo Romero Bonilla. Mis más sinceras gracias por su invaluable guía, consejos y paciencia durante todo el proceso de investigación. Su experiencia, conocimientos y pasión por el tema han sido fundamentales para el desarrollo de esta tesis. Agradezco profundamente su dedicación, su confianza y por habernos impulsado a dar lo mejor de nosotros en cada etapa del proyecto.

A mis compañeros de estudio y amigos, gracias por su apoyo constante, sus palabras de aliento y por compartir conmigo momentos de estrés y de alegría.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que contribuyeron con su tiempo, información y colaboración para la recopilación de datos necesarios para esta investigación. Su disposición y ayuda fueron cruciales para la culminación exitosa de este trabajo.

**Jorge Orlando Masache Bravo y Jahir Hugo Jiménez Romero**

## RESUMEN

La producción de biogás mediante la digestión anaeróbica de residuos agroindustriales proporciona una alternativa de energía renovable respetuosa con el medio ambiente. Por consiguiente, el presente trabajo investigativo se basó en el aprovechamiento de la cáscara de banano mediante su codigestión anaerobia con estiércol porcino para la obtención de biogás. Se determinaron características físicas y químicas de los sustratos como la humedad, ST, SV, pH, carbono orgánico, nitrógeno total y relación C/N, y se realizaron monitoreos diariamente por un tiempo de 15 días. Seguidamente, se construyeron 5 reactores con botellas de polietileno de un volumen de 1 litro de capacidad. Cada reactor tuvo diferentes proporciones de sustratos (T1= 90% CB + 10% EP, T2= 70% CB + 30% EP, T3 = 50% CB + 50% EP, T4= 30% CB + 70% EP, T5= 10% CB + 90% EP). Los resultados del volumen del biogás fueron determinados mediante bolsas de propileno, mientras para la concentración de  $\text{NH}_3$  se utilizó un sensor de gas MQ-135, obteniendo los siguientes resultados: T1 ( $V_{\text{biogás}} = 2058$  ml;  $\text{NH}_3 = 171,86$  ppm), T2 ( $V_{\text{biogás}} = 2350$  ml;  $\text{NH}_3 = 3913,97$  ppm), T3 ( $V_{\text{biogás}} = 2150$  ml;  $\text{NH}_3 = 5653,95$  ppm), T4 ( $V_{\text{biogás}} = 3235$  ml;  $\text{NH}_3 = 2772,11$  ppm), T5 ( $V_{\text{biogás}} = 1641$  ml;  $\text{NH}_3 = 4101,42$  ppm). Finalmente, se concluye que se logró aprovechar los residuos agroindustriales al haber obtenido una máxima producción de biogás en el T4 de 3235 ml, con la más alta concentración total de  $\text{NH}_3$  en el T3 de 5653,95 ppm.

***Palabras clave*** — Biogás, Codigestión anaerobia, Residuos agroindustriales, Amoniac (NH<sub>3</sub>)

## ABSTRACT

Anaerobic digestion of agro-industrial waste offers an environmentally friendly renewable energy alternative. Therefore, this research focused on utilizing banana peel through its anaerobic co-digestion with pig manure for biogas production. The physical and chemical characteristics of the substrates, such as moisture, total solids, volatile solids, pH, organic carbon, total nitrogen, and C/N ratio, were determined. Daily monitoring was carried out for 15 days. Subsequently, five reactors were constructed using 1-liter polyethylene bottles. Each reactor had different substrate ratios (T1= 90% CB + 10% EP, T2= 70% CB + 30% EP, T3 = 50% CB + 50% EP, T4= 30% CB + 70% EP, T5= 10% CB + 90% EP). Biogas volume was determined using polypropylene bags, while NH<sub>3</sub> concentration was measured using an MQ-135 gas sensor. The results were as follows: T1 ( $V_{\text{biogas}} = 2058$  ml;  $\text{NH}_3 = 171.86$  ppm), T2 ( $V_{\text{biogas}} = 2350$  ml;  $\text{NH}_3 = 3913.97$  ppm), T3 ( $V_{\text{biogás}} = 2150$  ml;  $\text{NH}_3 = 5653.95$  ppm), T4 ( $V_{\text{biogás}} = 3235$  ml;  $\text{NH}_3 = 2772.11$  ppm), T5 ( $V_{\text{biogás}} = 1641$  ml;  $\text{NH}_3 = 4101.42$  ppm). Finally, it is concluded that agro-industrial waste was successfully utilized, achieving a maximum biogas production of 3235 ml in T4, with the highest total NH<sub>3</sub> concentration of 5653.95 ppm in T3.

**Keywords** — Biogas, Anaerobic co-digestion, Agro-industrial waste, Ammonia (NH<sub>3</sub>)

## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	1
AGRADECIMIENTOS .....	3
RESUMEN .....	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE TABLAS .....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE ANEXOS.....	11
SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.....	12
I. INTRODUCCIÓN.....	13
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
A. Antecedentes .....	16
III. JUSTIFICACIÓN .....	18
IV. OBJETIVOS .....	20
A. Objetivo general.....	20
B. Objetivos específicos .....	20
V. HIPÓTESIS.....	21
VI. MARCO TEÓRICO .....	22
A. Producción de energías sostenibles en Ecuador.....	22
1. Tipos de energías sostenible Ecuador .....	22
B. Producción bananera en Ecuador.....	23
1. Tipos de residuos agroindustriales generados en la actividad bananera .....	23
2. Impactos ambientales producidos por residuos de la industria bananera.....	24
3. Cáscara de banano.....	24
4. Aprovechamiento de cáscara de banano como biomasa lignocelulósica .....	24

C.	Medidas regulatorias para el manejo de residuos .....	25
D.	Digestión anaerobia .....	25
1.	Fases de la digestión anaerobia .....	26
2.	Materias primas comunes para la digestión anaeróbica. ....	28
E.	Estiércol .....	29
1.	Contaminación por estiércol Porcino .....	29
F.	Codigestión de bioma lignocelulosa y estiércol animal.....	29
G.	Biogás .....	30
1.	Factores que afectan a la generación de biogás durante el proceso de la digestión anaerobia.....	30
2.	Ventajas y desventajas del biogás .....	33
3.	Amoniaco .....	34
H.	Biodigestor.....	35
1.	Clasificación de los biodigestores.....	35
I.	Sensores detectores de gases.....	36
VII.	METODOLOGÍA .....	37
A.	Enfoque de la investigación .....	37
1.	Investigación exploratoria.....	37
2.	Investigación descriptiva.....	37
3.	Investigación experimental .....	37
B.	Ubicación de la investigación .....	37
C.	Materiales.....	38
D.	Proceso metodológico para la obtención de biogás .....	39
E.	Recolección y preparación de los sustratos .....	39
F.	Determinación de parámetros físicos y químicos .....	41

1. Parámetros físicos .....	41
2. Parámetros químicos .....	43
G. Preparación de los biodigestores.....	45
H. Composición de los biodigestores .....	45
I. Monitoreo del volumen del biogás .....	47
J. Análisis de la composición del biogás .....	47
K. Análisis estadístico de los resultados.....	48
VIII RESULTADOS.....	49
A. Caracterización física y química de la cáscara de banano y estiércol porcino. ....	49
B. Producción de biogás en los diferentes reactores .....	50
C. Concentración de NH <sub>3</sub> del biogás producido en los diferentes reactores. ....	52
IX. DISCUSIÓN.....	55
X. CONCLUSIONES .....	59
XI. RECOMENDACIONES.....	60
REFERENCIAS.....	61
ANEXOS .....	72

## LISTA DE TABLAS

TABLA I. MARCO REGULATORIO PARA EL MANEJO DE RESIDUOS .....	25
TABLA II. TIPOS DE MATERIAS PRIMAS COMUNES PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA. ....	28
TABLA III. RECURSOS MATERIALES .....	38
TABLA IV. COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA DE LOS REACTORES .....	46
TABLA V. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS SUSTRATOS DE CÁSCARA DE BANANO Y ESTIÉRCOL PORCINO. ....	49
TABLA VI. PRODUCCIÓN DIARIA Y TOTAL DE BIOGÁS POR 15 DÍAS.....	50
TABLA VII. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) DEL VOLUMEN DEL BIOGÁS.....	51
TABLA VIII. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS DEL VOLUMEN DEL BIOGÁS.....	52
TABLA IX. CONCENTRACIÓN DIARIA Y TOTAL DE NH <sub>3</sub> POR 15 DÍAS. ....	52
TABLA X. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) DE LA CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> .....	53
TABLA XI. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS DE LA CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> .....	54

## LISTA DE FIGURAS

FIG. 1. ESQUEMA DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	26
FIG. 2. MAPA DE UBICACIÓN DEL LABORATORIO DE APLICACIONES DE ELECTROQUÍMICA Y BIOENERGÍA.....	38
FIG. 3. DIAGRAMA METODOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS.....	39
FIG. 4. MAPA DE UBICACIÓN DEL SITIO DE RECOLECCIÓN DEL ESTIÉRCOL PORCINO.....	40
FIG. 5. MAPA DE UBICADO DE LA EMPRESA DIANA-FOOD S.A.....	41
FIG. 6. ENSAMBLAJE DE LOS REACTORES.....	45
FIG. 7. REACTORES SON SUS DIFERENTES PROPORCIONES DE SUSTRATOS. ....	47
FIG. 8. EQUIPOS DE LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS DEL BIOGÁS.....	48
FIG. 9. TENDENCIA DE PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOGÁS POR 15 DÍAS DE CODIGESTIÓN Y POR TRATAMIENTOS.....	51
FIG. 10. TENDENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DIARIA DE NH <sub>3</sub> DURANTE 15 DÍAS.	53
FIG. 11. TENDENCIAS DEL VOLUMEN TOTAL DE BIOGÁS Y CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> DE LOS DIFERENTES REACTORES. ....	57

## LISTA DE ANEXOS

<i>ANEXO A. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS.....</i>	<i>72</i>
<i>ANEXO B. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CARBONO ORGÁNICO Y NITRÓGENO TOTAL DE LOS SUSTRATOS EN EL LABORATORIO NEMALAB.....</i>	<i>72</i>
<i>ANEXO C. CONSTRUCCIÓN DE LOS REACTORES CON BOTELLAS DE POLIETILENO RECICLADAS DE UN 1 LITRO DE CAPACIDAD. ....</i>	<i>73</i>
<i>ANEXO D. PREPARACIÓN DE LOS SUSTRATOS PARA LOS REACTORES.....</i>	<i>73</i>
<i>ANEXO E. PESO DE LAS PROPORCIONES DE LOS SUSTRATOS .....</i>	<i>73</i>
<i>ANEXO F. PREPARACIÓN DE LOS REACTORES CON LOS SUSTRATOS.....</i>	<i>74</i>
<i>ANEXO G. REACTORES SON SUS DIFERENTES PROPORCIONES DE SUSTRATOS .....</i>	<i>74</i>
<i>ANEXO H. MONITOREO DEL VOLUMEN DEL BIOGÁS CON BOLSAS DE PROPILENO ESTERILIZADAS DE 500 ML. ....</i>	<i>75</i>
<i>ANEXO I. ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS UTILIZANDO UN SENSOR DE GAS MQ-135 Y EL SOFTWARE ARDUINO IDE 2.3.2. ....</i>	<i>76</i>

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>DA</b>	Digestión anaerobia
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>NH<sub>3</sub></b>	Amoniaco
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Sulfuro de hidrógeno
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxígeno
<b>AGV</b>	Ácidos grasos volátiles
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrogeno
<b>ST</b>	Sólidos totales
<b>SV</b>	Sólidos volátiles
<b>PT</b>	Paja de trigo
<b>EC</b>	Estiércol de cabra
<b>EV</b>	Estiércol de vaca
<b>RV</b>	Residuos de frutas y vegetales
<b>CB</b>	Cáscara de banano
<b>EP</b>	Estiércol porcino
<b>C/N</b>	Carbono/Nitrógeno

## I. INTRODUCCIÓN

La accesibilidad a la energía y la gestión inadecuada de los residuos son algunos de los principales desafíos que enfrentan los países en desarrollo. La demanda de energía supera el suministro de energía existente debido al desarrollo económico y al continuo aumento de la población a nivel mundial [1]. Los recursos energéticos utilizados habitualmente, como el gas, petróleo y carbón, están en constante decrecimiento y son los causantes de más del 75% de los GEI emitidos mundialmente a la atmosfera contribuyendo al cambio climático [2]. Por lo que en la actualidad muchos países se han desplazado hacia la búsqueda e implementación de alternativas eficientes y ecológicas, como los recursos renovables, como una de las soluciones a las fuentes de energía convencionales, y a la vez una estrategia para reducir los efectos del cambio climático [1].

En Ecuador, el sector agroindustrial ha sido uno de los mayores generadores de residuos orgánicos, ya sean vegetales o animales, considerados un material energético renovable. Este tipo de residuos al no ser gestionados adecuadamente ocasionan problemas a la salud humana y daños ambientales a los recursos suelo, agua y aire. Para abordar esta problemática, se ha comenzado a implementar tecnologías apropiadas como la digestión anaeróbica, un proceso biológico que permite el tratamiento y aprovechamiento de estos residuos orgánicos. Esta alternativa sostenible genera biogás, una fuente de energía limpia y renovable [3].

La industria bananera en la provincia de El Oro se caracteriza por su intensa actividad productiva en el sector bananero, produciendo anualmente 1144087 toneladas métricas de banano [4], provocando una generación anual de 388 704 toneladas métricas de biomasa residual, que son desechados al ambiente sin ningún tratamiento previo, entre estos residuos encontramos la cáscara de banano, el fruto y el raquis [5]. Bajo este contexto, la presente investigación tiene como finalidad el aprovechamiento de la cáscara de banano mediante proceso de codigestión anaerobia con estiércol porcino para la obtención de biogás, como una alternativa energéticamente sostenible para el medio ambiente.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los residuos orgánicos son una problemática global que está generando severos impactos negativos en la salud humana, medio ambiente y en la economía. Según el informe sobre la gestión de los residuos sólidos del Banco Mundial [6], revela que la sociedad produce anualmente alrededor de 2010 millones de toneladas métricas de residuos sólidos, de los cuales 1005 millones corresponden a residuos orgánicos [7] [8]. En cambio, Rodríguez y Baca [9], mencionan que solo en Ecuador se generan aproximadamente 375 toneladas métricas de residuos sólidos, siendo el 57% de origen orgánico, mientras que el restante 43% son inorgánicos. Se estima que solo el 4% del total de los residuos se recicla, mientras que el 96% restante se elimina inadecuadamente o son enterrados en los rellenos sanitarios, lo que representa un problema ambiental, como la liberación de malos olores y contribuyen a que roedores e insectos se multipliquen y propaguen enfermedades [10].

La descomposición de materia orgánica presente en los residuos es un proceso natural que libera una variedad de gases a la atmósfera. Según Sayara y Sánchez [11], los gases que se liberan se componen de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y vapor de agua. Algunos de estos gases son de efecto invernadero que tienen un impacto significativo en el ambiente, contribuyendo al calentamiento global, un fenómeno que está provocando el cambio climático y otros problemas ambientales.

En Ecuador, la producción agrícola bananera es una de las principales generadoras de residuos agroindustriales, solo en la provincia de El Oro se producen alrededor de 198602 toneladas métricas anuales de desechos lignocelulósicos, siendo la cáscara de banano uno de los residuos más abundante [12][5]. Esta cáscara al no ser tratada y gestionada de manera adecuada podría causar una serie de problemas ambientales por la descomposición en su intemperie, generando afectaciones a los recursos agua, suelo, aire, proliferando enfermedades por vectores y la acumulación de basura en el aspecto social, fenómenos que se presentan con mayor frecuencia en ciertas zonas del país, como en la ciudad de Machala en la provincia del El Oro [13].

Dentro de la Provincia de El Oro, el cultivo de banano ha experimentado un significativo aumento en sus extensiones, lo que ha llevado a que más del 45% de todas las fincas de banano en Ecuador se ubiquen en esta provincia. Este incremento en la producción de banano ha suscitado preocupaciones sobre los impactos ambientales, especialmente en términos de contaminación, siendo la provincia de El Oro una de las más afectadas en el país. Aunque representa entre el 2% y el 5% de la superficie laboral agrícola, la provincia se caracteriza por su predominio en el cultivo

de banano. Además, se posiciona como la segunda provincia con mayor producción de banano a nivel nacional, alcanzando un 24,8 %, siendo superada solo por la provincia de Los Ríos, con un 32,4% [14].

Otra de las actividades con mayor presencia es la producción porcícola, especialmente en la parte alta de la provincia del Oro. El estiércol de ganado porcino genera grandes cantidades de desechos, con un consumo considerable de energía y un impacto ambiental negativo, estos residuos son aprovechables, y hay métodos disponibles para convertir este residuo agroindustrial en productos útiles, lo que ayuda a reducir el impacto ambiental. Los procesos anaeróbicos son especialmente prometedores en este sentido, ya que producen biogás como producto final.

El biogás producido mediante un proceso anaeróbico puede derivarse de desechos o residuos de producción. Este recurso puede utilizarse para generar energía limpia, sustituyendo el uso de combustibles fósiles. Se plantea aprovechar la codigestión anaeróbica de residuos de banano y estiércol de ganado porcino con el fin de obtener biogás. Esto no solo presenta los beneficios mencionados, sino que también contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que hace que el proceso sea económicamente viable y beneficioso para el medio ambiente [15].

### *A. Antecedentes*

En las últimas décadas, los residuos generados de la producción de banano representan un desafío significativo, debido a su volumen y composición química. Si bien la cáscara de banano tiene un alto contenido de materia orgánica y nutrientes, su gestión inadecuada puede provocar alteraciones negativas a los recursos suelo, agua y aire. Con respecto al recurso aire podría generarse altas emisiones de gases de efecto invernadero, así como también, proliferaciones de plagas y enfermedades que pueden repercutir en la población y en sus demás producciones de cultivo.

Al mismo tiempo, el estiércol de ganado porcino, otro subproducto común en la agricultura presenta desafíos similares en términos de manejo y tratamiento adecuado. Si no se gestionan correctamente, los desechos animales pueden contribuir a la contaminación del agua subterránea y superficial, así como a la emisión de gases nocivos como el metano y el amoníaco, a través de la Dirección de Estadísticas Agropecuarias y Ambientales y la Unidad de Estadísticas Agropecuarias, el Instituto Nacional de Estadística y Censos ha publicado datos que revelan la existencia de 1115473 cabezas de ganado porcino a nivel nacional [16].

Actualmente el país cuenta con un gran número de granjas que no poseen instalaciones adecuadas para el manejo y tratamiento de sus desechos. Cabe destacar que una administración no adecuada de estos desechos es un problema que tiene consecuencias muy importantes en la preservación y cuidado del medio ambiente [17].

La valorización de los residuos agroindustriales a través de la codigestión anaerobia ha surgido como una alternativa prometedora para mitigar estos problemas. Esta alternativa implica la fermentación de materia orgánica en ausencia de oxígeno para producir biogás, un combustible renovable compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono. Este proceso no solo permite la gestión sostenible de los residuos, sino que también genera beneficios adicionales, como la producción de fertilizantes orgánicos (digestato) y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero [18].

Varios estudios han explorado el potencial de la codigestión anaerobia como una estrategia para valorizar la cáscara de banano y el estiércol de ganado porcino de manera conjunta. Estas investigaciones han demostrado que la combinación de estos sustratos puede mejorar la eficiencia de la producción de biogás y reducir los costos operativos en comparación con la digestión de cada sustrato por separado. Sin embargo, aún existen desafíos importantes relacionados con la

optimización de las condiciones de operación, la selección de las proporciones adecuadas de sustratos y la gestión adecuada del digestato [19].

Por lo tanto, surge la necesidad de investigaciones adicionales para comprender mejor los mecanismos involucrados en el proceso de codigestión anaerobia de cáscara de banano y estiércol de ganado porcino, así como para evaluar su viabilidad técnica, económica y ambiental a largo plazo.

### III. JUSTIFICACIÓN

El aprovechamiento de la cáscara de banano para la obtención de biogás ofrece una alternativa energética innovadora y sostenible. Esta investigación abordará la gestión de residuos agrícolas y promoverá la transición hacia fuentes de energía renovable. Esta iniciativa contribuye al Objetivo de Desarrollo Sostenible número 7 y 13 de las Naciones Unidas, que busca garantizar el acceso a una energía sostenible para todos y adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático, Al centrarse en una fuente de energía renovable derivada de un residuo agroindustrial común, promueve prácticas sostenibles para mitigar los impactos ambientales negativos asociados con la gestión inadecuada de residuos [20].

La valorización de residuos agroindustriales se ha vuelto un aspecto crucial en la búsqueda de soluciones sostenibles para los desafíos ambientales, la cáscara de banano emerge como un residuo abundantemente disponible y desaprovechado en la industria agroindustrial. Al ser un subproducto común en la producción bananera, posee un potencial significativo para la generación de biogás, abordando así la problemática de la gestión de residuos y contribuyendo a la producción de energía renovable mediante la obtención de gases como  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{NH}_3$  [21].

En la actualidad existe poca información con respecto a la obtención del gas amoniacado a través de los residuos de cáscara de banano, al igual que su interacción con otros tipos de residuos de tipo animal. La codigestión anaerobia con residuos sólidos porcícolas no solo diversifica la materia prima para la producción de biogás, sino que también presenta sinergias beneficiosas entre diferentes tipos de residuos, mejorando así la eficiencia del proceso [22].

Para mejorar la producción de biogás usando cáscara de banano se necesita de un pretratamiento que implique la incorporación de inoculantes u otros métodos para ajustar el pH a un nivel neutro. Además, se puede mejorar el estiércol de cerdo mediante la trituración adecuada de partículas para una recolección más seca y una dilución apropiada con agua. El estudio reveló que la combinación de estiércol de cerdo y cáscara de banano produjo una mejora significativa en la producción de biogás en comparación con su rendimiento individual [23].

Reducir el impacto ambiental es un objetivo crucial en el desarrollo de nuevas tecnologías y prácticas. Al aprovechar la cáscara de banano y los residuos sólidos porcícolas para la producción de biogás, se logra una doble ventaja: se evita la acumulación de residuos agroindustriales y se reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables. Este enfoque no solo contribuye a la

mitigación del cambio climático, sino que también promueve la economía circular al cerrar el ciclo de vida de los residuos.

Lo que se propone no solo es establecer un proceso eficiente, sino también uno sostenible a largo plazo. La optimización del proceso de codigestión anaerobia no solo maximizará la producción de biogás, sino que también minimizará los impactos negativos en términos de consumo de recursos y emisiones asociadas.

#### IV. OBJETIVOS

##### *A. Objetivo general*

Valorizar los residuos agroindustriales de cáscara de banano mediante su codigestión anaerobia con estiércol porcino para la obtención de biogás, como alternativa energéticamente sostenible para el medio ambiente.

##### *B. Objetivos específicos*

- Caracterización física y química los residuos de la cáscara de banano y estiércol porcino.
- Determinar la producción de biogás empleando diferentes proporciones de cáscara de banano en codigestión con estiércol porcino en biodigestores.
- Cuantificar la concentración de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) del biogás producido en función a las diferentes proporciones propuestas.

## V. HIPÓTESIS

El proceso de la codigestión anaeróbica con diferentes proporciones de cáscara de banano y estiércol porcino permitirá generar biogás con concentraciones de Amoniaco ( $\text{NH}_3$ ).

## VI. MARCO TEÓRICO

### *A. Producción de energías sostenibles en Ecuador*

La energía sostenible brota de fuentes naturales que, por su propia naturaleza, son inagotables o se renuevan a un ritmo acelerado. Estas fuentes incluyen la energía hidroeléctrica, geotérmica, solar, eólica, geotérmica y biomasa [24].

Una de las principales razones detrás del deterioro ambiental es el consumo descontrolado de combustibles fósiles y el crecimiento continuo de la población. La capacidad de la Tierra para absorber nuestro impacto ambiental está al borde del colapso., lo que indica que se necesitaría el equivalente a 1.5 veces la superficie terrestre para satisfacer la demanda de recursos naturales consumidos anualmente [24].

Esta situación ha impulsado la búsqueda activa de recursos naturales renovables para combatir el cambio climático y garantizar la seguridad alimentaria de manera sostenible. Entre ellos, la biomasa se destaca como la cuarta fuente de energía más importante a nivel global, solo por detrás del petróleo, el carbón y el gas natural [25].

Los beneficios de las fuentes de energía sostenible constituyen una herramienta fundamental para disminuir drásticamente las emisiones de GEI, especialmente el CO<sub>2</sub>. Además, también ayudan a disminuir la dependencia de fuentes energéticas que necesitan ser importadas de otros países, como los derivados del petróleo. Las energías renovables, como la solar, hidroeléctrica o eólica, son accesibles para todos los países y pueden ser utilizadas de manera sostenible [26].

Más allá de los beneficios climáticos, las fuentes de energía renovable impulsan vigorosamente la economía local. La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) calcula que cada dólar invertido en la transición energética genera un retorno de entre \$2 y \$5. En otras palabras, si se invierten \$30 mil millones adicionales para limitar el aumento de la temperatura global a 1.5°C, se recuperarían entre \$61 y \$164 mil millones para el año 2050. Esta inversión no solo mitiga el cambio climático, sino que también genera un retorno económico significativo [27].

#### *1. Tipos de energías sostenible Ecuador*

Ecuador, con su rico patrimonio en recursos energéticos, posee un vasto potencial en energías renovables. Entre ellas, la energía solar, obtenida a través de paneles fotovoltaicos, destaca por su utilización en diversos sectores como el industrial, residencial y comercial, La

energía eólica, aprovechando la fuerza del viento, energía hidráulica derivada del movimiento del agua, y la biomasa empleando materia orgánica. Estas fuentes de energía renovable son fundamentales en la variación de la matriz energética ecuatoriana, promoviendo la sostenibilidad y la mitigación del impacto ambiental [28].

La dependencia actual de la energía hidroeléctrica en Ecuador exige acciones urgentes para diversificar las fuentes energéticas y aumentar la capacidad de generación, considerando el crecimiento constante de la demanda eléctrica. El país experimenta un aumento anual en la demanda eléctrica de aproximadamente 200 MW, lo que implica la incorporación de 250 MW a 300 MW de nueva capacidad de generación de energía [29].

### ***B. Producción bananera en Ecuador***

El banano es considerado como uno de los alimentos más importante del planeta, en el que Ecuador se destaca como el principal exportador a nivel mundial cubriendo el 29.89% del mercado internacional [30]. Según Agrocalidad [4], la exportación de banano representa el 2,75% al PIB general y el 36,25% del PIB agrícola, exportando alrededor de 4.558.116 millones de toneladas métricas, obteniendo ingresos de \$2.454 millones de dólares.

En Ecuador existen alrededor de 172.653 ha de cultivos de banano, de los cuales 15.622 ha son cultivos orgánicos. Entre las principales provincias que producen banano son Los Ríos que representa el 37%, Guayas que representa el 28%, El Oro que representa el 25.1%, y las demás provincias como Cañar, Santo Domingo, Cotopaxi, Esmeraldas y Santa Elena entre todas representan el 9.9% [4]. La mayor parte de las organizaciones productoras de banano en Ecuador se establecen por pequeños y medianos productores, en el cual el 78% representan a empresas pequeñas y sumando a los medianos productores representarían el 95.5 [30].

La exportación de banano ha jugado un papel importante en el desarrollo económico del Ecuador, posicionándose como uno de los principales rubros de exportación, solo superado por el camarón, cacao y café. Esto ha generado un impacto socioeconómico significativo en el país, impulsando el desarrollo de las comunidades dedicadas a esta actividad [30].

#### ***1. Tipos de residuos agroindustriales generados en la actividad bananera***

La actividad agrícola, y en particular el cultivo del banano, generan una cantidad significativa de residuos a lo largo de su ciclo productivo, desde el mantenimiento de las plantaciones hasta la cosecha. Entre los residuos más comunes se encuentran el raquis, el fruto y la cáscara. Afortunadamente, estos residuos no son solo un desecho, dado que poseen un gran

potencial para ser reutilizados y valorizados de diversas maneras, como alimento para el ganado, materia orgánica para aportar nutrientes al suelo en las actividades agrícolas y como biomasa lignocelulósica para generar bioenergía [31].

### *2. Impactos ambientales producidos por residuos de la industria bananera*

Según Mejía y Gómez [32], las plantaciones de plátano han ocasionado una serie de impactos ambientales en los diferentes elementos ambientales (agua, suelo y biodiversidad). La expansión de las plantaciones da como resultado la deforestación de áreas de vegetación natural. Además, los monocultivos destinados a la exportación, ha incrementado el uso de fertilizantes y agroquímicos para aumentar la productividad, como de pesticidas para combatir plagas y enfermedades. Estos productos químicos junto con una inadecuada disposición de envases como botes y bolsas de plástico que han resultado en diversos problemas ambientales. Estos incluyen: la contaminación de suelo (contaminación por sustancias persistentes, salinización y desertificación), contaminación de aire con la descomposición cáscaras de banano, que produce la liberación gases de efecto invernadero significativo.

### *3. Cáscara de banano*

La cáscara de banano es la cubierta exterior del fruto. Es un subproducto, generado tanto en el consumo doméstico como en la industria bananera, constituyendo entre el 35% y el 40% del total de residuos generados, abriendo un abanico de posibilidades para su aprovechamiento y transformación en productos con alto valor agregado [33]. Sin embargo, la inadecuada gestión de este residuo orgánico biodegradable puede acarrear serias consecuencias ambientales. Su incineración libera gases nocivos como el CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>, contribuyendo al efecto invernadero y al cambio climático. Por otro lado, su disposición en vertederos genera lixiviados que contaminan el suelo y las aguas subterráneas, poniendo en riesgo la salud ambiental y la calidad de vida de las comunidades aledañas [34].

### *4. Aprovechamiento de cáscara de banano como biomasa lignocelulósica*

La cáscara de banano, lejos de ser un simple desecho, se presenta como un material de gran potencial gracias a su rica composición lignocelulósica, derivado de su alto contenido en lignina, celulosa y hemicelulosa [35]. Lo que la convierte en un sustrato ideal para una amplia gama de aplicaciones como la generación de energía, biocombustibles, abonos y productos químicos [36]. Además, el aprovechamiento representa una alternativa sostenible para reducir la dependencia de recursos energéticos fósiles y la generación de residuos [37].

### C. Medidas regulatorias para el manejo de residuos

En Ecuador, existen diversas medidas regulatorias para el manejo de residuos, como se describen a continuación.

TABLA I. MARCO REGULATORIO PARA EL MANEJO DE RESIDUOS

Marco legal	Descripción
Constitución de la Republica del Ecuador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Art. 14. Toda persona tiene el derecho a vivir en un ambiente saludable y ecológicamente equilibrado, donde se asegure la supervivencia, el bienestar y el buen vivir (sumak kawsay).</li> <li>• Art. 264. Numeral 4. Atribuye la responsabilidad de la gestión de residuos sólidos y las actividades de saneamiento ambiental a los GADM [38].</li> </ul>
Código Orgánico de Ambiente (CODA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Art. 231. Los GAD municipales son los encargados del manejo integral de los residuos en su jurisdicción, incluyendo la separación, clasificación, reciclaje y almacenamiento temporal.</li> <li>• Art. 233. Es responsabilidad de los productores de gestionar los residuos que generen a lo largo de todo el ciclo de vida de sus productos.</li> <li>• Art. 238. Toda persona natural o jurídica que genere residuos, son responsables de su manejo ambiental desde su elaboración hasta su disposición final [39].</li> </ul>
Reglamento al Código Orgánico de Ambiente (RCODA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Art. 593. Establece que los GADM deberán aprovechar los residuos orgánicos, mediante la reutilización y el reciclaje, con el objetivo de producir bioenergía o energía a partir de biomasa [40].</li> </ul>
Acuerdo Ministerial No. 061, Reforma del Libro VI del TULSMA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Art. 47. El Estado ecuatoriano establece la gestión integral de residuos sólidos como una prioridad nacional, responsabilizando a toda la sociedad para alcanzar un desarrollo sostenible a través de la implementación de políticas públicas integrales [41].</li> </ul>
Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente Libro VI Anexo 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Establece normas técnicas y requisitos para la gestión y manejo final de residuos sólidos no peligrosos [42].</li> </ul>

### D. Digestión anaerobia

La biodigestión anaeróbica se presenta como un proceso natural impulsado por microorganismos, principalmente bacterias, que descomponen materia biodegradable en ausencia de oxígeno. Entre los materiales que pueden ser procesados se encuentran residuos agrícolas, municipales e industriales. Este proceso genera como producto final biogás, el cual puede ser utilizado para la producción de electricidad y calor o, tras un procesamiento adicional, convertirse en gas natural renovable con fines combustibles [43].

### 1. Fases de la digestión anaerobia

La DA es un proceso complejo que involucra la interacción de diversos microorganismos, se desarrolla en cuatro etapas sucesivas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [44] (Fig. 1):

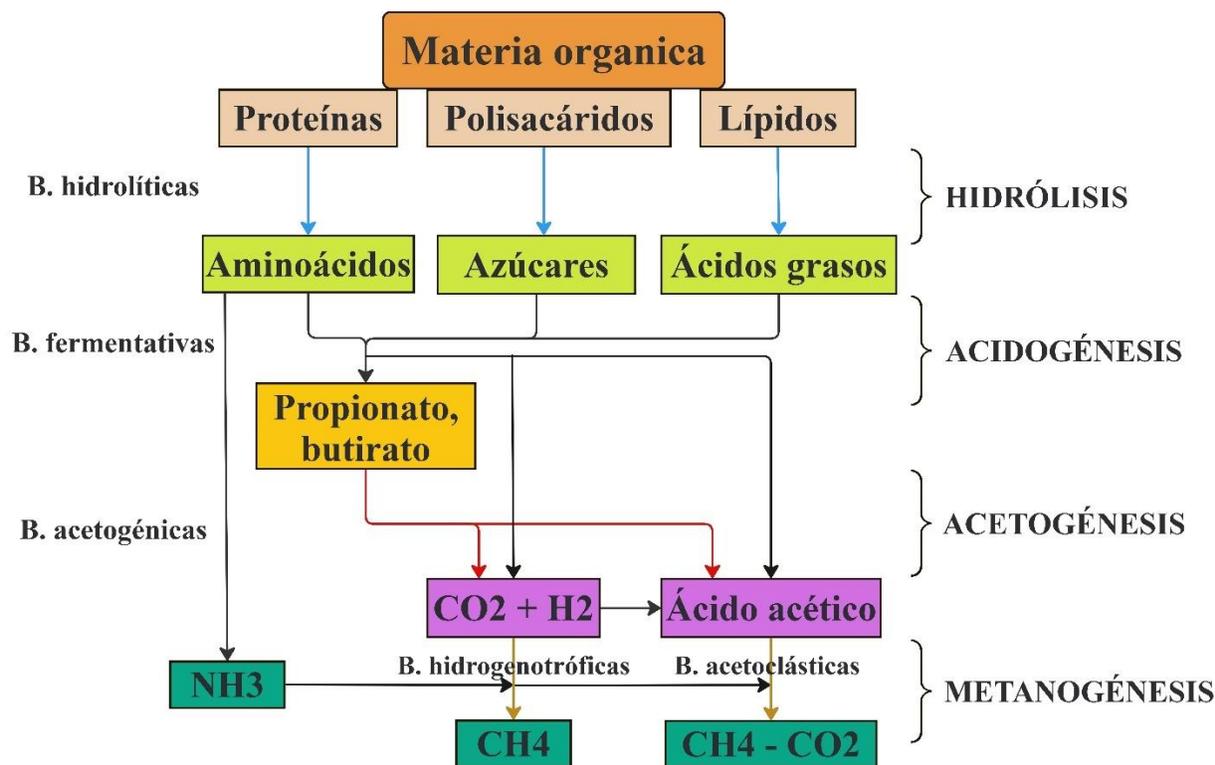


Fig. 1. Esquema del proceso de digestión anaerobia.

Nota: Adaptado de [45][46][3]

#### a. Hidrólisis

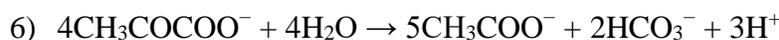
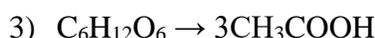
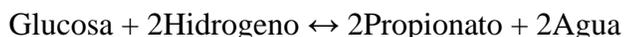
El primer paso esencial de la digestión anaerobia es la hidrólisis. Aquí las bacterias hidrolíticas con ayuda del agua descomponen los enlaces complejos de los polímeros (lípidos, polisacáridos y proteínas) y los convierten en sus respectivas unidades simples (monómeros o moléculas), como azúcares, ácidos grasos y aminoácidos. Aunque algunos de los productos que se generan en esta etapa pueden estar listos para ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas, la mayoría de estos compuestos aun necesitan una mayor descomposición a través de otras etapas [47]. Un ejemplo típico se muestra en la ecuación (1) [48], en la que la celulosa se hidroliza en agua para producir glucosa e hidrógeno.





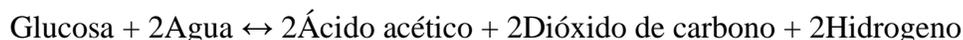
### *b. Acidogénesis*

En la siguiente fase, conocida como etapa de fermentación, las bacterias acidogénicas descomponen los azúcares, los aminoácidos y los lípidos y los convierten principalmente en ácidos orgánicos, ácidos grasos volátiles (AGV) (ácido butírico, ácido propiónico, ácido acético), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), gas hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), y trazas de otros subproductos [44], como se muestra en las ecuaciones (2)-(6) [48]. El amoníaco se produce por la desaminación de los aminoácidos, esto ocurre por una reacción enzimática que implica la separación del grupo amino ( $-\text{NH}_2$ ) de un aminoácido para luego ser liberado como amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), mientras que el resto del aminoácido se convierte en un compuesto orgánico, como un ácido graso volátil [49].



### *c. Acetogénesis*

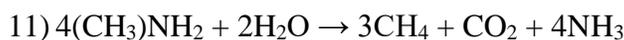
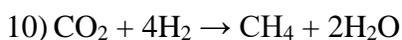
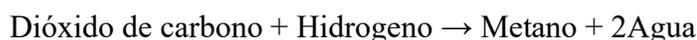
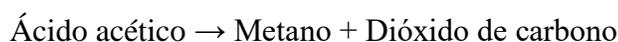
Las bacterias acetogénicas transforman los productos de la etapa de acidogénesis convirtiendo los AGV en ácido acético,  $\text{CO}_2$  e hidrógeno [44]. Las ecuaciones (7) - (8) muestran las reacciones químicas en la etapa de acetogénesis [48].



### *d. Metanogénesis*

La etapa final de la digestión anaerobia es la metanogénesis. Aquí el amoníaco producido en la etapa de la acidogénesis es utilizado como fuente de nitrógeno por algunas bacterias

metanogénicas [50]. En esta etapa intervienen 2 grupos de distintas bacterias metanogénicas. Las bacterias acetoclásticas que convierten el ácido acético en  $\text{CH}_4$  y en  $\text{CO}_2$ , y las bacterias hidrogenotróficas que convierten el  $\text{H}_2$  y el  $\text{CO}_2$  en  $\text{CH}_4$  [44]. Teniendo como producto final biogás que está compuesto principalmente de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  [51]. Otros de los productos resultantes es el  $\text{NH}_3$ , debido a que las bacterias metanogénicas no lo consumen completamente, dejando como resultado trazas de este producto. Se debe tomar en cuenta que altas concentraciones de amoníaco puede ocasionar inhibición a las bacterias metanogénicas, reduciendo la capacidad para producir biogás [52]. Algunas reacciones que ocurren en esta etapa se muestran en las ecuaciones (9)-(11) [48].



## 2. Materias primas comunes para la digestión anaeróbica.

La digestión anaeróbica es un proceso adaptable que puede utilizar una amplia gama de materias primas. En la **TABLA II** se presentan algunos ejemplos de materias primas aptas para la digestión anaeróbica, las cuales deben ser fácilmente biodegradables y no contener componentes tóxicos que afecten a las bacterias [44].

TABLA II. TIPOS DE MATERIAS PRIMAS COMUNES PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.

Categoría	Fuente
Residuos agrícolas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estiércol de ganado, vacuno, porcino, avicultura, etc.</li> <li>• Cultivos energéticos</li> <li>• Restos de cosecha</li> <li>• Mortalidad de las explotaciones</li> </ul>
Residuos industriales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesamiento de alimentos/bebidas</li> <li>• Industria farmacéutica</li> <li>• Residuos de mataderos</li> <li>• Residuos de productos lácteos</li> <li>• Residuos de agro procesamiento</li> </ul>
Residuos municipales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lodos de depuradora</li> <li>• Recortes de jardín</li> <li>• Residuos de alimentos de restaurantes</li> <li>• Residuos de mercados</li> </ul>

Nota: Adaptado de [44].

### *E. Estiércol*

El estiércol animal es un material rico en nutrientes que se obtiene de las heces del ganado vacuno, porcino, ovino, caprino y avícola. Además, puede contener orina y material de cama como paja o serrín, el estiércol puede contener otros componentes como microorganismos y materia orgánica. Este material es un recurso valioso para el medio ambiente, dado que aporta nitrógeno, fósforo, potasio y otros nutrientes fundamentales para el desarrollo de las plantas [53]. Asimismo, ayuda a mejorar a la retención del agua y a la salud del suelo, de igual manera el estiércol puede usarse para producir energía renovable, que tiene como beneficio adicional evitar la liberación de GEI a la atmósfera [54].

#### *1. Contaminación por estiércol Porcino*

El estiércol porcino, si bien se trata de una fuente de energía renovable con potencial para ser aprovechada mediante la digestión anaeróbica, su inadecuada gestión puede convertirlo en un contaminante considerable. Al contener altos niveles de nutrientes (Materia orgánica, N, P, J, Ca, Mg, etc.) y albergar patógenos, antibióticos, metales pesados y microorganismos, puede causar graves daños a los recursos ambientales, y poner en riesgo la salud humana [55].

### *F. Codigestión de bioma lignocelulosa y estiércol animal*

La codigestión se refiere a la digestión anaerobia de dos o más sustratos de diferentes orígenes y composición en un biodigestor. Este proceso, presenta varios beneficios que lo convierte en una alternativa más eficiente que la digestión con un solo sustrato [3]:

- Mejor aprovechamiento de nutrientes: La mezcla de sustratos permite equilibrar la relación C/N, un factor importante para la digestión anaerobia.
- Mayor diversidad microbiana: Una mayor diversidad de sustratos favorece un ambiente rico en microorganismos diversos.
- Mejor capacidad amortiguadora: La codigestión aumenta la capacidad del sistema para resistir cambios de pH, favoreciendo la estabilidad del proceso.
- Dilución de inhibidores: La mezcla de sustratos reduce la concentración de sustancias que pueden inhibir la digestión anaerobia.

En ese sentido, la biomasa lignocelulósica por su alto contenido de carbono, puede inhibir el proceso de DA cuando se utiliza individualmente, debido a su elevada relación C/N. Por otro lado, el estiércol animal a contener altas cantidades de nitrógeno orgánico, puede provocar acumulación de amoníaco e inhibir las actividades microbianas debido a una baja relación C/N

[3]. Es por ello, que al combinar estos dos sustratos mediante la codigestión se lograría una relación óptima de C/N, dado que la proporción baja de nitrógeno en la biomasa lignocelulosa puede compensarse mediante la codigestión con sustratos ricos en nitrógeno como la del estiércol animal, asegurando de esta manera la estabilidad del proceso de la DA para maximizar la generación de biogás [48].

### *G. Biogás*

El biogás surge como una alternativa energética limpia y sostenible, producto de la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno, un proceso conocido como digestión anaeróbica. Esta maravilla natural, impulsada por una comunidad diversa de microorganismos, genera un gas con un gran abanico de aplicaciones, desde la generación de electricidad hasta su uso en la cocina y la calefacción, pasando incluso por su transformación en biocombustibles para el transporte o productos químicos [56].

El biogás que se produce dentro de un biodigestor está compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) (45-70%), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (30-45%), con trazas de otros gases y vapores, como vapor de agua, sulfuros de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) (1-2%), oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) [45] [57].

#### *1. Factores que afectan a la generación de biogás durante el proceso de la digestión anaerobia*

El rendimiento de la producción de biogás depende de algunos factores como los siguientes:

##### *a. Temperatura*

La temperatura es un factor fundamental en la eficiencia de la digestión anaeróbica y la generación de biogás. Este proceso puede desarrollarse en tres rangos de temperatura: psicrófilo (menos de  $30^\circ\text{C}$ ), mesófilo ( $30-40^\circ\text{C}$ ) y termófilo ( $50-60^\circ\text{C}$ ). Las bacterias metanogénicas, responsables de la generación de biogás, son más activas en las zonas mesófila y termófila. La temperatura ideal para la producción de biogás se sitúa entre  $33$  y  $38^\circ\text{C}$ . A temperaturas más bajas, la producción se ralentiza, mientras que a temperaturas más altas las bacterias mueren [58].

##### *b. pH*

El pH es un parámetro crucial para la operación y la producción de biogás. Este cambia a lo largo de las diferentes etapas de la digestión anaeróbica. El rango del pH ideal para la generación de biogás se encuentra entre los 6,5 y 7,2, es decir, en un punto neutro [59]. Si los valores de pH son inferiores a 6 o superiores a 8,5 puede ralentizar el proceso [58], para estos casos una de las

opciones para estabilizar el pH es mediante la adición de cal [59]. Según Wadi y Seroor [58] señalan que el estiércol animal ayuda a mantener el pH estable debido a su alta alcalinidad y de esta manera neutraliza los ácidos que se producen durante la digestión anaeróbica.

*c. Sólidos totales (ST)*

El contenido de TS de los residuos sólidos influye en el rendimiento de la digestión anaeróbica, especialmente en la eficiencia de la producción de biogás [60]. Esto se debe a que los ST son la principal fuente de alimento para los microorganismos metanogénicos que son responsables de la producción de biogás. A mayor cantidad de ST, mayor cantidad de sustrato disponible para los microorganismos metanogénicos, lo que puede conducir a una mayor producción de biogás. Sin embargo, esta relación no es lineal y existe un punto óptimo de ST para la producción de biogás. Si la cantidad de ST es demasiado baja, no habrá suficiente sustrato para que los microorganismos metanogénicos produzcan biogás, y si la cantidad de ST es demasiado alta, se puede generar un exceso de ácidos grasos volátiles que inhibirá la actividad de los microorganismos, lo que también reducirá la producción de biogás. Según los autores Riya *et al.* [61], nos menciona que la producción de biogás se mantiene estable cuando el contenido de ST en los reactores se encuentran entre 18% y 27%. Sin embargo, cuando existe un ST superior a 28% disminuye la producción de biogás y comienza haber una acumulación de ácidos grasos volátiles, lo que provoca una inhibición. Por este motivo este autor recomienda que para que exista una producción estable de biogás los contenidos de TS en los sustratos deben estar entre el 32%, en el cual el contenido de TS del reactor alcanzaría un 23 %.

*d. Sólidos volátiles (SV)*

Los sólidos volátiles (SV) es un factor fundamental que influye directamente en la cantidad y la composición del biogás generado durante la digestión anaeróbica. Estos SV actúan como fuente de energía esencial para los microorganismos, los cuales son responsables de la producción del biogás. Por ello, es importante alimentar los biodigestores con materias primas que contengan un alto porcentaje de SV [23]. Según los autores Ren *et al.* [62], un contenido de SV superior al 50% se considera un rango óptimo para la producción de biogás.

*e. Humedad*

El contenido de humedad es uno de los factores más importantes que afecta la digestión anaeróbica. Según Kang y Yuan [63], señalan que un contenido adecuado de humedad facilita y optimiza diversos aspectos del proceso:

- La humedad mantiene la turgencia de las células microbianas, garantizando su forma y estructura, esenciales para la digestión de los sustratos orgánicos.
- Actúa como un medio de transporte, movilizandando nutrientes, productos intermedios, productos finales, enzimas y microorganismos por todo el sistema digestivo anaeróbico.
- Participa activamente en la hidrólisis de moléculas orgánicas complejas, descomponiéndolas en unidades más simples que los microorganismos pueden asimilar con facilidad.

Un contenido de humedad superior al 60% en la materia orgánica, tal como lo indica Mora y León [64], es clave para maximizar la producción de biogás en el proceso de digestión anaeróbica.

*f. Tiempo de retención hidráulica (TRH)*

Es la duración promedio del tiempo que se mantiene el material biodegradable en el biodigestor. Se debe tomar en cuenta que la temperatura interna del biodigestor, la composición de los alimentos y la aplicación tecnológica influyen en el TRH. En este sentido, el TRH en un biodigestor a temperatura termofílico es de alrededor de 14 días, mientras que en un biodigestor a temperatura mesofílico oscila entre 10 y 40 días, esto se debe que a temperaturas termofílicas las bacterias degradan más rápido la materia orgánica y el TRH es menor, en cambio a temperaturas mesofílicas la degradación es más lenta y el TRH será mayor [58].

En este caso un TRH más prolongada requerirá un mayor volumen del biodigestor, lo que aumentará el costo de capital y una baja eficiencia. Por lo contrario, si el tiempo de retención es demasiado breve, podría causar la eliminación de la población bacteriana activa, reduciendo de esta manera la producción de biogás [58].

*g. Relación C/N*

La relación C/N es un factor fundamental en el proceso de la digestión, dado que determina la cantidad de nitrógeno disponible para las bacterias metanogénicas. Si la relación C/N es demasiado alta (es decir, hay poco nitrógeno), las bacterias metanogénicas no podrán sintetizar proteínas y la producción de biogás se verá afectada. Por otro lado, una relación C/N demasiado baja (es decir, hay demasiado nitrógeno) puede conducir a la acumulación de amoníaco, que puede inhibir la digestión anaeróbica. En muchos estudios se ha demostrado que una relación C/N entre 20 y 35:1 es la óptima para el funcionamiento eficiente de un biodigestor. Sin embargo, la relación C/N ideal puede variar según el tipo de materia prima utilizada [58].

#### *h. Tipo de sustrato*

La producción de biogás a partir de biomasa depende de la composición nutricional de la materia prima utilizada. Por ende, la composición del material influye de manera importante en la cantidad de biogás generado, en el contenido de metano, la velocidad de degradación y la facilidad con la que la biomasa se descompone. Los principales componentes nutricionales que influyen en la producción de biogás son los proteínas, carbohidratos y grasas. Si bien los sustratos ricos en proteínas tienen un alto potencial de producción de metano, la descomposición de estas proteínas libera amonio, lo que aumenta la alcalinidad del proceso de digestión anaerobia [51].

#### *i. Tamaño de partícula*

El tamaño de las partículas del material orgánico que se utiliza en un biodigestor afecta directamente la eficiencia del proceso de fermentación. Las partículas más pequeñas aumentan la superficie disponible, lo que permite que una mayor cantidad de microorganismos se adhieran y lleven a cabo su labor de descomposición. Esta interacción entre microorganismos y sustrato se intensifica, generando un aumento considerable en la producción de biogás. Triturar la materia prima en trozos más pequeños y uniformes puede reducir significativamente el tamaño del biodigestor necesario sin afectar la cantidad de biogás producido. Esto se debe a que las partículas más pequeñas se descomponen más rápido y liberan el biogás de manera más eficiente [65].

#### *j. Agitación*

La agitación del sustrato dentro del biodigestor ayuda a mejorar la producción de biogás, ya que aumenta el contacto entre los microorganismos y el sustrato, lo que mejora el proceso de digestión. Según Raghad y Seroor [59], nos menciona que la producción de biogás aumenta en un 15% para el biodigestor agitado en comparación con el no agitado.

### *2. Ventajas y desventajas del biogás*

La generación de biogás presenta varias ventajas y desventajas en su implantación [66]:

#### *a. Ventajas*

- El biogás es considerado una fuente de energía renovable que sirve como alternativa viable a los combustibles fósiles, ayudando a reducir la dependencia de energías no renovables.
- La producción de biogás es una herramienta importante para la lucha contra el cambio climático. Al capturar y aprovechar los gases generados por la descomposición de residuos orgánicos, se evita su liberación a la atmósfera, disminuyendo las emisiones de los GEI.

- El biogás se presenta como una solución ecológica y responsable para el manejo de los residuos orgánicos. Esta tecnología no solo reduce significativamente la cantidad de desechos que van a parar a los rellenos sanitarios, sino que también genera un biocombustible renovable y un fertilizante natural de alto valor. De esta manera, el biogás contribuye de forma notable a los principios de la economía circular y a la protección del medio ambiente.
- La adopción del biogás promueve la independencia energética, especialmente en las zonas rurales donde abundan los recursos de biomasa. Esto abre oportunidades descentralizadas para la generación de energía.
- Además, el subproducto de la producción de biogás, conocido como digestato, sirve como fertilizante orgánico rico en nutrientes. Al utilizar digestato, mejoramos la calidad del suelo, aumentamos el rendimiento de los cultivos y disminuimos la necesidad de fertilizantes sintéticos, fomentando así prácticas agrícolas sostenibles.

#### *b. Desventajas*

- La instalación de una planta de biogás requiere una inversión considerable. Los costos de construcción, equipamiento y mantenimiento pueden ser altos, especialmente para proyectos a gran escala.
- El proceso de digestión anaerobia requiere tecnología especializada y una infraestructura adecuada. Esto incluye digestores, sistemas de control de temperatura, equipos de medición y control, y sistemas de tratamiento de gases.
- La producción de biogás ofrece algunos beneficios ambientales, pero a la vez existen algunos riesgos que se deben de tomar en cuenta y ser gestionados. Estos incluyen olores y emisiones fugitivas de gases durante la digestión anaerobia, o en el traslado de la materia prima o del digestato, provocando contaminación a la atmosfera. Por este motivo, es fundamental contar con sistemas de depuración de gases adecuados y bien mantenidos para evitar este tipo de problemas.

### *3. Amoniaco*

El amoníaco, es un compuesto químico de fórmula  $\text{NH}_3$ , se presenta como un gas incoloro, pero con un olor penetrante muy característico. No solo es uno de los productos resultantes de la digestión anaerobia, sino que también se encuentra de forma natural en el ambiente, producto de la descomposición de materia orgánica o de la acción de bacterias fijadoras de nitrógeno. A pesar de su origen natural, el amoníaco tiene un gran potencial industrial. Su versatilidad lo convierte en

un elemento clave en diversas aplicaciones, entre las que destacan: obtención de productos químicos, producción de fertilizantes, gas refrigerante, depuración del agua, fabricación de plásticos, entre otros [49].

## *H. Biodigestor*

Los biodigestores son sistemas herméticos y sin oxígeno que proporcionan un entorno óptimo con los parámetros necesarios para una digestión anaerobia controlada que produzca biogás [67]. Además, promueve el desarrollo local sostenible a través del tratamiento de los residuos orgánicos generados por alguna actividad, permitiendo no sólo la generación de energía renovable sino también el aprovechamiento final de los residuos como biofertilizante, reduciendo la generación de electricidad a partir de una fuente no renovable [68].

### *1. Clasificación de los biodigestores*

Los biodigestores pueden clasificarse en función de su modo operativo, que se refiere al método de carga y descarga del biodigestor.

#### *a. Biodigestor de flujo continuo*

Los biodigestores continuos reciben un flujo constante de residuos y extraen simultáneamente el material digerido. Este tipo de biodigestores son los más eficientes, debido a que la materia orgánica se encuentra en contacto con las bacterias durante todo el proceso de digestión [44].

#### *b. Biodigestor de flujo semicontinuo*

Los biodigestores semicontinuos permiten una alimentación de materia orgánica de forma regular diaria o semanal. Y su descarga es de forma parcial, esto significa que solo se extrae una porción del digestato (residuo final), mientras que otra parte permanece en el biodigestor para mantener la actividad microbiana. Este tipo de biodigestores son menos eficientes que los continuos, pero son más fáciles de mantener [68].

#### *c. Biodigestor de flujo discontinuo*

Los biodigestores discontinuos se caracterizan por su sencillez operativa y de mantenimiento. Las materias primas se agregan al inicio del proceso, y se mantiene cerrado durante un período de tiempo determinado, generalmente varias semanas. Una vez finalizado este tiempo, el biodigestor se vacía cuando el contenido del sustrato disminuye y deja de producir biogás [44].

### *I. Sensores detectores de gases*

Los sensores detectores de gases son un tipo de sensores electroquímicos de bajo costo y alta sensibilidad, son dispositivos electroquímicos que identifican una amplia gama de gases, incluyendo metano, gas natural licuado, alcohol, hidrógeno, humo, amoníaco, propano, benceno, etc. Estos sensores cuentan con un electrodo recubierto con un material detector que se calienta para aumentar su reactividad y sensibilidad. Al entrar en contacto con el gas, el electrodo experimenta un cambio en su resistencia eléctrica, proporcional a la concentración del gas presente [69].

## VII. METODOLOGÍA

### *A. Enfoque de la investigación*

La presente investigación tiene diferentes enfoques, que se determinan de acuerdo a la circunstancia de la investigación:

#### *1. Investigación exploratoria*

Previo al estudio experimental, se realizó una investigación exploratoria exhaustiva para comprender el impacto potencial de las variables independientes (cáscara de banano maduro y estiércol porcino) en las variables dependientes (producción de biogás y concentración de  $\text{NH}_3$ ). Este enfoque permitió obtener una comprensión inicial profunda del problema, identificar posibles relaciones y formular hipótesis que luego se probaron en el estudio experimental. La investigación exploratoria proporcionó una base sólida y justificación teórica para la manipulación controlada de variables en el contexto específico del estudio [70].

#### *2. Investigación descriptiva*

La investigación descriptiva se empleó para profundizar en la comprensión de cómo las variables independientes influyeron a las variables dependiente en el proceso de la D.A. Esta metodología, tal como lo señalan Hernández [71], permitió presentar los resultados obtenidos de manera clara y precisa, enfatizando las relaciones identificadas entre las variables dependientes e independientes. En esta fase del estudio, se logró una comprensión detallada de los efectos observados, lo cual contribuyó a validar los hallazgos del estudio experimental.

#### *3. Investigación experimental*

La investigación experimental es una metodología científica para comprender las relaciones entre dos o más variables. Estos conjuntos constan de variables independientes y dependientes que se prueban experimentalmente para deducir una correlación entre dichas variables en términos de la naturaleza y fuerza de dicha relación [72]. El presente estudio es de tipo experimental, debido a que se manipularon de manera intencional variables independientes para observar su efecto en las variables dependientes [73].

### *B. Ubicación de la investigación*

El presente trabajo de investigación se realizó en la Universidad Técnica de Machala, ubicado en el Km 5.5 de la vía Machala – Pasaje, del cantón Machala, de la provincia de El Oro (**Fig. 2**). Localizada geo-espacialmente mediante el sistema de coordenadas WGS84 17S, en los

puntos de coordenada 620809.06 E, 9636673.49 S. El experimento se ejecutó en el Laboratorio de Aplicaciones de Electroquímica y Bioenergía de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud.

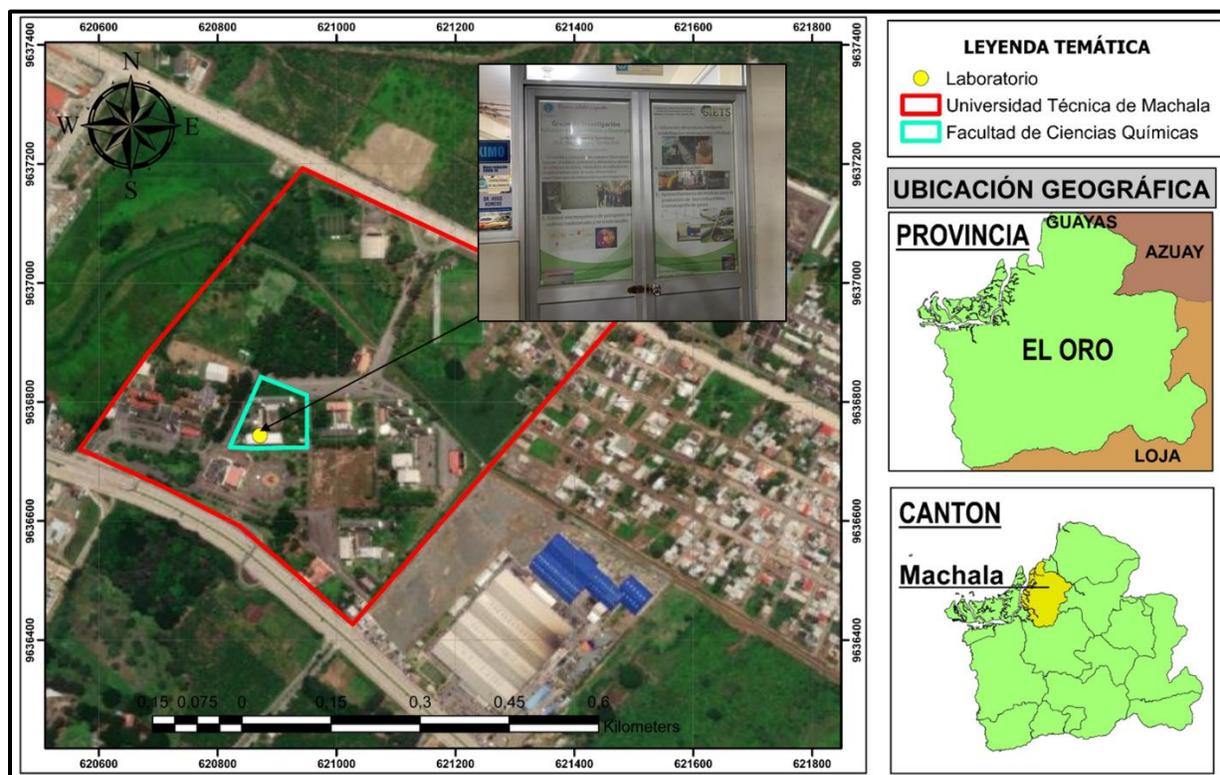


Fig. 2. Mapa de ubicación del laboratorio de Aplicaciones de Electroquímica y Bioenergía

### C. Materiales

Los materiales utilizados para el presente estudio investigativo se detallan en la siguiente

**TABLA III.**

TABLA III. RECURSOS MATERIALES

Insumos	Equipos de protección personal	Sustratos	Equipos de laboratorio	Programas
- Espátula metálica	- Mandil de laboratorio	- Estiércol porcino	- Sensores de gases MQ-135	- Software Tmr Arduino
- Cuchillo	- Mascarilla	- Cáscara de banano maduro	- Balanza analítica	- Microsoft Office Excel 2016
- Embudo	- Guantes		- Desecador	- Programa estadístico IBM SPSS
- Botellas de polietileno			- Horno de secado	
- Bolsas de propileno			- Mufla de laboratorio	
- Vasos de plástico			- Agitador portátil	
- Vasos de precipitación de 100 y 500 ml				

- Cinta de papel
- Silicona
- Tampón de caucho
- Equipo venoclisis
- Pinzas
- Agua destilada
- Molino

#### D. Proceso metodológico para la obtención de biogás

En el siguiente **Fig. 3**, se puede observar las diferentes etapas de la metodología que se ejecutaron para la obtención de biogás.

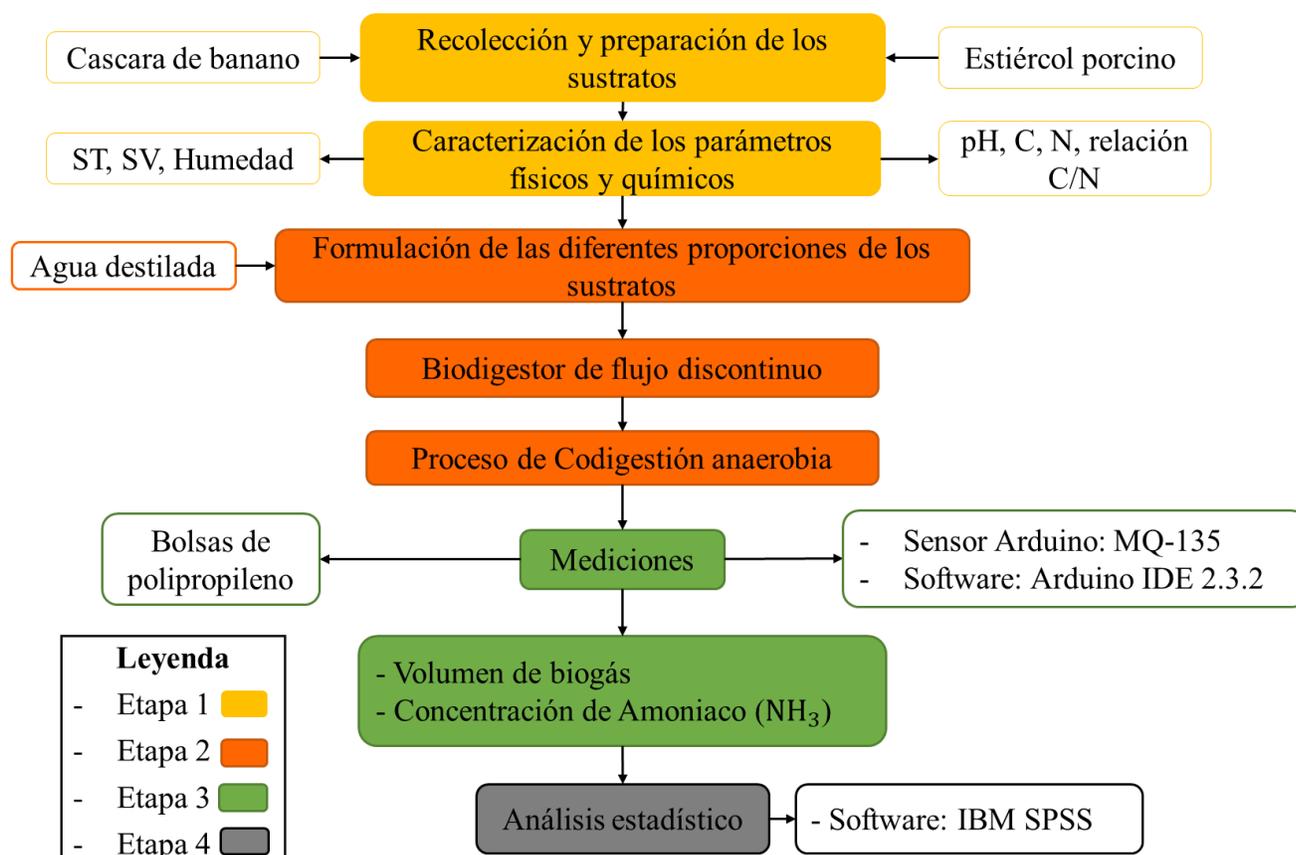


Fig. 3. Diagrama metodológico para la obtención de biogás

#### E. Recolección y preparación de los sustratos

El estiércol porcino se recolectó en la granja Porcicola San Fernando, ubicada en la parroquia Capiro del cantón Piñas, provincia del Oro (**Fig. 4**). Esta actividad se llevó a cabo debido a que el estiércol porcino representa uno de los principales residuos generados por las granjas porcícolas de la región, y su manejo inadecuado puede acarrear serios desafíos ambientales [55]. La recolección se realizó durante las horas de la mañana para preservar la calidad y frescura del

sustrato y evitar alteraciones en sus propiedades. Con ayuda de una espátula se recolectó una cantidad de 3kg de estiércol, para luego depositarlo en un recipiente de polipropileno de color oscuro, para luego ser llevado al laboratorio para su procesamiento [74][75]. Allí, se eliminaron cuidadosamente los residuos no digeridos y otras malezas, para obtener una muestra limpia y homogénea. Finalmente, el estiércol se dividió en diferentes proporciones para su uso en los distintos tratamientos experimentales.

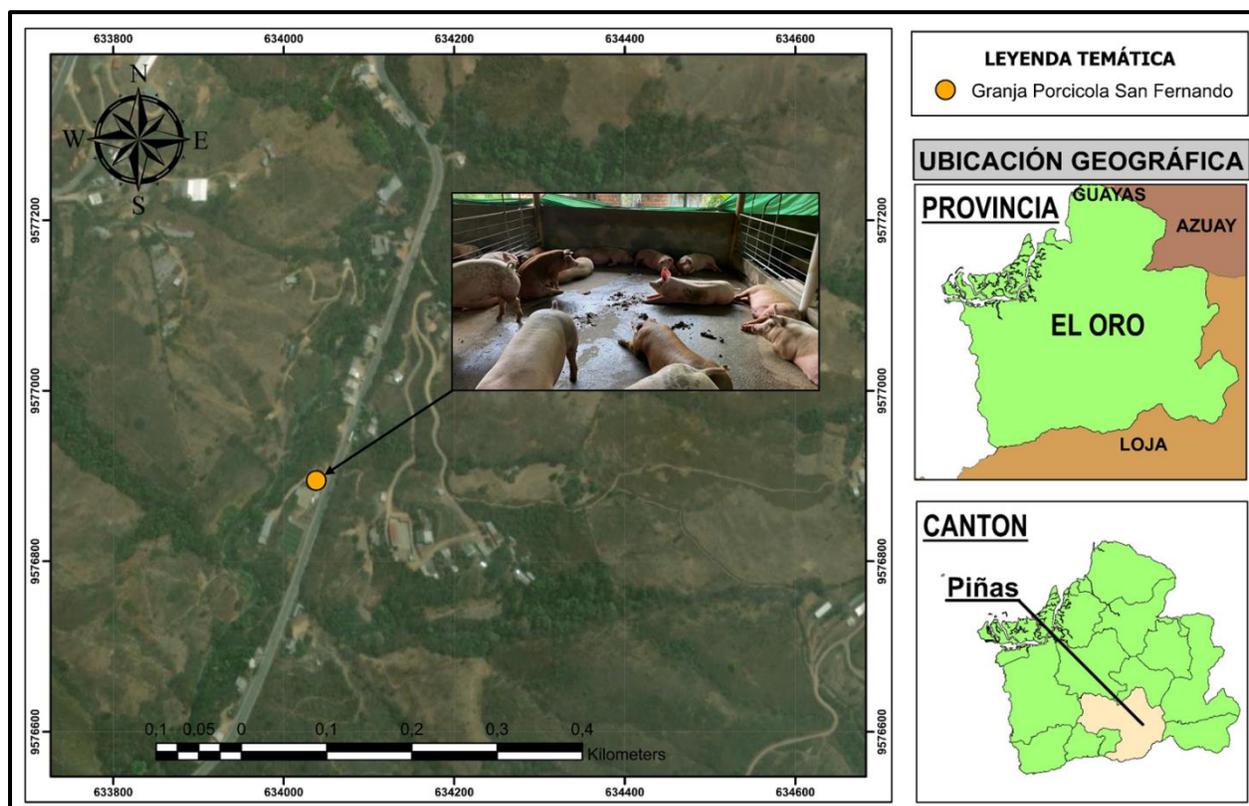


Fig. 4. Mapa de ubicación del sitio de recolección del estiércol porcino

Las cáscaras de banano maduro usadas en el trabajo experimental fueron proporcionadas por la empresa Diana-food S.A., ubicada en la parroquia La Peaña del cantón Pasaje (**Fig. 5**). Esta empresa, dedicada a la producción y comercialización de productos alimenticios a base de banano, genera una considerable cantidad de residuos como la cáscara de banano maduro, material que no es aprovechado actualmente [76]. La empresa proporcionó 3 kg de cáscaras de banano maduro, las cuales fueron cortadas en trozos pequeños en diámetros de 2cm antes de ser introducidos a los reactores, con el objetivo de que los microorganismos que intervienen durante la digestión anaeróbica tengan una mayor facilidad al momento de descomponer el sustrato [77].

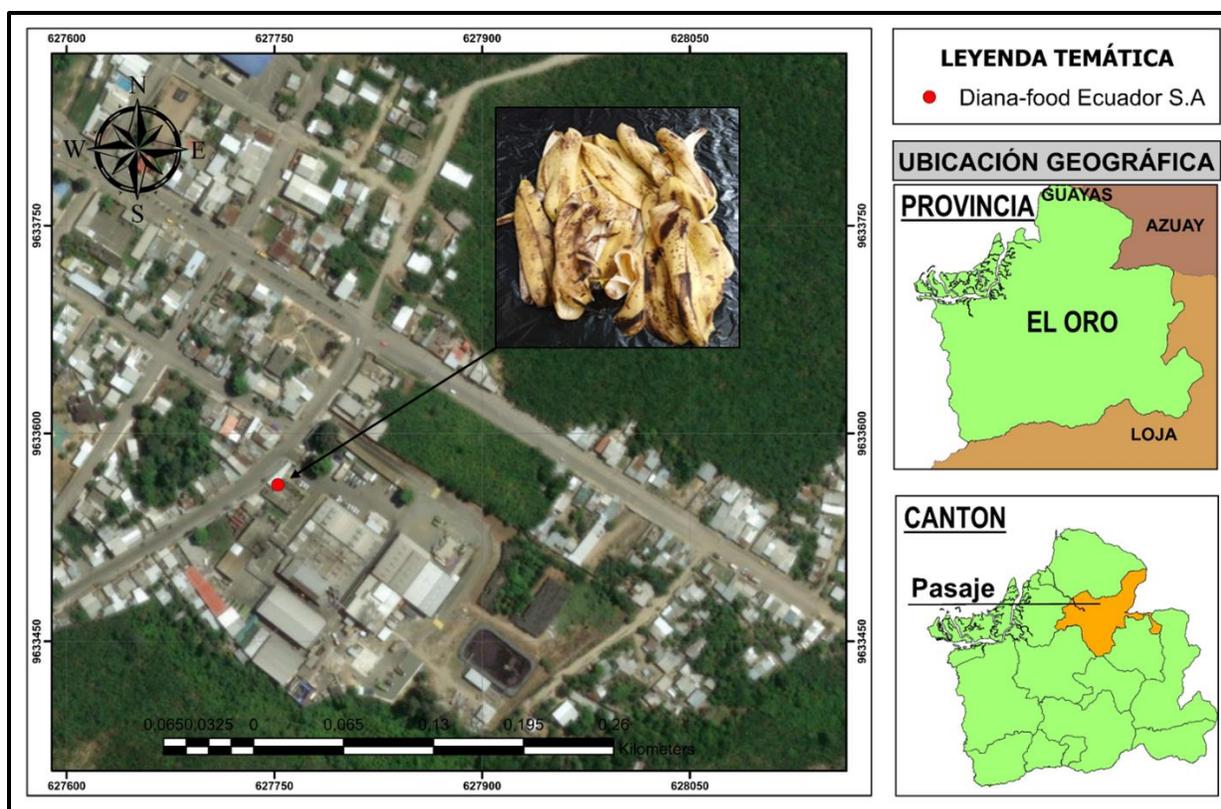


Fig. 5. Mapa de ubicado de la empresa Diana-food S.A.

#### F. Determinación de parámetros físicos y químicos

Para poder caracterizar las propiedades físicas y químicas de los sustratos, se analizaron los parámetros propuestos por los autores Gámez *et al.* [78]. Estos parámetros incluyen la humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, pH, carbono orgánico, nitrógeno total y la relación C/N. La información obtenida nos permitió tener un mayor control sobre los diferentes procesos que ocurren en la digestión anaerobia, facilitando la producción de biogás.

##### 1. Parámetros físicos

###### a. Sólidos totales (ST)

Para el análisis de los ST se empleó el método gravimétrico, el cual se fundamenta en la pérdida de masa que experimenta una muestra al ser calentada a una temperatura específica durante un tiempo determinado [79]. La determinación ST es una forma eficaz de conocer la cantidad de nutriente que estará disponible para la acción bacteriana durante la digestión [77]. Primeramente, se secaron los crisoles de porcelana en un horno ajustado a 105°C durante 2 hora, se enfrió en desecadores y se pesó inmediatamente antes de su uso. Luego, se pesaron 10 g de muestras recién recolectadas de cáscara de banano maduro y estiércol porcino con ayuda de una balanza digital y

se colocaron en los crisoles de porcelana previamente secado y pesado. Luego, los crisoles se colocaron dentro de un horno eléctrico caliente mantenido una temperatura de 105°C [80]. Los crisoles se dejaron en el horno durante 24 horas, luego se sacó, se enfrió en desecadores y se pesó. Luego, el porcentaje del TS se calculó utilizando la siguiente formula [81]:

$$\%ST = \frac{W_1 - W_2}{W_3 - W_2} \times 100$$

Donde:

%TS = Porcentaje de sólidos totales

W<sub>1</sub> = Peso del crisol seco + residuo seco a 105°C

W<sub>2</sub> = Peso del crisol seco

W<sub>3</sub> = Peso de la muestra húmeda (sustrato) + crisol secado

#### *b. Sólidos volátiles (SV)*

Para determinar los SV se utilizó el método de calcinación, el cual implica la combustión de la materia orgánica presente en el sustrato a una temperatura elevada en presencia de oxígeno [79]. Los SV es la verdadera materia orgánica disponible para la acción bacteriana durante digestión anaerobia [77]. Una vez que se determinó los ST, los sustratos que fueron secados en el horno eléctrico se colocaron en un horno de mufla durante 3 horas a 550°C. Después de esto, los sustratos calentados se enfriaron en un desecador y se pesó [80]. Para poder calcular el % de los SV se empleó la siguiente fórmula [81]:

$$\%SV = \frac{W_1 - W_4}{W_1 - W_2} \times 100$$

Donde:

%VS = Porcentaje de sólido volátil

W<sub>1</sub> = Peso del crisol seco + residuo seco a 105°C

W<sub>2</sub> = Peso del crisol seco

W<sub>4</sub> = Peso del crisol + peso del residuo luego de la calcinación a 550°C

#### *c. Humedad*

Para determinar el contenido de humedad de los sustratos se utilizó la técnica gravimétrica, que consiste en pesar una muestra del sustrato antes y después de haberla secarla en un horno eléctrico a una temperatura constante. La diferencia de peso se expresa como porcentaje de humedad. Para esto se inició pesando 10 gr de sustrato en crisoles de porcelana tarado, luego se los coloco en un horno a 105°C durante 24h. La muestra seca se enfrió en un desecador durante

30 minutos, luego se retiró la muestra y se pesó. Los datos obtenidos se utilizaron para calcular la humedad aplicando la siguiente fórmula [82]:

$$H\% = \frac{A - B}{A - C} \times 100$$

Donde:

H% = porcentaje de humedad

A = Peso de la muestra húmeda (sustrato) + peso del crisol seco

B = Peso de la muestra seca a 105 °C + peso del crisol seco

C = Peso del crisol seco

## 2. *Parámetros químicos*

### a. *pH*

Las mediciones de pH de los sustratos se realizaron con la ayuda de un pH metro digital, siguiendo la metodología de los autores Ruíz y Becerra [82]. Primeramente, se molino la cáscara de banano maduro a un tamaño de 0.8mm. Luego se pesó 20 gramos de muestra tanto de cáscara de banano y estiércol porcino en diferentes vasos de precipitación de 100 ml. Luego se agregó 40 ml de agua destilada a una temperatura de 20°C a las muestras, debido a que esto favorece una mayor mezcla y homogeneidad, para obtener una medición más precisa. Luego con ayuda de un agitador se agito las muestras por 5 minutos y se dejó reposar por 2 horas. Previamente al análisis del pH se calibro el pH metro usando soluciones tampones. Finalmente, se introdujo el pH metro en las muestras durante 1 minuto, hasta que se estabilizara y obtener el resultado.

### b. *Carbono orgánico*

El análisis del carbono orgánico, fue realizado en el laboratorio NemaLab, ubicado en la Av. Ferroviaria, del cantón Machala de la provincia EL Oro. Para determinar este parámetro, el laboratorio aplicó la metodología de Walkley Black, la cual se basa en la oxidación química del carbono orgánico del suelo mediante una solución de dicromato de potasio en ácido sulfúrico concentrado. Esta mezcla se calienta a una temperatura específica (aproximadamente 170°C) durante un tiempo determinado (aproximadamente 30 minutos). Durante este proceso, el carbono orgánico del suelo se oxida a dióxido de carbono, mientras que el dicromato de potasio se reduce a iones de cromo trivalente. El exceso de dicromato de potasio sin reaccionar se titula con una solución de sulfato ferroso. La reacción entre el dicromato de potasio y el sulfato ferroso produce

iones de cromo hexavalente y sulfato ferroso oxidado. Finalmente, la cantidad de carbono orgánico presente en la muestra se calcula utilizando la siguiente fórmula [83] [84]:

$$\%NT = \frac{(B - M) \times N \times 0.003 \times (100 + pW)}{Wm}$$

Donde:

M= volumen de la solución titulada

B= volumen de la solución titulante

N= normalidad del sulfato ferroso

pW= % humedad de la muestra

Wm= Peso de la muestra original

#### *c. Nitrógeno total*

La determinación del nitrógeno total, fue realizado por el laboratorio NemaLab. En la cual, utilizaron la metodología de Micro Kjeldahl. Esta metodología se basa en la digestión ácida de la muestra, seguida de una etapa de destilación y titulación para cuantificar el amonio liberado [85].

En la etapa de digestión ácida, la muestra se descompone en presencia de ácido sulfúrico concentrado y un catalizador a alta temperatura (alrededor de 350°C). Durante la digestión, el nitrógeno orgánico de la muestra se convierte en sulfato de amonio. Luego la solución de digestión se neutraliza con hidróxido de sodio para liberar el amonio en forma de gas. El amonio gaseoso se destila y se captura en un receptor que contiene una solución de ácido bórico. En este medio, el amonio reacciona con el ácido bórico para formar borato de amonio, para luego ser titulado con una solución de ácido sulfúrico de concentración conocida utilizando un indicador para detectar el punto final de la titulación. La cantidad de nitrógeno total presente en la muestra se calcula utilizando la siguiente fórmula [86]:

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

#### *d. Relación C/N*

La relación C/N representa la proporción entre la cantidad de carbono y la cantidad de nitrógeno presente en el sustrato, y se expresa como un número decimal, donde el numerador es la cantidad de carbono y el denominador es la cantidad de nitrógeno [87]. Para la determinación de la relación C/N de los sustratos, se debe tener conocer los valores de carbono orgánico y nitrógeno total, para luego aplicar la siguiente fórmula [88]:

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

Donde:

CO = Carbono orgánico

NT = Nitrógeno total

### G. Preparación de los biodigestores

La experimentación se realizó mediante biodigestores de flujo discontinuos. Para esto se construyó 5 reactores con botellas de polietileno recicladas de un volumen de 1 litro de capacidad. Se inicio perforando un orificio a la tapa de la botella para introducir un tampón de caucho de 4 cm de diámetro. En el tampón se introdujo una aguja de 4 cm de largo para unir con un tubo de venoclisis de 12 cm de largo, luego este fue conectado a otra aguja que iba insertada a una bolsa de propileno para la recolección del biogás (**Fig. 6**) [89]. Para garantizar la limpieza y eliminar cualquier microorganismo que pueda afectar el proceso de digestión anaerobia, se realizó una esterilización previa al ensamblaje de los biodigestores (reactores). Esta se llevó a cabo mediante un lavado interno con una solución diluida de ácido nítrico [90].



Fig. 6. Ensamblaje de los reactores.

### H. Composición de los biodigestores

Para determinar la proporción de mezcla óptima requerida para la máxima producción de biogás con altas concentración de amoníaco se utilizaron cinco tratamientos en diferentes reactores, siguiendo la metodología de Zhang *et al.* [91], en cada reactor se introdujo cáscara de banana maduro (CB) y estiércol porcino (EP) combinados en diferentes proporciones, es decir,

R1= 90% CB + 10% EP, R2= 70% CB + 30% EP, R3 = 50% CB + 50% EP, R4= 30% CB + 70% EP, R5= 10% CB + 90% EP (TABLA IV) (Fig. 6).

Se cargaron los reactores hasta un 70% de su volumen total, dejando un 30% de espacio libre para la producción de biogás, tal como lo indica Zhang *et al.* [91]. De los cuales se utilizó 350 ml de espacio para la mezcla de los sustratos y 350 ml para agregar agua destilada, manteniendo una relación 1:1 de sustrato y agua como lo menciona Indiveri [92]. La incorporación de agua en los reactores contribuye a una mejor dilución de los sustratos, lo que facilita su digestión anaeróbica.

Los reactores se agitaron manualmente durante dos minutos después de la introducción de los sustratos, y nuevamente después de cada medición del volumen de biogás. Este proceso de agitación garantiza un mayor contacto entre los microorganismos y el material orgánico, lo que favorece la biodegradación de los sustratos y acelerar la producción de biogás [93].

TABLA IV. COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA DE LOS REACTORES

N° tratamientos	N° reactores	Cáscara de banano maduro (g)	Estiércol porcino (g)	Agua (ml)
T1	R1	315	35	350
T2	R2	245	105	350
T3	R3	175	175	350
T4	R4	105	245	350
T5	R5	35	315	350



Fig. 7. Reactores son sus diferentes proporciones de sustratos.

### *I. Monitoreo del volumen del biogás*

Para conocer la cantidad de gas producido se utilizaron bolsas de propileno esterilizadas de 500 ml, como método de monitoreo, debido a que ofrece importantes ventajas en términos de seguridad, permeabilidad, esterilización, durabilidad y eficiencia, lo que hace que sea una solución ideal para el almacenamiento seguro del biogás [94]. Se registró la producción diaria de gas para los diferentes tratamientos durante los días de digestión, desde el día 1 que inicio a generar biogás hasta el día 15, que ceso la producción de biogás [75].

### *J. Análisis de la composición del biogás*

La cantidad de amoniaco en el biogás se midió directamente en el sitio (in situ) utilizando un sensor de gas MQ-135 y el software Arduino IDE 2.3.2 (**Fig. 8**). El sensor está compuesto por un elemento sensor semiconductor sensible al amoniaco. Cuando el sensor se expone con este gas, la conductividad eléctrica del elemento aumenta, detectando el amoniaco. Y con el software Tmr Arduino utiliza su conversor analógico-digital (ADC) para convertir el voltaje leído del sensor en un valor digital, representa la concentración de amoniaco en el biogás [95]. Previo al análisis el

biogás, se realizó una calibración al sensor. Esto se efectuó exponiéndolo a concentraciones conocidas de amoníaco y ajustando el código del software Tmr Arduino para que coincida con las lecturas del sensor [95].

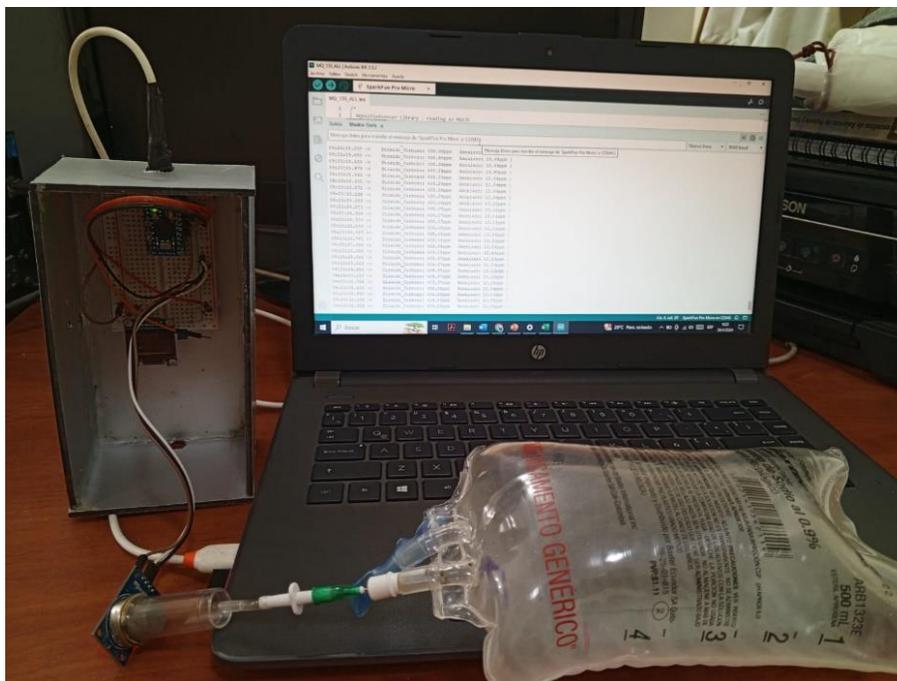


Fig. 8. Equipos de laboratorio para el análisis del biogás.

### **K. Análisis estadístico de los resultados**

Para determinar las diferencias significativas entre cada tratamiento (reactor), se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el programa IBM SPSS. El ANOVA permitió comparar el efecto de las variables dependientes (cáscara de banano y estiércol porcino) sobre las variables independientes (volumen de biogás y la concentración de amoníaco). Según Dagnino [96], la prueba ANOVA es una herramienta estadística que permite comparar las medias de dos o más grupos. Asimismo, se aplicó una prueba de homogeneidad para determinar si los resultados obtenidos tienen la misma distribución de probabilidad [97]. Se estableció un nivel de significancia de  $p < 0.05$ . Este valor  $p$  es una medida estadística que se utiliza para validar una hipótesis frente a los datos observados [98].

## VIII RESULTADOS

### A. Caracterización física y química de la cáscara de banano y estiércol porcino.

En la **TABLA V**, se muestran los resultados de la caracterización físico y químico de los sustratos.

La caracterización de las propiedades físicas, revelaron un valor de ST en el sustrato de estiércol porcino equivalente a 24.25%, valor considerado óptimo para la biodigestión anaerobia, dado que se encuentra dentro del rango recomendado de 15% a 49%, según Gámez *et al.* [78]. Por otro lado, la cáscara de banano mostró un valor de 10.66%, que se encuentra por debajo del rango óptimo. Con respecto a los SV, los resultados mostraron una mayor concentración en el sustrato de la cáscara de banano, con un 80.55%, y con menor concentración en el estiércol porcino con el 70.6%. Estos valores se consideran óptimos según Quilumba [99], dado que menciona que los residuos con un contenido de SV mayor al 60% son una buena opción como sustratos. El parámetro de humedad mostró una superioridad en la cáscara de banano, con un 89.34%, en comparación con el estiércol porcino, que tuvo un 75.74%. Estos resultados son favorables dado que según Mora *et al.* [64], sustratos con valores superiores al 60% de humedad promueven una mayor producción de biogás.

La caracterización de los parámetros químicos, demostraron que el estiércol porcino presenta un pH de 7.4, mientras que la cáscara de banano posee un pH de 4.4. Según lo reportado por Wadi y Seroor [58], indican que el pH óptimo para la generación de biogás se encuentra entre 7 y 8, y los valores de pH inferiores a 6 como en el caso de la cáscara de banano o superiores a 8.5, pueden ralentizar el proceso de biodigestión. Por otra parte, los resultados obtenidos en carbono orgánico y nitrógeno total fueron importante para poder determinar la relación C/N. Estos resultados revelaron que la cáscara de banano maduro presenta la mayor relación C/N con un valor de 29.06, lo que la ubica dentro del rango óptimo (entre 20 y 30), como lo señalan Uddin y Wright [44]. A comparación del estiércol porcino con una relación de C/N de 8.33, por debajo del rango óptimo.

TABLA V. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS SUSTRATOS DE CÁSCARA DE BANANO Y ESTIÉRCOL PORCINO.

Sustrato	Físicos			Químicos			
	%ST	%SV	%Humedad	pH	%C	%N	%C/N
Cáscara de banano	10.66	80.55	89.34	4.4	37.20	1.28	29.06

<b>Estiércol porcino</b>	24.25	70.6	75.74	7.4	11.83	1.42	8.33
--------------------------	-------	------	-------	-----	-------	------	------

### *B. Producción de biogás en los diferentes reactores*

En la **TABLA VI** y en la **Fig. 9**, se evidencia la cantidad de biogás generado durante los 15 días de codigestión anaeróbica para los 5 tratamientos del estudio.

Los resultados demuestran que la proporción de sustrato que genero mayor volumen acumulado de biogás es el reactor 4 con una proporción de 30% CB y 70% EP, alcanzando un valor de 3235 ml. Destacando que el día 2 tuvo la mayor producción diaria de biogás, con un pico de 1000 ml, en comparación al día 5 en donde hubo una ausencia total de biogás. El reactor 2 (70% CB:30% EP) ocupa el segundo lugar con un volumen acumulado de biogás de 2350 ml, siendo el día 1 la mayor producción diaria de biogás con 450 ml, seguido de una disminución en el día 11 con 45 ml. El reactor 3 (50% CB:50% EP) logro alcanzar un volumen de biogás acumulado de 2150 ml, con un pico de producción diario de 1000 ml en el día 2. Sin embargo, este reactor presento la mayor cantidad de días sin producción de biogás en los días 5, 12, 13,14 y 15. El reactor 1 (90% CB:10% EP) obtuvo un volumen acumulado de biogás de 2058 ml, alcanzando una producción diaria considerable de 550 ml en el día 2. No obstante, al igual que el reactor 3, presenta varios días sin producción de biogás en los días 5, 12 y 13. Finalmente, el reactor 5 (10% CB:90% EP) mostro el menor rendimiento, con un volumen de biogás acumulado de 1641 ml y un pico de producción diario de 500 ml en el día 1. Además, en los días 12 y 13 no se registró una generación de biogás. Esto indica que un bajo contenido de CB puede limitar la producción de biogás.

TABLA VI. PRODUCCIÓN DIARIA Y TOTAL DE BIOGÁS POR 15 DÍAS

Días	Volumen de reactores (ml)				
	R1	R2	R3	R4	R5
1	300	450	490	400	500
2	550	300	1000	1000	200
3	500	100	200	875	150
4	350	200	75	150	125
5	0	75	0	0	100
6	60	50	60	30	70
7	50	65	40	60	100
8	55	60	50	70	40
9	75	80	90	100	55
10	25	250	75	90	56
11	40	45	70	80	90
12	0	200	0	180	0
13	0	125	0	100	0
14	35	225	0	80	75

	15	18	125	0	20	80
<b>Volumen total</b>		2058	2350	2150	3235	1641

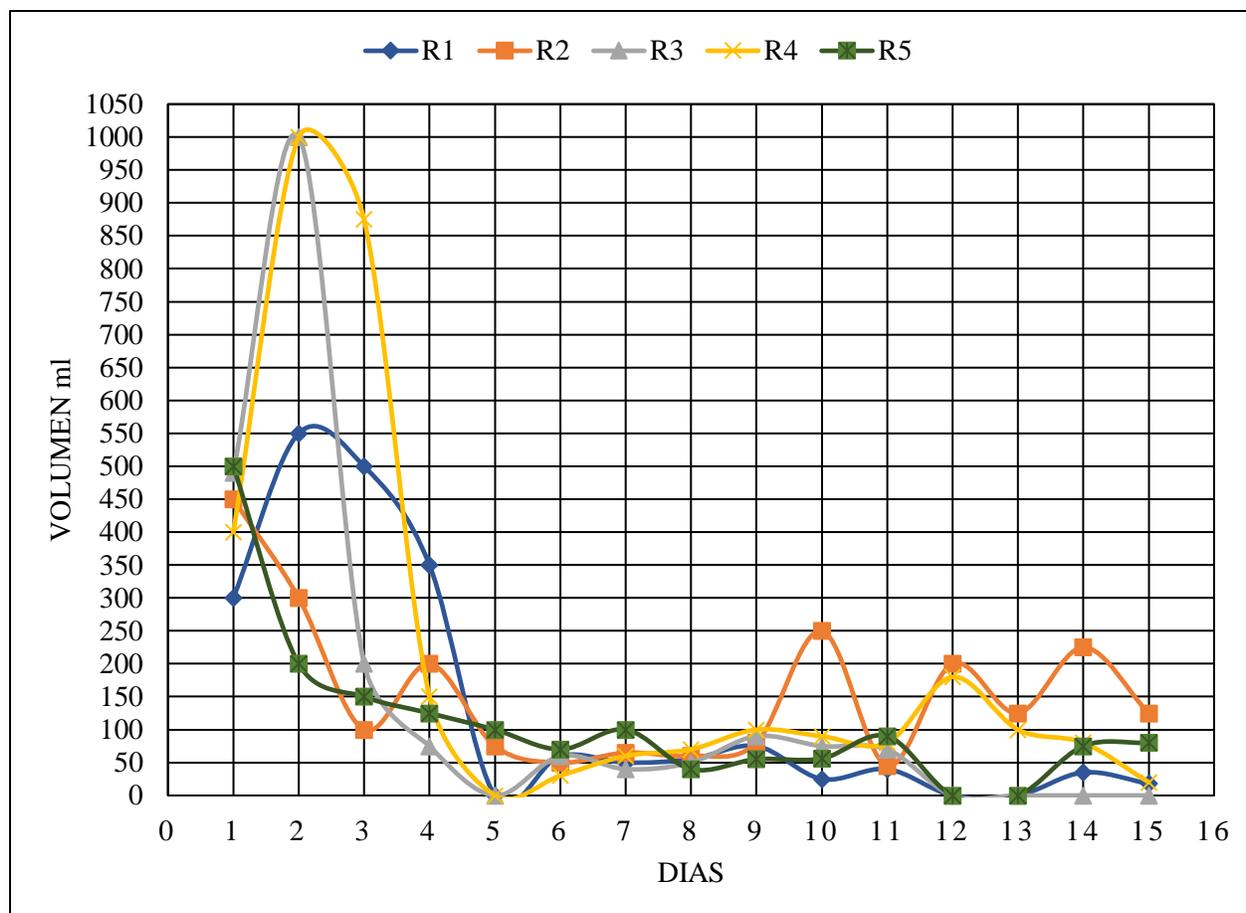


Fig. 9. Tendencia de producción diaria de biogás por 15 días de codigestión y por tratamientos.

El análisis ANOVA (**TABLA VII**) indica que no hay diferencias significativas en el volumen de biogás ( $p = 0,733$ ), dado que el valor  $p$  es mayor al nivel de significancia preestablecido de 0.05. Esta conclusión se basa en la homogeneidad de los datos obtenidos en los diferentes tratamientos, como se muestra en la prueba de homogeneidad de varianza en la **TABLA VIII**, la cual confirma que la varianza entre los grupos es uniforme, dado que el valor también supera el nivel de significancia estándar.

TABLA VII. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) DEL VOLUMEN DEL BIOGÁS

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	92746,587	4	23186,647	0,504	0,733
Dentro de grupos	3223062,000	70	46043,743		
Total	3315808,587	74			

TABLA VIII. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS DEL VOLUMEN DEL BIOGÁS

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Volumen de Biogás	Se basa en la media	2,381	4	70	0,060

*C. Concentración de NH<sub>3</sub> del biogás producido en los diferentes reactores.*

En la **TABLA IX** y en la **Fig. 10**, se puede observar las concentraciones de NH<sub>3</sub> de los diferentes reactores obtenidas mediante el sensor de gas MQ-135. Destacando que el reactor 3 presenta la mayor concentración total de NH<sub>3</sub> con un valor de 5653,95 ppm, alcanzando su máximo generación en el día 1 de 2167,78 ppm. Sin embargo, en los días 5, 12, 13,14 y 15 no hubo generación de NH<sub>3</sub>, debido a la ausencia de producción de biogás. En segundo lugar, se encuentra el reactor 5, con una concentración total de 4101,42 ppm, registrando su mayor generación en el día 1 con 3287,38 ppm, disminuyendo completamente en el día 12 y 13. El reactor 2 logro alcanzar una concentración total de 3913,97 ppm, con un pico máximo en el día 14 de 923,45 ppm y una mínima generación el día 2 con 7,4 ppm. En cuanto el reactor 4, se obtuvo una concentración total de 2772,11 ppm, con una elevada generación en el día 1 de 1748.39 ppm, seguido de una disminución gradual en el día 5. Finalmente, el reactor 1 mostró la menor concentración total de NH<sub>3</sub>, con 171,86 ppm, alcanzando su mayor concentración en el día 3 con 53,58 ppm. No obstante, al igual que los reactores 3 y 5, presentaron varios días sin generación de NH<sub>3</sub> (días 5, 12 y 13), lo que indica una inestabilidad en el proceso.

TABLA IX. CONCENTRACIÓN DIARIA Y TOTAL DE NH<sub>3</sub> POR 15 DÍAS.

Días	Concentración de NH <sub>3</sub> ppm				
	R1	R2	R3	R4	R5
1	7,32	8,8	2167,78	1748,39	3287,38
2	10,56	7,4	1978,0	765,66	595,37
3	53,58	884,9	1433,3	135,17	94,20
4	22,72	35,9	11,9	14,31	44,79
5	0,00	52,6	0,0	0,00	33,79
6	19,74	68,1	26,5	5,79	5,70
7	16,92	93,7	18,6	6,59	6,76
8	6,11	216,0	4,3	5,87	4,71
9	6,78	682,7	4,8	6,53	5,31
10	6,62	239,4	4,5	6,26	5,15
11	7,28	130,6	4,2	5,30	7,64
12	0,00	127,6	0,0	36,54	0,00

13	0,00	93,0	0,0	27,58	0,00
14	4,54	923,45	0,0	4,70	4,21
15	9,67	349,76	0,0	3,42	6,40
<b>NH<sub>3</sub> total</b>	171,86	3913,97	5653,95	2772,11	4101,42

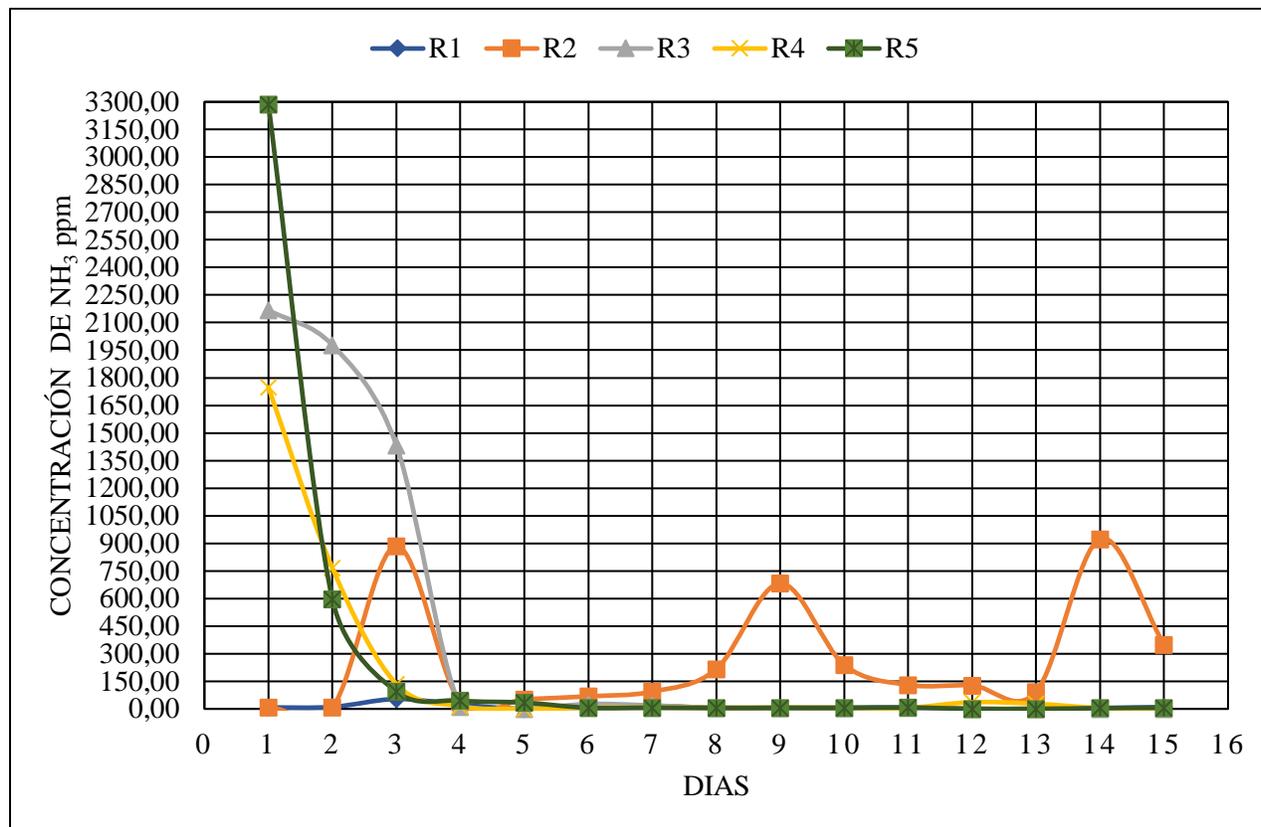


Fig. 10. Tendencia de la concentración diaria de NH<sub>3</sub> durante 15 días.

En la **TABLA X** se presenta el análisis ANOVA de la concentración de amoníaco, obteniendo un valor p de 0,505. Esto señala que no existen diferencias significativas entre las medias de esta variable. La prueba de homogeneidad de varianza, mostrada en la **TABLA XI**, respalda esta conclusión, dado que su valor de 0,053 también se encuentra por encima del nivel de significancia estándar.

TABLA X. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) DE LA CONCENTRACIÓN DE NH<sub>3</sub>

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1108092,452	4	277023,113	0,839	0,505
Dentro de grupos	23109181,087	70	330131,158		
Total	24217273,540	74			

TABLA XI. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS DE LA CONCENTRACIÓN DE NH<sub>3</sub>

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Concentración de NH <sub>3</sub>	Se basa en la media	3,994	4	70	0,053

## IX. DISCUSIÓN

### A. Caracterización física y química de la cáscara de banano y estiércol porcino.

En este estudio, se evaluó la cáscara de banano y el estiércol porcino como sustratos para la producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica. La caracterización física reveló que el % de ST del EP, se considera sustrato óptimo para la biodigestión anaeróbica, tal como lo indican Gámez *et al.* [78], mientras que la CB con un valor de 10.66 %, por debajo del rango óptimo, es una condición limitante para el proceso de la biodigestión. Sin embargo, Gámez *et al* [78], también mencionan que valores inferiores al 15% en residuos vegetales como la CB aún pueden ser factibles como sustratos. Por otro lado, Riya *et al.* [61], advierten que un ST demasiado bajo limita la producción de biogás, mientras que un ST excesivo puede generar AGV he inhibir la actividad microbiana.

En relación al parámetro SV se pudo determinar que los % de CB y el EP, según Quilumba [99], son óptimos para la digestión anaeróbica, dado que los microorganismos productores de biogás utilizan los SV como fuente de energía. Es por ello, que es importante utilizar sustratos que contengan un elevado porcentaje de SV [23].

Los resultados del contenido de humedad para los sustratos analizados son positivos según Mora *et al.* [64], dado que esto propicia un ambiente óptimo para el desarrollo de los microorganismos y una mejor movilidad de las bacterias en los sustratos [100].

En la evaluación química se determinó que el EP presenta un pH ideal, tal como lo indican Wadi y Seroor [58], favoreciendo una mayor actividad microbiana metanogénica responsable de la descomposición de la materia orgánica y la generación de biogás. Por el contrario, la CB con un pH bajo, provoca acidificación en el reactor si se digiere individualmente, disminuyendo el crecimiento de las bacterias metanogénicas y ralentizando la biodigestión. Por ello, Wadi y Seroor [58], sugieren la codigestión anaerobia con estiércol animal, dado que este sustrato al tener un alto contenido de alcalinidad en su composición, favorece a mantener un pH estable.

La relación C/N demostró que la CB es un excelente sustrato para la DA, según Uddin y Wright [44], dado que proporciona una condición ideal para el desarrollo de los microorganismos. Por otro lado, el EP al contener una relación C/N inferior al rango recomendado, genera la formación de amonio, ocasionando efectos tóxicos a la actividad microbiana e inhibiendo la DA [99]. En cambio, Gámez *et al* [78], mencionan que relaciones de C/N, con un valor de 8 o superiores, aun son aceptables para el proceso de la biodigestión.

---

*B. Producción de biogás y concentración total de NH<sub>3</sub> en los diferentes reactores.*

La tendencia presentada en la **Fig. 11** demuestra que no existe una relación directa entre el volumen total de biogás y la concentración de NH<sub>3</sub>. Si bien el R4 presenta la mayor producción de biogás, su composición de NH<sub>3</sub> es relativamente baja en comparación con el R3, que, a pesar de tener un menor volumen de biogás, presenta la concentración de NH<sub>3</sub> más alta. Esta aparente contradicción se debe a las proporciones de CB y EP utilizadas en cada reactor. El R4 con una proporción 30% CB y 70% EP, contribuyó a un equilibrio entre los carbohidratos fácilmente degradables de la CB y los agentes tampón del EP. Estos agentes proporcionaron nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo, creando un ambiente favorable para el crecimiento y la actividad de las bacterias metanogénicas [3][48]. Según Castro *et al.* [101], este equilibrio de nutrientes ayudó a que el pH en el reactor se mantuviera en condiciones adecuadas, entre 6.7 y 7.5, durante todo el proceso de digestión, incrementando la producción de biogás. Tshemese *et al.* [51], mencionan que estas condiciones favorecen a una mejor generación de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, minimizando las concentraciones de NH<sub>3</sub>.

Por otro lado, el R3, con una proporción 50% CB:50% EP, generó condiciones propicias para la actividad de las bacterias acidogénicas [49]. Esto sucede principalmente cuando existe una disminución en la relación C/N en el reactor, resultando en la acumulación de amoníaco y un aumento en los valores de pH, lo cual es tóxico para las bacterias metanogénicas [91]. Esto provocó que se redujera el volumen del biogás, pero incrementando la concentración de NH<sub>3</sub> [49].

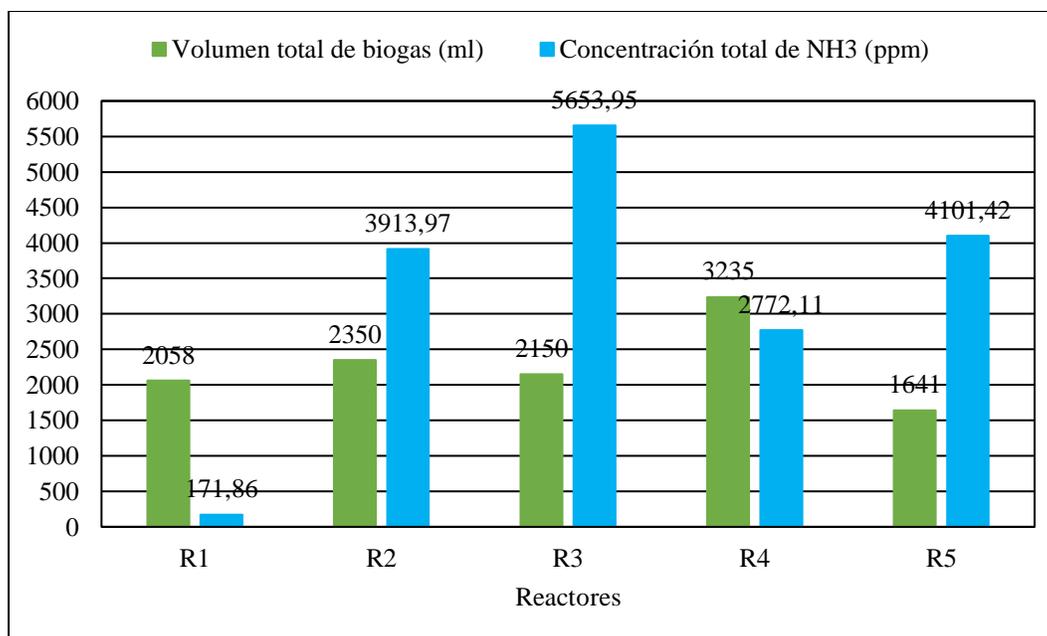


Fig. 11. Tendencias del volumen total de biogás y concentración de NH<sub>3</sub> de los diferentes reactores.

Por otro lado, en el estudio realizado por Zhang *et al* [91], donde utilizaron reactores del mismo volumen (1L) y las mismas proporciones, pero con diferentes tipos de sustratos (paja de trigo y estiércol de cabra), obtuvieron producciones de biogás acumuladas de: R1 (11890 ml), R2 (12765 ml), R3 (11253 ml), R4 (12685 ml) y R5 (9650 ml). Estos volúmenes se atribuyen principalmente a la mejor composición de los sustratos empleados en el estudio, lo que permitió una mayor generación de biogás durante un período de 55 días. A pesar de las diferencias en los volúmenes totales de biogás entre el presente estudio y el nuestro, es importante destacar que ambos estudios coinciden en que la mayor producción de biogás se obtuvo en el R4 con una proporción 30% PT:70% EC y la menor en el R5 con una proporción 10% PT:90% EC.

Por su parte Plascencia [100], evaluó la codigestión anaeróbica de estiércol de vaca y residuos de frutas y vegetales en una proporción 25%EV:75%RV, empleando un reactor de 30L de capacidad. Bajo estas condiciones, obtuvo un volumen total de biogás de 600 ml, con una concentración de NH<sub>3</sub> de 7000 ppm durante 28 días. Este resultado representa un valor superior en comparación con los obtenidos en el presente estudio, lo que sugiere que la codigestión con este tipo de sustratos puede mejorar la producción de NH<sub>3</sub>. En cambio, el trabajo realizado por Zeeman *et al.* [102], donde empleó un biodigestor semicontinuo de un volumen de 120 litros, utilizando solamente estiércol de vaca como sustrato por un tiempo de retención de 40 días, logró generar una concentración de NH<sub>3</sub> de 1700 ppm. Resultado considerablemente menor a la obtenida por los

estudios anteriores, lo que podría atribuirse que la ausencia de residuos vegetales en la mezcla de sustratos, pudo haber afectado al contenido de  $\text{NH}_3$ .

El análisis de varianza (ANOVA) no mostró diferencias relevantes en el volumen de biogás ni en la concentración de  $\text{NH}_3$  entre los tratamientos evaluados. Esto se respalda por el valor del nivel de significancia, que se encuentran por encima del valor estándar comúnmente utilizado (0.05). Este resultado concuerda con la prueba de homogeneidad, la cual también indica que las medias de los resultados obtenidos no presentan diferencias significativas. Sin embargo, es importante considerar que la falta de significancia no necesariamente significa que no haya ningún efecto real. En este caso, el R4, que, a pesar de no presentar una diferencia estadísticamente significativa con respecto a los demás tratamientos, produjo el mayor volumen de biogás. De igual manera, el R3, si bien no presenta diferencias significativas, generó la mayor concentración de  $\text{NH}_3$ .

## X. CONCLUSIONES

La caracterización física y química de la CB y el EP es fundamental para evaluar su potencial en la generación de biogás. Los resultados indicaron que la mayoría de los parámetros analizados se encontraron dentro de las condiciones óptimas para el proceso de DA descritas en investigaciones previas. No obstante, se observan tres aspectos que requieren atención, los parámetros de ST y pH de la CB, así como la relación C/N del EP, tienen rangos que están por debajo de los valores considerados óptimos, lo que podría generar dificultades si se emplean estos sustratos de forma individual. Por ello, la codigestión de la CB con el EP es recomendada, dado que permite equilibrar estos parámetros y favorecer un proceso de DA más estable y eficiente.

La investigación ha demostrado que la proporción óptima para la producción de biogás se encuentra en el reactor con 30% de cáscara de banano (CB) y 70% de estiércol porcino (EP). Este equilibrio permite una mayor disponibilidad de nutrientes esenciales que favorecen la actividad de las bacterias metanogénicas, resultando en un volumen de biogás significativamente mayor en comparación con otras proporciones. La correcta mezcla de los sustratos es importante para optimizar la eficiencia del proceso anaeróbico.

No se observó una relación directa entre el volumen de biogás producido y la concentración de  $\text{NH}_3$ . Aunque el reactor 4 tuvo la mayor producción de biogás, su concentración de  $\text{NH}_3$  fue relativamente baja. En contraste, el reactor 3 (50% CB y 50% EP) tuvo una menor producción de biogás, pero presentó la mayor concentración de  $\text{NH}_3$ , sugiriendo que diferentes proporciones de sustratos pueden influir en la composición química del biogás producido.

La contaminación generada por el estiércol porcino y las cáscaras de banano en el sector agrícola y alimentario es un desafío ambiental significativo debido a su potencial para causar eutrofización y emitir gases de efecto invernadero. Sin embargo, estos residuos pueden ser transformados en recursos valiosos mediante tecnologías adecuadas, como la producción de biogás y fertilizantes orgánicos a partir del estiércol y el compostaje de las cáscaras de banano. Además, la generación de amoníaco, un subproducto de la descomposición del estiércol, ofrece múltiples aplicaciones industriales, desde la fabricación de fertilizantes hasta su uso en refrigeración y como combustible alternativo. Así, la correcta gestión de estos residuos no solo reduce la contaminación, sino que también contribuye a la sostenibilidad y fomenta la economía circular al convertir los desechos en recursos valiosos.

## XI. RECOMENDACIONES

Una vez obtenidos los resultados de esta investigación como recomendaciones se puede considerar las siguientes:

- Es adecuado caracterizar y monitorear la temperatura en los sustratos utilizados en los biodigestores para asegurar que se mantenga en un rango óptimo que favorezca la supervivencia y actividad de las bacterias metanogénicas, y se pueda lograr una producción eficiente y constante de biogás.
- Es importante caracterizar la microbiología en los sustratos utilizados, para lograr determinar los tipos, porcentajes o población de bacterias presentes en el proceso de generación de biogás, especialmente aquellas responsables de la producción de amoníaco. Este conocimiento permitirá optimizar el proceso y mejorar la eficiencia de la generación de biogás.
- Es aconsejable realizar estudios adicionales utilizando diferentes tipos de residuos orgánicos y ajustar las proporciones de los mismos para encontrar combinaciones que maximicen tanto la producción de biogás como la calidad del mismo.
- Es crucial continuar con el enfoque de esta investigación sobre la generación de biogás, en específico la generación de amoníaco, ya que es un subproducto de la descomposición del estiércol, puede ser aprovechada de varias maneras. El amoníaco puede ser utilizado en la fabricación de fertilizantes nitrogenados, esenciales para la agricultura. También es un precursor en la producción de explosivos, plásticos y otros productos químicos industriales. Además, el amoníaco tiene aplicaciones en sistemas de refrigeración y como combustible alternativo en motores de combustión interna.

## REFERENCIAS

- [1] W. Czekala, M. Nowak, and W. Bojarski, "Characteristics of Substrates Used for Biogas Production in Terms of Water Content," 2023. doi: 10.3390/fermentation9050449.
- [2] United Nations, "Renewable energy – powering a safer future," Climate Action. Accessed: Feb. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>
- [3] T. Sayara and A. Sánchez, "A review on anaerobic digestion of lignocellulosic wastes: Pretreatments and operational conditions," 2019. doi: 10.3390/app9214655.
- [4] Agrocalidad, "Acciones para prevenir el ingreso de *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Raza 4 tropical (Foc R4T)," Quito - Ecuador, 2023. Accessed: Jan. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2023/11/Boletin-anual-FocR4T-2023.-Jul-SepL1-1-1.pdf>
- [5] A. B. Guerrero, P. L. Aguado, J. Sánchez, and M. D. Curt, "GIS-Based Assessment of Banana Residual Biomass Potential for Ethanol Production and Power Generation: A Case Study," *Waste Biomass Valorization*, vol. 7, no. 2, 2016, doi: 10.1007/s12649-015-9455-3.
- [6] S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. 2018. doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0.
- [7] One Planet Network, "Economía Circular de los residuos orgánicos para la ciudad y el campo," One Planet Network. Accessed: Feb. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.oneplanetnetwork.org/knowledge-centre/resources/economia-circular-de-los-residuos-organicos-para-la-ciudad-y-el-campo#:~:text=En%20el%20mundo%20se%20generan,a%C3%B1o%20son%20residuos%20org%C3%A1nicos%20biodegradables>.
- [8] R. Flores Varela, L. Barrios Rentería, and G. J. De la Torre Pérez, "Deterioro ambiental: una investigación sobre el consumo excesivo de recipientes de un solo uso (unicel) en la Universidad de Sonora," *Revista Vértice Universitario*, 2020, doi: 10.36792/rvu.vi86.21.
- [9] A. Rodríguez Guerra and K. A. Baca Cajas, "Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU): análisis de una década de gestión en países de Europa y América," *Rev Ecuat Med Cienc Biol*, vol. 43, no. 1, 2022, doi: 10.26807/remcb.v43i1.919.
- [10] I. R. Abubakar *et al.*, "Environmental Sustainability Impacts of Solid Waste Management Practices in the Global South," 2022. doi: 10.3390/ijerph191912717.

- 
- [11] T. Sayara and A. Sánchez, “Gaseous emissions from the composting process: Controlling parameters and strategies of mitigation,” 2021. doi: 10.3390/pr9101844.
- [12] J. Ferrer Gutiérrez, J. Marcheno Revilla, S. Blacio Toro, and T. Vera Infante, “Localización y producción potencial de una planta de pirolisis para la valorización de residuos agrícolas,” *Polo del Conocimiento*, vol. 5, no. 12, pp. 265–278, 2020, doi: 10.23857/pc.v5i12.2046.
- [13] A. J. Haro Velasteguí, Borja Arévalo. Angélica E, and S. Y. Triviño Bloisse, “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, no. 2, pp. 506–525, 2017, doi: 10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.2.esp.506-525.
- [14] J. B. Zhiminaicela Cabrera, J. N. Quevedo Guerrero, and R. M. García Batista, “La producción de banano en la Provincial de El Oro y su impacto en la agrobiodiversidad,” *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, vol. 3, no. 3, 2020.
- [15] 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.”
- [16] C. C. R. Mesías. Gabriela Castro, “Programa Nacional de Estadística 2017 - 2021,” *Instituto Nacional de Estadística y Censos.*, 2017.
- [17] T. Cueva Navia, F. Arteaga, E. Hurtado, A. Garcia, and C. Barba, “Nuevas Estrategias Para La Mejora Del Sector Porcino: Sostenibilidad Y Bienestar Animal,” 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/329566948>
- [18] M. Ávila-Hernández, R. Campos-Rodríguez, L. Brenes-Peralta, and M. F. Jiménez-Morales, “Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago,” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 31, no. 2, p. 159, Jun. 2018, doi: 10.18845/tm.v31i2.3633.
- [19] John Alejandro Ariza Martínez, Ricardo Antonio Sanabria Velandia, Germán López Martínez, and Luisa Marina Gómez Torres., “Propuesta para el tratamiento de porcinaza generada en la granja porcicola, ‘El encanto’ ubicada en San Juan de Rioseco,” *Conciencia Tecnológica*, 2017.
- [20] L. C. Jorge Antonio Hilbert, “Potencial integral nacional y provincial de biogás y su relación con las NDC de Argentina y los ODS,” *ResearchGate*, 2022.

- 
- [21] C. N. Mama, A. C. Grace, C. I. Chukwu, and M. C. Hephzibah, "Evaluation of Biogas Production from the Digestion of Swine Dung, Plantain Peel and Fluted Pumpkin Stem," *International Journal of Civil, Mechanical and Energy Science*, vol. 5, no. 2, pp. 14–23, 2019, doi: 10.22161/ijcmes.5.2.3.
- [22] U. C. C and O. L. O, "PRODUCTION OF BIOGAS FROM PLANTAIN PEELS," *Research Journal in Engineering and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 145–150, [Online]. Available: [www.emergingresource.org](http://www.emergingresource.org)
- [23] M. Cordelia Nnennaya, G. Alamba Chinemerem, C. Chukwu Igwe, and Hephzibah. Maduka Chidinma, "Evaluation of Biogas Production from the Digestion of Swine Dung, Plantain Peel and Fluted Pumpkin Stem," *International Journal of Civil, Mechanical and Energy Science*, vol. 5, no. 2, 2019, doi: 10.22161/ijcmes.5.2.3.
- [24] C. Robles Algarin and O. Rodríguez Álvarez, "Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia," p. 10, 2018.
- [25] José María Rincón Martínez and Eduardo Electo Silva Lora, "Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad," 2020.
- [26] J. O. Ortega, K. M. González, and E. H. Tibanta, "Las Energías Renovables y la Sostenibilidad en Territorio," *Dominio de las Ciencias*, vol. 8, no. 2, 2022.
- [27] "International Renewable Energy Agency (IRENA)." Accessed: Mar. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.irena.org/>
- [28] "Energía Eléctrica y Energías Renovables," Administración de Comercio Internacional. Accessed: Mar. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>
- [29] "Energía renovable en Ecuador," Genera Renovables. Accessed: Mar. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/>
- [30] J. P. León Ajila, M. A. Espinosa Aguilar, H. R. Carvajal Romero, and J. Quezada Campoverde, "Análisis de la producción y comercialización de banano en la provincia de El Oro en el periodo 2018-2022," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 1, 2023, doi: 10.37811/cl\_rcm.v7i1.4981.

- 
- [31] J. H. Vera Rodríguez *et al.*, “Valoración nutricional de los residuos orgánicos de banano en el cantón La Troncal, Ecuador,” *Revista Universitaria del Caribe*, vol. 26, no. 01, 2021, doi: 10.5377/ruc.v26i01.11882.
- [32] G. Mejía and J. Gómez, “Los desechos generados por la industria bananera colombiana,” *Seminario Internacional Gestión de residuos sólidos y peligrosos, Siglo XXI*, 2010.
- [33] W. M. Hikal *et al.*, “Banana Peels: A Waste Treasure for Human Being,” 2022. doi: 10.1155/2022/7616452.
- [34] J. A. Serna Jiménez, F. Luna Lama, Á. Caballero, M. de los Á. Martín, A. F. Chica, and J. Á. Siles, “Valorisation of banana peel waste as a precursor material for different renewable energy systems,” *Biomass Bioenergy*, vol. 155, 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106279.
- [35] A. Gutiérrez Villanueva, C. Guirola Céspedes, A. C. Armas Martínez, Y. Albernas Carvajal, and G. Villanueva Ramos, “Valorización De La Lignina En El Concepto De Biorrefinería (I),” *Revista Centro Azucar*, vol. 47, no. 4, 2020.
- [36] A. Atilgan, A. Krakowiak Bal, H. Ertop, B. Saltuk, and M. Malinowski, “The Energy Potential of Waste from Banana Production: A Case Study of the Mediterranean Region,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 14, 2023, doi: 10.3390/en16145244.
- [37] M. Mujtaba *et al.*, “Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics,” 2023. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136815.
- [38] Ecuador, “Constitución de la Republica del Ecuador.” Accessed: Mar. 06, 2024. [Online]. Available: [https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador\\_act\\_ene-2021.pdf](https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf)
- [39] Ministerio del Ambiente, “Código Orgánico de Ambiente .” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu167116.pdf>
- [40] Ministerio del Ambiente, “Reglamento al Código Orgánico del Ambiente.” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu196276.pdf>
- [41] Ministerio del Ambiente, “Acuerdo Ministerial No. 061, Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria.” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu155124.pdf>

- 
- [42] Ministerio del Ambiente, “Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente Libro VI Anexo 6.” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6078/55/LIBRO%20VI%20Anexo%206%20MAnejo%20desechos%20solido%20no%20peligrosos.pdf>
- [43] S. O’Connor, E. Ehimen, S. C. Pillai, A. Black, D. Tormey, and J. Bartlett, “Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms,” 2021. doi: 10.1016/j.rser.2020.110580.
- [44] M. M. Uddin and M. M. Wright, “Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances,” *Physical Sciences Reviews*, vol. 8, no. 9, 2022, doi: 10.1515/psr-2021-0068.
- [45] E. A. Economou, G. Dimitropoulou, N. Prokopidou, I. Dalla, and T. Sfetsas, “Anaerobic Digestion Remediation in Three Full-Scale Biogas Plants through Supplement Additions,” *Methane*, vol. 2, no. 3, 2023, doi: 10.3390/methane2030018.
- [46] D. I. Massé and R. L. Droste, “Comprehensive model of anaerobic digestion of swine manure slurry in a sequencing batch reactor,” *Water Res*, vol. 34, no. 12, pp. 3087–3106, 2000, doi: 10.1016/S0043-1354(00)00064-6.
- [47] D. M. Kirk and M. C. Gould, “Bioenergy and anaerobic digestion,” in *Bioenergy: Biomass to Biofuels and Waste to Energy*, D. Anju, Ed., 2020, pp. 335–360. doi: 10.1016/B978-0-12-815497-7.00017-8.
- [48] N. Nwokolo, P. Mukumba, K. Oibileke, and M. Enebe, “Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production,” 2020. doi: 10.3390/pr8101224.
- [49] A. Adeniyi, I. Bello, T. Mukaila, N. C. Sarker, and A. Hammed, “Trends in Biological Ammonia Production,” 2023. doi: 10.3390/biotech12020041.
- [50] D. De La Merced Jiménez, “Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo,” Universidad Veracruzana, Ciudad en México, 2012. Accessed: Feb. 09, 2024. [Online]. Available: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/31560/delamercedjimenezdiego.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [51] Z. Tshemese, N. Deenadayalu, L. Z. Linganiso, and M. Chetty, “An Overview of Biogas Production from Anaerobic Digestion and the Possibility of Using Sugarcane Wastewater and Municipal Solid Waste in a South African Context,” 2023. doi: 10.3390/asi6010013.

- 
- [52] Y. Li *et al.*, “Impact of Varying Mass Concentrations of Ammonia Nitrogen on Biogas Production and System Stability of Anaerobic Fermentation,” *Agriculture (Switzerland)*, vol. 13, no. 8, 2023, doi: 10.3390/agriculture13081645.
- [53] L. Toma, G. Voicu, M. Ferdes, and M. Dinca, “Animal manure as substrate for biogas production,” in *Engineering for Rural Development*, 2016.
- [54] E. Stenhouse, “What Is Manure? Why Is It Such an Environmentally Valuable Material?,” *Treehugger Sustainability for All*. Accessed: Jan. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.treehugger.com/what-is-manure-5201379>
- [55] J. M. Pinos Rodríguez, J. C. García López, L. Y. Peña Avelino, J. A. Rendón Huerta, C. González González, and F. Tristán Patiño, “Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de américa,” *Agrociencia*, vol. 46, no. 4, 2012.
- [56] A. A. Werkneh, “Biogas impurities: environmental and health implications, removal technologies and future perspectives,” 2022. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10929.
- [57] M. R. Atelge *et al.*, “Biogas Production from Organic Waste: Recent Progress and Perspectives,” *Waste Biomass Valorization*, vol. 11, no. 3, 2018, doi: 10.1007/s12649-018-00546-0.
- [58] R. M. Wadi and K. A. Seroor Atalah, “Main Factors Affecting the Production of Biogas during Anaerobic Digestion Process,” *Web of Synergy*, vol. 21, no. 8, 2023, [Online]. Available: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- [59] S. S. Bhajani and S. L. Pal, “Review: Factors Affecting Biogas Production,” *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, vol. 10, no. 2, pp. 79–88, Feb. 2022, doi: 10.22214/ijraset.2022.40192.
- [60] J. Yi, B. Dong, J. Jin, and X. Dai, “Effect of increasing total solids contents on anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions: Performance and microbial characteristics analysis,” *PLoS One*, vol. 9, no. 7, 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0102548.
- [61] S. Riya, K. Suzuki, L. Meng, S. Zhou, A. Terada, and M. Hosomi, “The influence of the total solid content on the stability of dry-thermophilic anaerobic digestion of rice straw and pig manure,” *Waste Management*, vol. 76, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.02.033.
- [62] N. Ren, M. Liu, A. Wang, J. Ding, and H. Li, “Organic acids conversion in methanogenic-phase reactor of the two-phase anaerobic process,” *Huanjing Kexue/Environmental Science*, vol. 24, no. 4, 2003.

- 
- [63] A. J. Kang and Q. Yuan, “Enhanced Anaerobic Digestion of Organic Waste,” in *Solid Waste Management in Rural Areas*, 2017. doi: 10.5772/intechopen.70148.
- [64] J. Mora Aguirre and J. León López, “Evaluación De La Producción De Biogás A Partir Del Estiércol Vacuno Recolectado En La Finca La Carbonera,” Fundación Universidad de América, Bogota, 2020. Accessed: May 11, 2024. [Online]. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7780/1/6131976-2020-1-IQ.pdf>
- [65] N. K. Yadav and A. K. Singh, “Factors affecting biogas production during anaerobic digestion – a review,” *International Journal of Creative Research Thoughts*, vol. 6, no. 2, 2018.
- [66] A. K. Singh *et al.*, “Sustainable Utilization of Biowaste Resources for Biogas Production to Meet Rural Bioenergy Requirements,” 2023. doi: 10.3390/en16145409.
- [67] F. Kenmogne, A. Abanda, M. M. Arnold, W. A. Donda, U. N. Yemetio, and E. Yamb, “Review, Design and artisanal fabrication of anaerobic bio-digester for biodegradable waste,” *KFokam Journal of Applied Science & Technology*, vol. 3, pp. 1–32, 2023, [Online]. Available: [www.kfokam-jast.org](http://www.kfokam-jast.org)
- [68] R. H. G. de Jesus, J. T. de Souza, F. N. Puglieri, C. M. Piekarski, and A. C. de Francisco, “Biodigester location problems, its economic–environmental–social aspects and techniques: Areas yet to be explored,” 2021. doi: 10.1016/j.egy.2021.06.090.
- [69] M. A. Baballe, U. Y. Magashi, B. I. Garko, A. A. Umar, Y. R. Magaji, and M. Surajo, “Automatic Gas Leakage Monitoring System Using MQ-5 Sensor,” *Review of Computer Engineering Research*, vol. 8, no. 2, 2021, doi: 10.18488/journal.76.2021.82.64.75.
- [70] N. Morales, “Investigación Exploratoria: Tipos, Metodología y Ejemplos,” *Lifeder*, 2015, Accessed: Jul. 08, 2024.
- [71] R. Hernández, C. Fernández, and P. Baptista, “Metodología de la investigación (1ra edición),” *Mc Graw Hill*, 1991, Accessed: Jul. 08, 2024. [Online]. Available: [https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n\\_Sampieri.pdf](https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n_Sampieri.pdf)
- [72] S. Bell, “Experimental Design,” in *International Encyclopedia of Human Geography*, Elsevier, 2009, pp. 672–675. doi: 10.1016/B978-008044910-4.00431-4.

- 
- [73] Lady Viteri Vega and R. Arizaga Gamboa, “Producción de biogás a partir de residuos orgánicos de frutas y hortalizas generados en el mercado Gómez Rendón,” Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil - Ecuador, 2020. Accessed: Apr. 22, 2024. [Online]. Available:  
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/VITERI%20VEGA%20LADY%20LISBETH.pdf>
- [74] C. Buritica Ramírez, “Manejo integral del estiércol porcino para la adecuada fertilización de las praderas de un hato lechero en el municipio de Bello (Hacienda la Pradera),” Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid , Medellín, 2007. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.elpoli.edu.co/server/api/core/bitstreams/99eae697-fc67-4e38-abca-964ded55553b/content>
- [75] K. Jiménez Ronquillo and D. Arcos Jácome, “Evaluación de la producción de biogás a partir de estiércol bovino y cascarilla de arroz (*Oryza sativa*), sector la Matilde - Salitre,” Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil - Ecuador, 2020. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available:  
<file:///C:/Users/HP/Downloads/JIMENEZ%20RONQUILLO%20KAREN%20SHAKIRA.pdf>
- [76] N. N. Romero Velásquez, “Valorización Energética de Cáscaras de Banano Productivo de Fábrica ‘Diana Food’ generadas del Proceso ,” Universidad de Espíritu Santo, Samborondón, 2022. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.uees.edu.ec/bitstream/123456789/3441/1/Romero%20VELASQUEZ.pdf>
- [77] J. I. Nwankwo, “Production of Biogas from Plantain Peels and Swine Droppings,” *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences (IOSR-JPBS)*, vol. 9, no. 5, pp. 50–60, 2014, [Online]. Available: [www.iosrjournals.org](http://www.iosrjournals.org)50
- [78] C. Gámez, M. Lozano, C. A. Cervera, and J. A. Quintero, “Producción de biogás a partir de procesos de digestión y codigestión anaerobia usando estiércol de cerdo y residuos vegetales,” *RedBioLAC*, vol. 6, no. 1, 2022.
- [79] E. Zagal and A. Sadzwaka, “Protocolo de Métodos de Análisis para suelos y lodos,” Chillán - Chile, 2007. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: [https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/METODOS\\_LODOS\\_SUELOS.pdf](https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/METODOS_LODOS_SUELOS.pdf)

- 
- [80] T. Menta, "Evaluation of Biogas Production from the Co-Digestion of Banana Fruit Peels and Poultry Manure," *Journal of Energy Technologies and Policy*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: 10.7176/jetp/10-2-03.
- [81] K. Ejiroghene Orhororo, P. Okechukwu Ebunilo, and G. Ejuvwedia Sadjere, "Experimental Determination of Effect of Total Solid (TS) and Volatile Solid (VS) on Biogas Yield," *American Journal of Modern Energy*, vol. 3, no. 6, 2017, doi: 10.11648/j.ajme.20170306.13.
- [82] H. Ruíz Quintero and F. Becerra Roa, "Evaluación fisicoquímica del método de calcinación como alternativa ambiental de reducción del volumen de lodos de aguas residuales de una industria de curtido de San Benito," Universidad de La Salle, Bogota, 2016. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1014&context=ing\\_ambiental\\_sañitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1014&context=ing_ambiental_sañitaria)
- [83] J. García Galvis and M. I. Ballesteros González, "Evaluación de parámetros de calidad para la determinación de carbono orgánico en suelos," *Revista Colombiana de Química*, vol. 34, no. 2, 2005.
- [84] J. Izquierdo Bautista and J. J. Arévalo Hernández, "Determinación de la materia orgánica del suelo (MOS) por el método químico y por calcinación," *Revista Ingeniería y Región*, vol. 26, 2021.
- [85] W. F. Allen, "A micro-Kjeldahl method for nitrogen determination," *Oil & Fat Industries*, vol. 8, no. 10, 1931, doi: 10.1007/BF02640022.
- [86] PanReac Applichem, "Determinación de nitrógeno por el Método Kjeldahl," 2011. Accessed: Apr. 29, 2024. [Online]. 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)
- [87] C. Cespedes, "Bases técnicas para la producción de compost.," 2004. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6129/NR32011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [88] CTNNPAP, "Humus de lombriz (Lombricomposta) especificaciones y métodos de prueba," 2007. Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2007/nmx-ff-109-scfi-2008.pdf>

- 
- [89] S. Yen, T. Preston, and N. Thi Thuy, “Producción de biogás a partir de desechos vegetales combinados con estiércol de cerdos o búfalos en un sistema de biodigestores in vitro,” *Universidad Svay Rieng (SRU)*, 2017, Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: [https://www.redbiocol.org/wp-content/uploads/2020/04/Producci%C3%B3n-de-biog%C3%A1s-a-partir-de-desechos-vegetales-combinados-con-esti%C3%A9rcol-de-cerdos-o-b%C3%BAfalos-en-un.-1-docx.pdf?utm\\_source=mailpoet&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=v-boletin-informativo-redbiocol-2020\\_7](https://www.redbiocol.org/wp-content/uploads/2020/04/Producci%C3%B3n-de-biog%C3%A1s-a-partir-de-desechos-vegetales-combinados-con-esti%C3%A9rcol-de-cerdos-o-b%C3%BAfalos-en-un.-1-docx.pdf?utm_source=mailpoet&utm_medium=email&utm_campaign=v-boletin-informativo-redbiocol-2020_7)
- [90] L. D. Gonzales Calva and J. D. Zuma Lalangui, “Valorización del raquis de banano mediante su codigestión anaerobia con residuos sólidos urbanos para la obtención de bioenergía,” Universidad Técnica de Machala, Machala - Ecuador, 2021. Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/17357>
- [91] T. Zhang *et al.*, “Biogas Production by Co-Digestion of Goat Manure with Three Crop Residues,” *PLoS One*, vol. 8, no. 6, 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0066845.
- [92] E. Indiveri, “Biodigestor. Manual de uso,” 2015. Accessed: Apr. 10, 2024. [Online]. Available: <https://imd.uncuyo.edu.ar/upload/manual-uso-biodigestor.pdf>
- [93] Y. El-Hadidi, M. El-Bakhshwan, and M. Mohamed, “Effect of High Total Solids Concentration on Biogas Production from Cattle Dung,” *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, vol. 7, no. 10, pp. 783–792, 2016, doi: 10.21608/jssae.2016.40465.
- [94] J. Zuma Lalangui, A. Camacho Vásquez, J. Acaro Espinoza, and H. Romero Bonilla, “Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos mediante su co-digestión anaerobia con cáscara de banano maduro,” *Conference Proceedings UTMACH*, vol. 2, no. 1, 2017, Accessed: Apr. 19, 2024. [Online]. Available: <https://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/article/view/290>
- [95] A. Pinzón, M. Castillo, E. González, J. Araúz, and V. Villarreal, “Sistema de detección de sustancias y partículas contaminantes para el ambiente a través de sensores arduino,” *Revista de Iniciación Científica*, vol. 4, no. 1, 2018, doi: 10.33412/rev-ric.v4.1.1868.
- [96] J. S. Dagnino, “Análisis de varianza,” *Revista Chilena de Anestesia*, vol. 43, pp. 306–310, 2014, doi: 10.2307/j.ctvvn8k0.7.

- 
- [97] J. C. Correa, R. Iral, and L. Rojas, “Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza,” *Rev Colomb Estad*, vol. 29, no. 1, pp. 57–76, 2006.
- [98] B. Beers, “P-Value: What It Is, How to Calculate It, and Why It Matters,” Investopedia. Accessed: May 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.investopedia.com/terms/p-p-value.asp>
- [99] B. Quilumba Chorlando, “Evaluación de la producción de biogás al mezclar estiércol vacuno con residuos orgánicos urbanos de Pedro Moncayo mediante digestión anaerobia,” Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2021. Accessed: May 11, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/11197/2/03%20IER%20010%20TRA%20BAJO%20GRADO.pdf>
- [100] C. E. Plascencia Rosales, “Estudio de codigestión de residuos orgánicos agroindustriales para la producción y uso de biogás,” Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Santiago de Querétaro, 2014. Accessed: Jun. 20, 2024. [Online]. Available: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/331/1/Estudio%20de%20codigesti%C3%B3n%20de%20residuos%20org%C3%A1nicos%20agroindustriales%20para%20la%20producci%C3%B3n%20y%20uso%20de%20bi%C3%B3gas.pdf>
- [101] R. Castro, M. M. Solís, V. Chicatto, and A. Solís, “Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.),” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 36, no. 3, pp. 529–539, 2020, [Online]. Available: <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.53545>
- [102] G. Zeeman, W. M. Wiegant, M. E. Koster-Treffers, and G. Lettinga, “The influence of the total-ammonia concentration on the thermophilic digestion of cow manure,” *Agricultural Wastes*, vol. 14, no. 1, pp. 19–35, 1985, doi: 10.1016/S0141-4607(85)80014-7.

## ANEXOS

## Anexo A. Determinación de parámetros físicos y químicos



## Anexo B. Resultados del análisis de carbono orgánico y nitrógeno total de los sustratos en el laboratorio NEMALAB.

CLIENTE : JIMENEZ ROMERO JAHIR HUGO	N° DE DOCUMENTO: 62000	CLIENTE : JIMENEZ ROMERO JAHIR HUGO	N° DE DOCUMENTO: 62000
REMITENTE: SR.JAHIR JIMENEZ R	FECHA/MUESTREO: 15/04/2.024	REMITENTE: SR.JAHIR JIMENEZ R	FECHA/MUESTREO: 15/04/2.024
PROPIEDAD: UTMACH	FECHA / INGRESO: 15/04/2.024	PROPIEDAD: UTMACH	FECHA / INGRESO: 15/04/2.024
LUGAR : MACHALA - EL ORO	FECHA SALIDA : 20/04/2.024	LUGAR : MACHALA - EL ORO	FECHA SALIDA : 20/04/2.024

**RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO**

COD. LAB.	IDENTIFICACION MUESTRA	%	
		Nitrogeno Total	Carbono
4557	ESTIERCOL DE CERDO	1,42	11,83

Metodología utilizada  
Nitrogeno total : Micro Kjeldahl  
Carbono : Walkey Black

BIOQ. MARTHA MOREIRA  
JEFE LABORATORIO

  
**NEMALAB**  
Laboratorio de análisis agrícola

ING. MARGARITA PASTOR  
SERV. AL CLIENTE

" ESTOS RESULTADOS PUEDEN SER SUJETOS DE COMPARACION SIEMPRE Y CUANDO SE UTILICE LA MISMA METODOLOGIA USADA EN ESTE LABORATORIO "

"Una Agricultura sostenida, amiga del Medio Ambiente, es nuestro compromiso con la Humanidad"

*Anexo C. Construcción de los reactores con botellas de polietileno recicladas de un 1 litro de capacidad.*



*Anexo D. Preparación de los sustratos para los reactores*



*Anexo E. Peso de las proporciones de los sustratos*



*Anexo F. Preparación de los reactores con los sustratos*



*Anexo G. Reactores son sus diferentes proporciones de sustratos*



*Anexo H. Monitoreo del volumen del biogás con bolsas de propileno esterilizadas de 500 ml.*



*Anexo I. Análisis de la composición del biogás utilizando un sensor de gas MQ-135 y el software Arduino IDE 2.3.2.*

