



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS
Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**“OPTIMIZACIÓN DE PRODUCCIÓN DE BIOMETANO A PARTIR DE
RESIDUOS SÓLIDOS Y LÍQUIDOS”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA AGROINDUSTRIAL**

**Línea de investigación: Gestión, producción, productividad, innovación y
desarrollo socioeconómico.**

AUTOR:

WENDY NAYELI SALAZAR CABASCANGO

DIRECTOR:

ING. JUAN CARLOS DE LA VEGA QUINTERO MSc.

Ibarra – Ecuador

2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1005094147		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Salazar Cabascango Wendy Nayeli		
DIRECCIÓN:	San Miguel Arcángel		
EMAIL:	wosalazarc@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0969576848

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Optimización de producción de biometano a partir de residuos sólidos y líquidos
AUTOR (ES):	Wendy Nayeli Salazar Cabascango
FECHA: DD/MM/AAAA	11/11/2025
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Agroindustrial
DIRECTOR:	Ing. Juan Carlos de la Vega Quintero MSc.

2. **CONSTANCIAS**

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo, sin los derechos de autores terceros, por lo tanto, la obra es original y es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 11 días del mes de noviembre del 2025

EL AUTOR:



Wendy Nayeli Salazar Cabascango

C.I.: 1005094147

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 11 días de noviembre del 2025

Ing. Juan Carlos de la Vega Quintero MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



(f).....

Ing. Juan Carlos de la Vega Quintero MSc.

C.C:1002958856

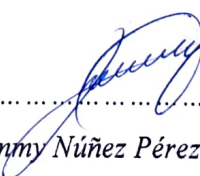
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular "Optimización de la producción de biometano a partir de residuos sólidos y líquidos" elaborado por Salazar Cabascango Wendy Nayeli previo a la obtención del título de Ingeniera en Agroindustria, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte.

(f) 

Ing. Juan Carlos de la Vega Quintero MSc.

C.C: 1002958856

(f) 

Ing. Jimmy Núñez Pérez MSc.

C.C: 1756606339

PRESENTACIÓN

Yo, WENDY NAYELI SALAZAR CABASCANGO como autora de la Tesis Titulada **“OPTIMIZACIÓN DE PRODUCCIÓN DE BIOMETANO A PARTIR DE RESIDUOS SOLIDOS Y LÍQUIDOS”**, me hago responsable de los resultados, discusión, conclusiones y demás parte de la investigación; y pongo este documento como fuente de apoyo para consultas dirigidas a todos los estudiantes.

AGRADECIMIENTO

*A mis padres, Rosita y Luis, a mi hermana, Elizabeth y mi sobrino Alejandro.
Agradezco su aliento constante y su amor que ha sido una motivación invaluable.*

*A mis amigas y amigos, gracias por todo lo bueno que compartimos
y por ser el puerto seguro en esta segunda casa que fue la universidad.*

*Mi más sincero agradecimiento a mi director, Ing. Juan Carlos de la Vega
y asesor Ing. Jimmy Nuñez, por su guía constante, su paciencia
y sus valiosas enseñanzas durante la ejecución de esta investigación.*

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, por iluminarme en los momentos de duda y permitirme alcanzar cada uno de mis objetivos

Dedicada con mucho amor y cariño a mis padres, Rosita y Luis. Por su apoyo incondicional y amor eterno, sus enseñanzas han sido mi pilar y mi inspiración a lo largo de este viaje académico.

A mi hermana Elizabeth, mi mejor aliada, por apoyarme y ser mi fuente de alegrías. A mi sobrino Alejandro, por recordarme siempre la pureza y la ternura de la vida.

Con inmensa gratitud, les dedico este trabajo a ustedes, mi refugio y mi eterna fuente de inspiración.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 PROBLEMA.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 Objetivo General.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos	6
1.5 HIPÓTESIS	6
1.5.1 Hipótesis Nula	6
1.5.2 Hipótesis Alternativa	6
2 CAPITULO II.....	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	7
2.1.1 Etapas del Proceso Anaeróbico.....	7
2.2 ASPECTOS GENERALES DEL BIOGÁS.....	8
2.3 BIOMETANO: PROCESO DE OBTENCIÓN Y RELEVANCIA AMBIENTAL.....	8
2.4 FACTORES DETERMINANTES EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	8
2.4.1 Cáscaras de Plátano	9
2.4.2 Melaza de Caña de Azúcar	9
2.4.3 Inóculo microbiano.....	9
2.4.4 Influencia de la temperatura	10

2.4.5	Rango de pH	10
2.4.6	Contenido de Sólidos Totales	10
2.4.7	Contenido de Sólidos Volátiles.....	11
2.4.8	Demanda química de oxígeno	11
2.4.9	Relación carbono/nitrógeno.....	11
2.5	SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRUEBA DE POTENCIAL DE METANO (AMPTS II)	12
2.6	OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DE BIOMETANO	12
2.6.1	Modelo Modificado de Gompertz	13
2.7	MÉTODOS ESTADÍSTICOS DE VALIDACIÓN.....	13
2.7.1	Coefficiente de determinación (R^2)	13
2.8	ESTIMACIÓN TEÓRICA DE BIOMETANO.....	14
CAPITULO III		15
MATERIALES Y MÉTODOS		15
3.1	DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
3.1.1	Enfoque de la Investigación	15
3.1.2	Tipo de Investigación	15
3.1.3	Diseño de la Investigación.....	15
3.2	PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	16
3.2.1	Obtención y caracterización fisicoquímica de la materia prima.....	16
3.2.2	Determinación de la condición de generación óptima de metano a partir de residuos sólidos y líquidos a través del Modelo Modificado de Gompertz.....	20
3.2.3	Comparación de la producción experimental de biometano obtenida a través del equipo AMPTS II con la producción teórica estimada mediante cálculos estequiométricos.	21
3.3	OBTENCIÓN, TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	22
3.3.1	Diseño experimental	22
3.3.2	Elaboración e instalación del sistema.....	23

CAPÍTULO IV	25
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO LAS CÁSCARAS DE PLÁTANO, MELAZA DE CAÑA DE AZÚCAR E INÓCULO MICROBIANO.	25
4.2 DETERMINACIÓN DE LA CONDICIÓN DE GENERACIÓN ÓPTIMA DE METANO A TRAVÉS DEL MODELO MODIFICADO DE GOMPERTZ.	28
4.2.1 Análisis estadístico	29
4.3 COMPARACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE BIOMETANO OBTENIDA A TRAVÉS DEL EQUIPO AMPTS II CON LA PRODUCCIÓN TEÓRICA ESTIMADA MEDIANTE CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS.	30
4.3.2 Determinación de la fórmula empírica de los sustratos.	30
CAPÍTULO V	34
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34
5.1 Conclusiones	34
5.2 Recomendaciones	34
BIBLIOGRAFÍA	35
ANEXOS	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición del biogás	8
Tabla 2. Métodos para la caracterización de la materia prima	16
Tabla 3. Diluciones preparadas para el análisis de DQO	18
Tabla 4. Niveles del factor en estudio	23
Tabla 5. Resultados del análisis fisicoquímico de la materia prima	25
Tabla 6. Resultados del análisis elemental	27
Tabla 7. Composición química de la cáscara de plátano	31
Tabla 8. Composición química de la melaza de caña de azúcar	31
Tabla 9. Composición química del inóculo microbiano.....	31
Tabla 10. Resultados experimentales y teóricos de producción de metano	32
Tabla 11. Productividad.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia.....	7
Figura 2. Sistema automático de prueba de potencial de metano.....	12
Figura 3. Diagrama de flujo.....	23
Figura 4. Volumen de biometano producido en el nivel 5	28
Figura 5. Curvas de producción acumulada de metano: observado vs. Gompertz	29

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Volumen de biometano producido en el nivel 1 (0 % CP y 100 % M)	42
Anexo 2. Volumen de biometano producido en el nivel 2 (25 % CP y 75 % M)	42
Anexo 3. Volumen de biometano producido en el nivel 3(50 % CP y 50 % M)	43
Anexo 4. Volumen de biometano producido en el nivel 4 (75 % CP y 25 % M)	43
Anexo 5. Sistema automático de prueba de potencial de metano	44

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo optimizar la producción de biometano a partir de residuos sólidos y líquidos mediante digestión anaerobia. Para ello, se co-digerieron cáscaras de plátano y melaza de caña de azúcar, utilizando estiércol bovino adaptado como inóculo. Los sustratos fueron caracterizados en términos de composición físico química y elemental. La digestión anaerobia se llevó a cabo en un sistema AMPTS II bajo condiciones mesofílicas (37 °C, pH inicial 7,5), empleando un diseño experimental de mezclas con cinco proporciones de cáscara de plátano/melaza (0:100, 25:75, 50:50, 75:25 y 100:0).

La cáscara de plátano demostró el mayor potencial metanogénico, alcanzando un volumen experimental de 1400 Nml CH₄ en el tratamiento 5 (100 % cáscara de plátano). La cinética de producción se modeló utilizando la ecuación de Gompertz modificada ($R^2 = 0.98$), obteniendo un potencial máximo de producción de 1405,05 Nml CH₄, una tasa máxima de producción de 291,41 Nml CH₄ d⁻¹ y un tiempo de latencia de 5,04 días. No obstante, se observó una discrepancia significativa entre los rendimientos experimentales y los valores teóricos calculados mediante estequiometría, atribuible a limitaciones operacionales.

Los resultados validan la viabilidad de la cáscara de plátano, en combinación con un inóculo microbiano adaptado, como sustrato para la producción de biometano. Esta estrategia representa una alternativa sostenible para la valorización de residuos agroindustriales.

Palabras clave: Digestión anaerobia, biometano, cáscara de plátano, melaza de caña de azúcar, inóculo microbiano, modelo de Gompertz modificado, AMPTS II.

ABSTRACT

The objective of this study was to optimize biomethane production from solid and liquid waste through anaerobic digestion. Banana peels and sugarcane molasses were co-digested using adapted bovine manure as inoculum. The substrates were characterized in terms of physical, chemical, and elemental composition. Anaerobic digestion was carried out in an AMPTS II system under mesophilic conditions (37 °C, initial pH 7.5), using a mixed experimental design with five banana peel/molasses ratios (0:100, 25:75, 50:50, 75:25, and 100:0).

Banana peel demonstrated the highest methanogenic potential, reaching an experimental volume of 1400 Nml CH₄ in treatment 5 (100% banana peel). Production kinetics were modeled using the modified Gompertz equation ($R^2 = 0.98$), obtaining a maximum production potential of 1405.05 Nml CH₄, a maximum production rate of 291.41 Nml CH₄ d⁻¹, and a lag time of 5.04 days. However, a significant discrepancy was observed between experimental yields and theoretical values calculated using stoichiometry, attributable to operational limitations.

The results validate the viability of banana peel, in combination with an adapted microbial inoculum, as a substrate for biomethane production. This strategy represents a sustainable alternative for the valorization of agroindustrial waste.

Keywords: Anaerobic digestion, biomethane, banana peel, sugarcane molasses, microbial inoculum, modified Gompertz model, AMPTS II.

LISTA DE SIGLAS

AMPTS II: Sistema automático de prueba de potencial de metano

BPM: Potencial bioquímico de metano

CH₄: Metano

CP: Cáscaras de plátano

DQO: Demanda química de oxígeno

M: Melaza

ST: Sólidos totales

SV: Sólidos volátiles

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Los residuos agroindustriales constituyen un desafío ambiental significativo en la actualidad. Según Romero (2022), estos se generan en las diferentes etapas del proceso productivo agrícolas, así como en procesos de transformación. Varias investigaciones, refieren el uso de distintos residuos agroindustriales para producir biogás, de acuerdo a lo manifestado por Lopez & Borzacconi (2017), el biometano es una fuente de energía renovable procedente de la descomposición de materia orgánica por parte de las bacterias metanogénicas. Algunos estudios han demostrado que la producción de biometano puede tener un impacto significativo no solo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también promover la economía circular al transformar los residuos en una valiosa fuente de energía renovable (Wasajja et al., 2020).

González et al. (2015), realizaron la prueba de potencial bioquímico de metano (BPM), e indicaron que este representa el índice de biodegradabilidad anaerobia de los residuos orgánicos que determina el valor experimental de producción máxima de metano generado con una cantidad conocida de residuos. Compararon el potencial de producción de metano durante la digestión anaerobia de residuos de mango, de papaya y de plátano; los tratamientos incluyeron la adición de un inóculo microbiano. Dando como resultado que el residuo de plátano tuvo 139 g de DQO/l, este valor fue mayor que el obtenido en los residuos de papaya y de mango, siendo así, que estos residuos pueden ser aprovechados como materia prima en la digestión anaerobia para producir biogás y posteriormente metano.

De acuerdo a la investigación de Beteta et al. (2022), determinaron el potencial de reaprovechamiento de la cáscara de plátano para obtener biogás bajo condiciones anaerobias utilizando un diseño experimental aplicado. Constituido por un testigo (cáscaras de plátano) y un tratamiento (inóculo microbiano y cáscaras de plátano) por vía anaerobia, presentó su estabilidad a sólo un día de haber sido insertado en el biodigestor, llegando a generar 67,62 ml BG/gSV y 59,80 ml CH₄/gSV.

Joute et al. (2016), investigaron la codigestión anaeróbica semi-continua de estiércol bovino y residuos de plátano en condiciones mesofílicas, utilizando reactores de

tanque agitado continuo para evaluar siete mezclas con distintas proporciones. Los resultados demostraron que la mezcla óptima fue 40 % estiércol bovino y 60 % residuos de plátano, mismo que alcanzo un rendimiento máximo de metano de 229 ml CH₄/g SV y una biodegradabilidad del 86% la codigestión mejoró la carga orgánica tratada y mantuvo la estabilidad del pH y la alcalinidad, representando una solución viable para el aprovechamiento energético de residuos agrícolas y contribuyendo a la producción sostenible de biogás.

Arotingo et al. (2023), se centra en la evaluación de la acumulación de biometano a partir de diversas mezclas de suero y melaza de caña de azúcar mediante procesos de codigestión a anaeróbica. El estudio evaluó la cinética de acumulación de biometano utilizando seis modelos cinéticos y los resultados indicaron que el modelo modificado de primer orden y el modelo modificado de Gompertz de dos fases fueron los mejores para ajustar los datos experimentales, con valores de $R^2 \geq 0,949$. Estos modelos representaron con precisión la producción acumulada de biometano a partir de varias mezclas y mostraron un mejor rendimiento en comparación con el modelo de primer orden de múltiples etapas. El estudio destacó el potencial de la melaza de caña de azúcar para la producción de metano en comparación con el suero, y observo una disminución en la acumulación de metano en la mezcla 50:50, potencialmente atribuida a la reabsorción de biometano debido a las fluctuaciones de temperatura.

Camacho et al., (2017), en su investigación evaluaron la utilización de estiércol de vaca como inóculo durante el arranque de un sistema de digestión anaerobia termófila seca (DATS). Los resultados obtenidos durante la aclimatación demostraron que el estiércol de vaca empleado como inóculo microbiano presenta una elevada actividad metanogénica con un tiempo de aclimatación de cerca de 15 días. Es por ello que el uso de inóculos en digestión anaerobia ha demostrado ser una práctica beneficiosa, acortando los períodos de producción de metano e incrementando la eficiencia del proceso. En este sentido el estiércol de vaca ha sido objeto de estudio como inóculo microbiano, siendo así una opción factible en la búsqueda de alternativas sustentables.

El estudio de Moharir et al. (2020), evaluó la digestión anaerobia de estiércoles de vaca y caballo, encontrando que el estiércol de caballo generó significativamente más biogás (35.366 cm³) en 14 días. Los datos fueron modelados con los modelos de Gompertz modificado, logístico y cinético de primer orden, de los cuales los dos primero

ajustaron mejor los datos (R^2 de 0.98 y 0.97). El modelo de Gompertz modificado se identificó como el más adecuado para estimar el potencial de producción debido a su precisión en predecir la fase de latencia y ajuste de curvas.

El estudio de Owamah et al. (2020), examinó el efecto de la codigestión anaeróbica de plumas de pollo y estiércol de caballo sobre la producción de biogás y la cinética de rendimiento. Se llevaron a cabo ocho diseños experimentales usando ocho digestores idénticos con replicación. Los resultados mostraron que la producción promedio de biogás para los digestores con diferentes proporciones de plumas de pollo y estiércol de caballo varió, y se observaron diferencias significativas para algunas combinaciones. El modelo modificado de Gompertz reveló que la pluma de pollo tuvo efectos negativos sobre el total de biogás producido, el rendimiento máximo específico de biogás y la latencia.

1.2 PROBLEMA

A nivel global, la generación de residuos agroindustriales ha experimentado un notable incremento, impulsada por el crecimiento de la producción destinada al mercado. Según Organización de las Naciones Unidas, cada año se recolectan en el mundo una cantidad estimada de 11,200 millones de toneladas de residuos sólidos y según el Banco Mundial, los desechos a nivel global crecerán un 70 % para el 2050, a menos que se adopten medidas urgentes (Kaza et al., 2018).

Con base en Riera et al. (2018), Ecuador genera un estimado de 2,2 millones de toneladas anuales de residuos agroindustriales, compuestos principalmente de materiales lignocelulósicos o con alto contenido de almidón. Esto representa una abundante fuente de materia prima con potencial para el desarrollo de productos sostenibles, biotecnológicos e innovadores.

Los residuos generados como subproductos de las actividades agroindustriales tienen un impacto significativo en la contaminación ambiental cuando no son sometidos a un adecuado tratamiento. De acuerdo con Morales et al. (2019), generan malos olores, proliferación de ratas e insectos, emisiones de gases de efecto invernadero y hasta la contaminación de recursos hídricos. En este contexto, la inadecuada gestión de residuos puede generar problemas ambientales, lo que ha intensificado la preocupación por la

preservación del entorno. Ante ello, se han desarrollado diversas alternativas para capitalizar el potencial de estos residuos, entre ellas, la producción de biometano.

El cultivo de plátano, en sus distintas variedades, es uno de los más significativos en Ecuador. Según lo señalado por Guerrero et al. (2016), una parte considerable del fruto es descartada cuando no cumple con los estándares de calidad exigidos para su comercialización o exportación. Además, se genera una cantidad significativa de residuos orgánicos, especialmente frutos y cáscaras, como resultado del consumo en distintos entornos como mercados, restaurantes, hogares y centros educativos. De acuerdo con el estudio de Solano et al. (2022), se estima que por cada tonelada de fruto producido se generan aproximadamente 480 kg de hojas, 160 kg de tallo, 3 t de pseudotallo y 440 kg de cáscara. Dentro de los distintos subproductos derivados de este cultivo que pueden ser aprovechados en procesos de digestión a anaerobia para la generación de biogás y, posteriormente, de biometano, las cáscaras de plátano surgen como una alternativa viable y prometedora. Tal como indican Alvarado *et al.* (2022), entre las partes de la planta que han sido evaluadas para este propósito se incluyen el pseudotallo, las hojas, los frutos descartados y las cáscaras.

Por otro lado, los residuos generados en la producción de caña de azúcar son diversos e incluyen bagazo, vinaza y melaza, entre otros. De acuerdo con García et al. (2022), se estima que por cada 1,000 kg de azúcar producida se generan entre 30 y 65 t de residuos. El Ingenio Azucarero del Norte, ubicado en la provincia de Imbabura, en el proceso de producción de azúcar genera como residuo melaza aproximadamente 39,40 kg/t de caña, destacando su uso como alimento para animales en la fabricación de piensos, lo que evidencia su valor nutritivo y potencial de reutilización en otras aplicaciones, incluyendo su posible uso como sustrato en procesos de producción de biogás.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El biogás es una fuente de energía renovable que se produce durante la digestión anaerobia de materiales orgánicos. La tecnología de producción de biogás no solo constituye una fuente viable para la generación de biocombustible, sino que también puede ser una medida de mitigación de los diversos contaminantes ambientales (Prifti & Floqi, 2021).

La gestión inadecuada de residuos agroindustriales representa un desafío significativo que trae consigo repercusiones ambientales (Morales et al., 2019). Este contexto resalta la importancia de abordar el problema desde una perspectiva de sostenibilidad y eficiencia en la gestión de residuos, la conversión de residuos agroindustriales en biogás mediante digestión anaerobia ofrece una solución prometedora para mitigar los impactos ambientales negativos.

En Ecuador, el cultivo de plátano genera una considerable cantidad de residuos que pueden ser aprovechados para este fin, especialmente las cáscaras de plátano, que presentan una composición química adecuada para la producción de biogás. Así el uso de cáscaras de plátano y otros residuos como la melaza de caña de azúcar no solo ofrece una vía para la gestión sostenible de residuos. Sino que también contribuye a la economía circular y a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles. Además, el uso de inóculos microbianos, como el estiércol de vaca, ha mostrado mejorar la eficiencia del proceso, reduciendo los tiempos de producción de metano y aumentando su rendimiento (Moharir et al., 2020).

Juntamente con la Unidad Ambiental, específicamente el departamento de Residuos sólidos de Imbabura, se garantizará el sustento institucional de esta investigación en cuanto a la proporción de información de residuos generados. De esta manera, la implementación de estas soluciones innovadoras y sostenibles contribuye a la preservación del medio ambiente u ofrece un alternativa viable y ecológica para la producción de energía, destacando la relevancia de este enfoque en la búsqueda de un desarrollo sostenible.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Optimizar la producción de biometano a partir de residuos sólidos y líquidos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar mediante análisis físico químico las cáscaras de plátano, melaza de caña de azúcar e inóculo microbiano.
- Determinar la condición de generación óptima de metano a partir de residuos sólidos y líquidos a través del modelo modificado de Gompertz.
- Comparar la producción experimental de metano obtenida a través del equipo AMPTS II con la producción teórica estimada mediante cálculos estequiométricos.

1.5 HIPÓTESIS

1.5.1 Hipótesis Nula

La mezcla de cáscaras de plátano y melaza no aumenta significativamente la eficiencia de la producción de biometano.

1.5.2 Hipótesis Alternativa

La mezcla de cáscaras de plátano y melaza aumentan significativamente la eficiencia de la producción de biometano.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

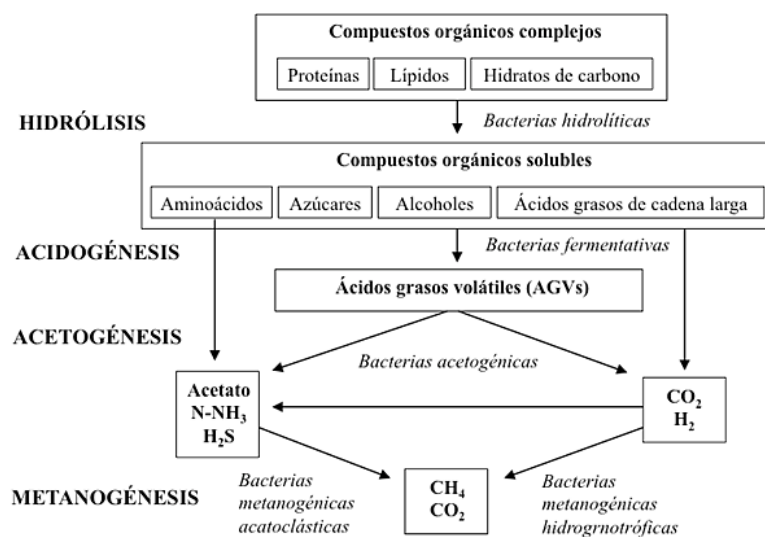
2.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso biológico, que ocurre en ausencia de oxígeno y se desarrolla en varias etapas, cada una de ellas mediada por distintas poblaciones de microorganismos. A través de este mecanismo se logra la descomposición y transformación de la fracción orgánica presente en los residuos, dando como resultado biogás. A diferencia de tratamientos aerobios, este proceso ofrece ventajas significativas y la posibilidad de recuperar la energía en forma de metano (Solano et al., 2022).

2.1.1 Etapas del Proceso Anaeróbico

Durante el proceso de digestión anaerobia participan varios grupos de microorganismos que llevan a cabo un metabolismo coordinado de cuatro etapas, tales como se muestra en la figura 1. La primera etapa es la hidrólisis, en la cual los compuestos orgánicos complejos presentes en los residuos son descompuestos en moléculas más simples; la segunda es la acidogénesis, que produce ácidos orgánicos; la tercera es la acetogénesis, caracterizada por la formación de acetatos, propionatos, y finalmente, la cuarta etapa es la metanogénesis, donde microorganismo producen metano (González et al., 2015).

Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia



Fuente: (Fernández, 2016)

2.2 ASPECTOS GENERALES DEL BIOGÁS

El biogás es un subproducto generado del proceso de fermentación de la materia orgánica mediante acción microbiana en condiciones anaeróbicas. Está compuesto por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) seguido de otros gases en menor proporción (Veana et al., 2019). En la tabla 1 se establece la composición del biogás.

Tabla 1. *Composición del biogás*

Componente	Rango de concentración (% en volumen)
Metano	50 – 75 %
Dióxido de carbono	25 – 50 %
Ácido sulfúrico	0 – 1 %
Hidrógeno y nitrógeno	0 – 3 %

2.3 BIOMETANO: PROCESO DE OBTENCIÓN Y RELEVANCIA AMBIENTAL

Al someter el biogás a un proceso de purificación, se obtiene biometano con características similares al gas natural. De acuerdo con (SUEZ, 2024), el biometano es una forma purificada y enriquecida de biogás, con un contenido de metano de al menos el 95 %. Esta transformación no solo permite su aprovechamiento como fuente de energía limpia, sino que también contribuye de manera significativa a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Fuji Electric France, n.d.).

2.4 FACTORES DETERMINANTES EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Existen factores clave que se deben considerar al realizar la digestión anaerobia, debido a que los microorganismos encargados de la descomposición son sensibles a las variaciones en su entorno. La mayoría de los investigadores miden el rendimiento de un sistema anaerobio a través de la cantidad de metano generado (Quilumba, 2021). Por ello resulta fundamental controlar las condiciones y variables.

Entre estas variables una de las más relevantes es el tipo de sustrato, ya que influye directamente en la eficiencia con la que los compuestos orgánicos son transformados, debido a su composición química, biodegradabilidad y disponibilidad de nutrientes

esenciales para los microorganismos, en este estudio se consideraron la cáscara de plátano, la melaza de caña de azúcar además de la adición de un inóculo microbiano, que de acuerdo a Camacho et al. (2017), asegura la eficiencia y estabilidad de la digestión anaerobia.

2.4.1 Cáscaras de Plátano

Las cáscaras de plátano contienen compuestos químicos como celulosa y hemicelulosa que a su vez contienen compuestos orgánicos ácidos que pueden ser empleados eficazmente como sustrato para la producción de biogás. Estos residuos lignocelulósicos representan una fuente viable de materia orgánica para procesos de digestión anaerobia (Rahim et al., 2019).

2.4.2 Melaza de Caña de Azúcar

Es un producto líquido, denso y viscoso de color marrón oscuro derivado de la caña de azúcar (de Vasconcelos, 2015). Debido a su alto contenido de azúcares reductores, aproximadamente un 48 %, lo que le confiere una elevada carga orgánica fácilmente biodegradable, favoreciendo la producción de biogás (Palomino et al., 2016). Además de que representa una fuente de carbono rica que puede ser transformada en metano mediante la acción microbiana en condiciones anaerobias (Cueva et al., 2023).

2.4.3 Inóculo microbiano

El inóculo microbiano está compuesto de comunidades de microorganismos degradadores provenientes de un proceso anaerobio previamente estabilizado, que se incorporan al sustrato dentro del reactor o digester (Sandoval et al., 2020). Los mismos persisten en un entorno controlado de carácter biológico, químico y físico y hacen que el tiempo de obtención de metano sea menor, optimizando operaciones durante el proceso de digestión anaerobia (Castro et al., 2020).

- Estiércol bovino

De acuerdo con Benítez et al. (2020), el estiércol de ganado vacuno se genera en grandes cantidades y es una fuente valiosa de microorganismos metanogénicos y otras comunidades microbianas esenciales para la digestión anaerobia, por lo que se utiliza comúnmente como inóculo en el arranque de estos procesos. Además, el estiércol bovino

presenta una alta actividad metanogénica y una buena relación carbono/nitrógeno, lo que favorece la degradación eficiente de la materia orgánica durante la digestión (Bernal & Orozco, 2019)

2.4.4 Influencia de la temperatura

La temperatura es un parámetro importante ya que influye considerablemente en el crecimiento y supervivencia de los microorganismos (R. Parra, 2015a). En el proceso de digestión anaerobia la etapa más importante es la metanogénesis ya que es donde la materia orgánica es transformada en metano (Arotingo, 2023). El control de temperatura en el proceso de digestión anaerobia es importante ya que permite preservar la viabilidad de las bacterias involucradas, en condiciones mesofílicas (Cirino & Reyes, 2023).

Parra et al. (2014), indican que la actividad de las bacterias metanogénicas en la digestión anaeróbica se produce en condiciones mesofílicas, siendo la temperatura de 37 °C la ideal para la fermentación, dentro de un rango operativo de 20 a 42 °C. En concordancia, Marín & Castro, (2016), describe la digestión anaeróbica como un proceso que opera de manera óptima en el rango de temperatura mesófila de 35 a 40 °C, corroborando la eficacia de 37 °C a través de evaluaciones experimentales.

2.4.5 Rango de pH

La actividad de las bacterias metanogénicas desempeña un papel crucial en el proceso de digestión anaerobia, ya que está estrechamente influenciada por el nivel de pH del sistema (Liu et al., 2025). Para lograr una biodegradación eficiente y estable, es importante mantener el pH dentro de un rango adecuado, generalmente entre 6 y 8. Sin embargo, se considera que los valores cercanos a la neutralidad, especialmente entre 7 y 7,5 son los más favorables para el desarrollo óptimo de los microorganismos involucrados (Cirino & Reyes, 2023; Rojas et al., 2019).

2.4.6 Contenido de Sólidos Totales

Los sólidos totales representan la cantidad total de materia seca presente en el sustrato, constituyendo un parámetro clave dentro del proceso de digestión anaerobia, ya que de ellos depende la actividad y movilidad de las bacterias metanogénicas. A medida que aumenta la concentración de sólidos, la movilidad de los microorganismos

responsables de la producción de metano se ve restringida, lo que puede afectar negativamente la eficiencia del sistema (Varnero, 2011).

2.4.7 Contenido de Sólidos Volátiles

Los sólidos volátiles representan la materia orgánica biodegradable que los microorganismos pueden convertir en biogás. Es por ello por lo que la degradación de ST y SV durante el proceso permite evaluar el grado de descomposición de a materia orgánica, siendo un indicador fundamental para determinar la eficiencia del sistema de digestión anaerobia (Varnero, 2011).

2.4.8 Demanda química de oxígeno

La DQO representa la cantidad total de oxígeno requerida para llevar a cabo la oxidación de la materia orgánica e inorgánica en un sustrato (Paques Technologies, n.d.). Este parámetro tiene una relación directa con el potencial de generación de biogás, ya que una mayor DQO implica una mayor concentración de compuestos susceptibles de ser transformados en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) mediante digestión anaerobia. Por esta razón, la DQO se emplea como indicador clave para detectar posibles desequilibrios en la composición del sustrato y mantener la estabilidad del proceso biológico (BESEL, 2007; Durán et al., 2018).

2.4.9 Relación carbono/nitrógeno

Determina el equilibrio nutricional necesario para el crecimiento y actividad de los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica. El carbono es la principal fuente de energía para estos microorganismos, mientras que el nitrógeno es esencial para la síntesis de proteínas y la reproducción microbiana (CITOLIVA, 2024).

Se considera que una relación carbono/nitrógeno óptimo para la digestión anaerobia oscila entre 20:1 y 30:1, ya que dentro de este rango favorece el crecimiento microbiano y la descomposición eficiente de la materia orgánica. Si la relación es demasiado alta es decir hay exceso de carbono, se ralentiza la degradación de materia prima y reduce producción la producción de biogás. Por el contrario si la relación es demasiado baja es decir exceso de nitrógeno, provoca la acumulación de amoníaco que puede resultar tóxico, además de que puede llegar a inhibir completamente el proceso (CITOLIVA, 2024;Parra et al., 2019).

2.5 SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRUEBA DE POTENCIAL DE METANO (AMPTS II)

Para el proceso de digestión anaerobia propuesto se utilizará el equipo AMPTS II ha sido desarrollado para mediciones en línea de flujos ultrabajos de biogás y biometano producidos a partir de digestión anaerobia de cualquier sustrato biológico degradable, tanto en forma sólida como líquida a escala laboratorio (BPC Instruments AB, 2021), este equipo cuenta con tres unidades principales tal como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Sistema automático de prueba de potencial de metano



El sistema AMPTS II consta de una unidad de incubación de muestras, en la que se incuban 15 reactores que contienen las muestras con inoculo microbiano a una temperatura controlada; estos reactores se agitan mediante un rotador de baja velocidad que permite la producción continua de biogás. El biogás generado en cada reactor es conducido hacia la unidad de absorción de CO₂, donde atraviesa una solución alcalina que retiene los gases ácidos, como el dióxido de carbono (CO₂) y el sulfuro de hidrógeno (H₂S), mediante reacción con hidróxido de sodio (NaOH), permitiendo que únicamente el metano (CH₄) pase al dispositivo de medición. Finalmente, el dispositivo de medición del volumen de gas opera bajo el principio de desplazamiento y flotabilidad del líquido, y está acoplado a un sistema integrado de adquisición de datos que registra, muestra y analiza los resultados obtenidos (BPCInstruments AB, 2021).

2.6 OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DE BIOMETANO

La optimización de las condiciones de la digestión anaeróbica de residuos sólidos y líquidos representa un factor crítico para maximizar la producción de biogás y metano y de esta manera garantizar la estabilidad operativa y la eficiencia del proceso (Cisneros et al., 2021). En este contexto, el modelado matemático emerge como una herramienta analítica indispensable en la investigación de la digestión anaeróbica, proporcionando

información sobre la predicción de la producción de metano, la optimización de parámetros operativos y validación de los resultados experimentales (Al-Hamamre et al., 2025).

2.6.1 Modelo Modificado de Gompertz

El modelo modificado de Gompertz es una herramienta prevalente en estudios de digestión anaeróbica, particularmente para la modelación del crecimiento microbiano y la actividad metabólica durante la producción de biogás y metano (Lima et al., 2018; López et al., 2021). Este modelo matemático describe la cinética de producción de biogás considerando tres parámetros fundamentales: el potencial máximo de producción (G_0), la tasa máxima de producción de metano (R_m) y el tiempo de latencia (λ), que cuantifica la fase inicial para la aclimatación bacteriana o el tiempo mínimo requerido para la producción de biogás (Alharbi & Alkathami, 2024; Al-Hamamre et al., 2025)

2.7 MÉTODOS ESTADÍSTICOS DE VALIDACIÓN

Los indicadores de evaluación son parámetros importantes para evaluar el rendimiento del modelo matemático empleado. Según Encina et al. (2023), para la validación son necesarios criterios estadísticos objetivos como el coeficiente de determinación.

2.7.1 Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación mide la proporción de varianza observada en los datos experimentales que explican las predicciones del modelo, proporcionando una métrica global del ajuste del modelo (Al-Hamamre et al., 2025). (Encina et al., 2023), señala que el coeficiente de determinación cuantifica la proporción de la varianza en la variable dependiente que es explicada por el modelo lineal. Los valores de R^2 se encuentran entre 0 a 1 pero su valor se interpreta de la siguiente manera (Sosa, 2021):

- $R^2 < 0$: existe una correlación negativa entre variables
- $R^2 > 0$: presenta una correlación positiva entre variables
- $R^2 = 1$: se observa una correlación perfecta entre variables
- $R^2 = 0$: no existe correlación entre variables

2.8 ESTIMACIÓN TEÓRICA DE BIOMETANO

De acuerdo con Sialve et al. (2009), menciona que, al conocer la composición de la materia orgánica, es posible evaluar los rendimientos teóricos de metano que se pueden esperar del procedimiento de digestión anaeróbica.

La comparación entre la producción experimental y teórica de biometano es fundamental para evaluar la eficiencia del proceso de digestión anaerobio y por ende validar el modelo predictivo descrito en el ítem 2.6.1 (Burboa et al., 2023).

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación tiene como objetivo optimizar la producción de biometano a partir de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia. Se emplearon cáscaras de plátano, melaza de caña como sustratos y estiércol de vaca previamente adaptado con los sustratos que actuó como inóculo microbiano, aplicando un diseño experimental de mezclas. La evaluación de la producción de biometano se realizó con el sistema AMPTS II, y los datos obtenidos se analizaron mediante el modelo modificado de Gompertz, con el fin de identificar la combinación óptima de sustratos.

3.1.1 Enfoque de la Investigación

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, basado en la recolección, el procesamiento y el análisis numérico de datos experimentales. El objetivo es optimizar la producción de biometano a partir de residuos agroindustriales. La respuesta biológica, cuantificada como volumen acumulado de metano, se modela matemáticamente mediante el modelo modificado de Gompertz, permitiendo la identificación de condiciones óptimas para la generación de biometano.

3.1.2 Tipo de Investigación

Es de tipo descriptiva y exploratoria. Se caracteriza por la descripción y comparación de la producción de biometano a partir de distintos residuos agroindustriales. Adicionalmente, busca comprender y modelar el efecto de las proporciones de los sustratos en la generación de metano.

3.1.3 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es de tipo experimental. Se manipularon las variables independientes (proporciones de sustratos, ST, SV, SF, DQO, etc.) para evaluar su efecto sobre la variable dependiente (producción de biometano). La implementación de un diseño experimental y el uso del sistema AMPTS II, permitieron la generación de datos controlados bajo condiciones específicas, estableciendo relaciones causales y

evaluando el impacto de las mezclas de residuos orgánicos en la eficiencia del proceso de digestión anaerobia.

3.2 PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1 Obtención y caracterización fisicoquímica de la materia prima

Los residuos utilizados en esta investigación fueron cáscaras de plátano obtenidas en el mercado mayorista de la ciudad de Ibarra, estiércol de vaca obtenido de una finca ganadera de la misma ciudad y melaza de caña de azúcar adquirida y donada por parte del Ingenio Azucarero del Norte, ubicado en la Panamericana Norte, km 25 vía Tulcán.

La caracterización de la materia prima se realizó en la ciudad de Ibarra, específicamente en las instalaciones del laboratorio de análisis físico químico y microbiológico que se encuentra en el Campus San Vicente de Paul, laboratorio de la carrera de Agroindustria perteneciente a la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Mediante análisis y soporte bibliográfico se determinaron los parámetros para el contenido de sólidos totales, volátiles y fijos, carbohidratos, grasa, demanda química de oxígeno y un análisis elemental que fue realizado en la Universidad Central del Ecuador. La tabla 2 indica la normativa y el método utilizado para cada análisis.

Tabla 2. *Métodos para la caracterización de la materia prima*

Análisis	Normativa	Método
Sólidos totales	NTE INEN 014	APHA 2540 B
Sólidos volátiles	NTE INEN 2153	APHA 2540 E
DQO	NTE INEN 1203	APHA 5520 D
pH	NTE INEN 526	Potenciómetro digital
Análisis elemental		Analizador elemental, Elementar Vario Macro Cube

La materia prima fue tratada previamente en el caso de la cáscara plátano se utilizó el equipo de secado en bandejas a una temperatura de 60 °C, una vez concurrido el tiempo se procedió a moler hasta obtener un polvo fino, por otro lado la melaza se calentó a fuego lento hasta su concentración y caramelización, manteniéndola entre 110 y 120 °C hasta alcanzar una consistencia sólida, posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente y

se trituró manualmente con un mortero, finalmente el inóculo microbiano fue secado en una estufa a 60 °C, una vez seco, se trituró manualmente con mortero. Dichos procedimientos se realizaron para su posterior caracterización fisicoquímica.

3.2.1.1 Determinación de sólidos totales

Una vez obtenida la materia prima e insumos, se procedió a la preparación de los crisoles, los cuales fueron sometidos a 105 °C en una estufa durante 30 minutos para eliminar el agua higroscópica. Posteriormente, se dejaron en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente y, una vez estabilizados, se pesaron en vacío, registrando los valores obtenidos. Luego, se añadieron 5 g de muestra y se determinó el peso exacto con una balanza analítica.

Los sólidos totales se calcularon mediante el método gravimétrico. Para ello, los residuos fueron secados en una estufa a 105 °C durante 24 horas y, posteriormente, pesados. La fórmula utilizada para calcular los sólidos totales se expresa en la ecuación 3.1.

$$ST = \frac{A - B}{ml \text{ de la muestra}} \quad (3.1)$$

Donde:

A: peso del crisol + muestra seca (g)

B: Peso del crisol vacío (g)

3.2.1.2 Determinación de sólidos volátiles

Resultan de la diferencia entre sólidos totales menos sólidos fijos o cenizas. La fórmula utilizada se expresa en la ecuación 3.2.

$$SV = \frac{A - C}{ml \text{ de la muestra}} \quad (3.2)$$

Donde:

A: peso del crisol + muestra seca (g)

B: Peso del crisol + muestra calcinada (g)

3.2.1.3 *Determinación de sólidos fijos o cenizas*

Se calcularon al someter la muestra de sólidos totales a incineración en una mufla a una temperatura de 550 °C durante 5 horas. El cálculo de los sólidos fijos o cenizas se obtiene restando el peso del crisol vacío al peso del crisol después de la calcinación a 550 °C. El resultado se divide por el volumen de la muestra tal como se expresa en la ecuación 3.3.

$$SF = \frac{C - B}{ml \text{ de la muestra}} \quad (3.3)$$

Donde:

C: peso del crisol + muestra calcinada (g)

B: Peso del crisol vacío (g)

3.2.1.4 *Demanda química de oxígeno*

Para llevar a cabo este análisis, se realizó una preparación previa de las muestras, asegurando condiciones óptimas para su evaluación. Como parte de este proceso, se efectuaron diluciones específicas con el objetivo de ajustar la concentración de los componentes de interés. Las proporciones utilizadas en cada dilución se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. *Diluciones preparadas para el análisis de DQO*

Residuo	Cáscara de plátano	Melaza	Inoculo
Diluciones	0,1: 100	0,1: 100	0,2: 160

Posteriormente a las diluciones realizadas, las muestras se calentaron a un baño maría durante aproximadamente 5 minutos para garantizar una adecuada homogeneización. Luego, se tomó una alícuota de cada muestra y se transfirió a los tubos de ensayo del test COD Vario.

Dado que este procedimiento involucra reactivos potencialmente peligrosos, se tomaron estrictas medidas de seguridad. Se empleó equipo de protección personal, incluyendo guantes, gafas de seguridad y bata de laboratorio, con el fin de minimizar riesgos durante la manipulación de reactivos.

Tras la adición de la muestra, se verificó que los tubos estuvieran correctamente cerrados antes de iniciar el proceso de digestión. El equipo MD100: COD Colorimeter, fue configurado a una temperatura de 150 °C y se mantuvo una operación durante dos horas para completar el análisis. Transcurrido este tiempo, las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante aproximadamente 15 minutos. Finalmente, se realizó la medición con el Photometer System MD100, el cual mostró directamente el valor de DQO en mg/L.

3.2.1.5 Determinación de grasa

Este análisis se realizó mediante la extracción Soxhlet, se pesaron las muestras en un dedal de celulosa y se añadieron 45 ml de éter de petróleo (disolvente) en el caso de aluminio. La temperatura se ajustó a 110 °C y se realizó una inmersión durante 15 minutos. Al finalizar este tiempo, se efectuó un lavado durante 30 minutos y luego se elevó la posición de los dedales. Se esperaron 35 minutos para la recuperación del solvente. Posteriormente, se apagó el equipo, se retiraron los casos de aluminio y se colocaron en la estufa a 105 °C durante 30 minutos. Finalmente, se procedió a pesar de los casos de aluminio.

3.2.1.6 Determinación de carbohidratos

El contenido total de azúcares se determinó utilizando el método de fenol-ácido sulfúrico descrito por Dubois et al. (2002). En resumen, se hidrolizaron 50 mg de polvo (materia seca) con 5 ml de una solución de ácido clorhídrico (HCl 2,5 N) la mezcla se calentó a baño María durante 3 horas. Tras la hidrólisis, los tubos se enfriaron a temperatura ambiente y luego se neutralizaron con carbonato de sodio (sólido). Posteriormente, se tomaron alícuotas de 0,1 ml de la solución neutralizada, que contenía la muestra, y se diluyeron en proporciones de 1:10 y 1:100 con 0,9 ml de agua destilada. Después de la dilución, se añadió 1 ml de una solución de fenol al 5% y 5 ml de ácido sulfúrico al 96%, mezclándose bien y enfriándose a 25-30 °C en un baño de agua. La intensidad del color de las muestras se midió a 490 nm utilizando un espectrofotómetro ultravioleta-visible Orion Aquamate 7000. El contenido total de azúcar se calculó utilizando la ecuación 3.4.

$$y = 0.0104x + 0.0108 \quad (3.4)$$

Con un $R^2=0.9979$

3.2.1.7 *Determinación del contenido de proteína*

En base a literatura el contenido de proteína se calculó multiplicando el contenido de nitrógeno por 6,25 (Ahou et al., 2021).

3.2.2 **Determinación de la condición de generación óptima de metano a partir de residuos sólidos y líquidos a través del Modelo Modificado de Gompertz**

Para dar respuesta a este objetivo se aplicó un diseño de mezclas, variando las concentraciones relativas de cáscaras de plátano y melaza (Factor A), mientras que se mantuvo constante la temperatura de 37 °C y ajustando el pH inicial de todas las mezclas en 7,5. El proceso de digestión anaerobia se llevó a cabo utilizando el sistema AMPTS II, con monitoreo continuo de la producción de metano hasta el cese de la actividad metanogénica.

A partir de la cinética del proceso que arrojó el equipo AMPTS II y de acuerdo con el diseño experimental, se llevó a cabo la aplicación de cinco niveles de concentraciones de cáscaras de plátano (CP) y melaza de caña de azúcar (M), considerando que se realizó por triplicado para cada concentración, y se calculó el promedio para su interpretación. Posteriormente, los datos experimentales obtenidos fueron ajustados al modelo modificado de Gompertz, con el fin de comparar el potencial máximo de producción (G_0), la tasa máxima de producción (R_m) y el tiempo de latencia (λ) y finalmente determinar la mezcla óptima de producción de biometano.

3.2.2.1 *Modelo Modificado de Gompertz*

El modelo modificado de Gompertz permite una caracterización precisa de la cinética de la digestión anaeróbica. Ya que cuantifica parámetros críticos, incluida la fase de retraso, que refleja el periodo de adaptación microbiana a los sustratos, y la tasa de crecimiento de bacterias metanogénicas (Al-Hamamre et al., 2025). Se representa mediante la siguiente ecuación:

$$G(t) = P_0 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_m * e}{P_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (3.5)$$

Donde:

$G(t)$: rendimiento de metano acumulado

P_0 : producción máxima de metano

R_m : tasa de producción máxima de metano

e : número de Euler (2.718)

λ : fase de latencia (días).

t : tiempo (días).

3.2.2.2 *Indicador de representación*

Para evaluar el ajuste del modelo a los datos experimentales del sistema en estudio, se empleó el coeficiente de determinación. Esta métrica adimensional varía en el intervalo [-1, 1], independientemente de la escala de los valores de las variables y se determina mediante la ecuación 3.6

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (3.6)$$

Donde:

y_i = valor predicho por el modelo

\hat{y}_i = valor real

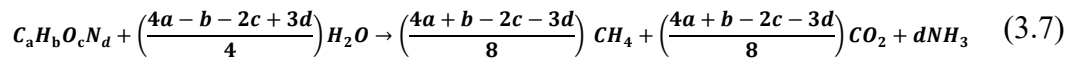
\bar{y}_i = promedio de valores reales

3.2.3 **Comparación de la producción experimental de biometano obtenida a través del equipo AMPTS II con la producción teórica estimada mediante cálculos estequiométricos.**

Como señala Tchobanoglous, (1993) esta comparación es esencial para validar modelos de producción de biogás y optimizar los parámetros operativos del sistema. De este modo, la evaluación conjunta de ambos enfoques proporciona una visión integral sobre la eficiencia y las oportunidades de mejora en los procesos de valorización de residuos orgánicos.

3.2.3.1 *Estimación del rendimiento estequiométrico de metano*

La estimación teórica del potencial de producción de biometano a partir de residuos orgánicos se fundamenta en el análisis elemental de los sustratos y del inóculo microbiano, determinando los porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno para establecer su fórmula empírica. Este procedimiento, descrito por Murphy & Thamsiriroj, (2013), permitió aplicar la ecuación 3.7 de Angelidaki & Sanders (2004), la cual evalúa los rendimientos teóricos de metano. Esta ecuación, describe la conversión de la materia orgánica en metano, dióxido de carbono y amoníaco (Ahou et al., 2021).



En cuanto al rendimiento estequiométrico máximo de metano de los sustratos expresado en mililitros de CH₄ por gramo de SV y V_m , se determinó utilizando la ecuación 3.8, establecida por (Buswell & Muellepi, 2002) y adoptada por (Sialve et al., 2009):

$$B_0 = \frac{4a + b - 2c - 3d}{12a + b + 16c + 14d} * V_m \quad (3.8)$$

La digestión anaerobia de materiales orgánicos, compuestos principalmente por carbohidratos, proteínas y lípidos se basa en la descomposición microbiana en ausencia de oxígeno (Ahou et al., 2021). Por tanto, la composición química y la biodegradabilidad de estos sustratos son factores determinantes en la producción de metano. En este estudio, el conocimiento de la concentración de dichos componentes permitió calcular el rendimiento teórico máximo de cada uno de los sustratos a través de la ecuación 3.9 propuesta por (Prajapati et al., 2014).

$$B_T = \frac{1}{100} (A * Cl + B * Cp + C * Cc) \quad (3.9)$$

En este contexto, A, B y C representan los rendimientos específicos de metano correspondientes a lípidos, proteínas y carbohidratos, respectivamente. Cl, Cp y Cc indican las concentraciones respectivas de estos mismos componentes en los sustratos (Ahou et al., 2021).

Por otro lado, la producción experimental de biometano se determinó mediante el sistema AMPTS II, que permite medir de manera precisa el volumen de gas generado durante la digestión anaerobia en condiciones controladas.

3.3 OBTENCIÓN, TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.3.1 Diseño experimental

El experimento se llevó a cabo con un diseño de mezclas, cada unidad experimental tuvo un volumen fijo de 400 ml para cada tratamiento. Se estudió el efecto de aplicar cinco niveles de concentración de cáscaras de plátano (CP) y melaza (M), adicionando 100 g de inóculo previamente adaptado con CP y M a todas las mezclas para

asegurar una óptima fermentación. La tabla 4 presenta la composición de las mezclas experimentales, expresadas en porcentaje.

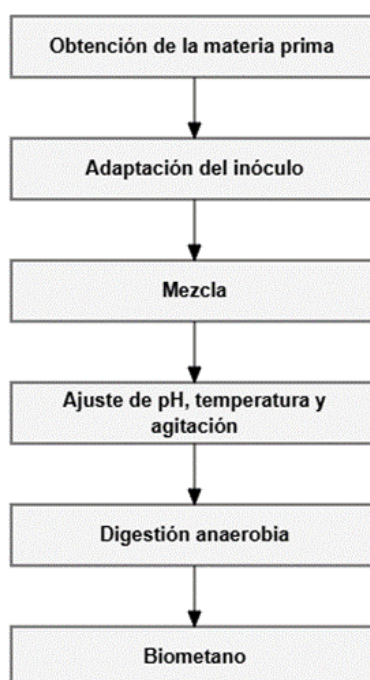
Tabla 4. Niveles del factor en estudio

Factor A	Niveles
CP:M	0: 100
CP:M	25: 75
CP:M	50: 50
CP:M	75: 25
CP:M	100: 0

3.3.2 Elaboración e instalación del sistema

Para la construcción del sistema volumétrico se utilizó el Equipo AMPTS II ha sido desarrollado para mediciones en línea de flujos ultra bajos de biogás y biometano producidos a partir de digestión anaerobia de cualquier sustrato biológico degradable, tanto en forma sólida como líquida a escala laboratorio (BPC Instruments AB, 2021). Se estudió la producción de biometano mediante digestión anaerobia de cascara de plátano, melaza de caña de azúcar e inóculo microbiano. Se controló el pH inicial, la temperatura y la agitación. El procedimiento que se llevó a cabo se muestra en la figura 3.

Figura 3. Diagrama de flujo



3.3.2.1 Obtención de la materia prima

Los residuos fueron obtenidos de acuerdo con lo descrito en el ítem 3.2.1.

3.3.2.2 Adaptación del inóculo

Antes de iniciar con el proceso de digestión anaerobia, se procedió a adaptar el inóculo con cáscaras de plátano, melaza y estiércol de vaca, de modo que los microorganismos presentes vayan asimilando la alimentación que se proporcionará. El procedimiento que se realizó para la fase de adaptación se detalla a continuación:

Se recibieron las materias primas, cáscaras de plátano, melaza y estiércol de vaca. Se procedió a lavar las cáscaras de plátano para librarlas de impurezas y microorganismos patógenos, pasando a ser escurridas aproximadamente por 5 minutos. Seguidamente se diluyó la melaza, tomando en consideración 35 gramos de melaza con 350 g de agua. Finalmente se mezclaron todos los residuos en una botella de 4 litros, tratando de que la mezcla ocupe aproximadamente 2,5 a 3 litros.

3.3.2.3 Preparación de la mezcla

Según lo indicado por Nurdimansyah et al. (2015), un reactor anaerobio opera de manera eficiente cuando el volumen del sustrato representa aproximadamente el 75% de la capacidad total del reactor. En función de este criterio, los reactores del equipo AMPTS II con un volumen nominal de 500 ml, fueron cargados con cinco diferentes concentraciones de cáscaras de plátano y melaza más inóculo. Para cada paso, se respetó el volumen de espacio vacío o cabeza recomendado manteniéndolo entre 200 y 300 ml. El inóculo se adiciono en relación inóculo-sustrato 2:1(BPC Instruments AB, 2021).

3.3.2.4 Ajuste de pH

El funcionamiento de las bacterias metanogénicas está ligado al equilibrio del pH en el medio en que se desarrollan. Por tanto, resulta esencial controlar este factor para asegurar su actividad óptima. Conforme a lo indicado en la literatura revisada en el ítem 2.4.5 se procedió a ajustar el pH inicial de todas las mezclas a 7.5 empleando el uso de sustancias reguladoras.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en base a cada uno de los objetivos planteados.

4.1 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS FISICOQUÍMICO LAS CÁSCARAS DE PLÁTANO, MELAZA DE CAÑA DE AZÚCAR E INÓCULO MICROBIANO.

Se llevo a cabo la caracterización fisicoquímica de los sustratos, así como del inóculo microbiano empleados en el proceso de digestión anaerobia. Este análisis permitió determinar parámetros clave como el contenido de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos fijos o cenizas (SF), demanda química de oxígeno (DQO), materia grasa, proteína, carbohidratos y el análisis elemental, los cuales fueron determinantes para predecir y comparar el comportamiento dentro del sistema anaerobio. A continuación, en la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos de cada parámetro.

Tabla 5. Resultados del análisis fisicoquímico de la materia prima

Parámetros	Unidad	Cáscara de plátano	Melaza	Inóculo microbiano
Sólidos totales	g/L	771,06 ± 0,85	973,26 ± 0,30	125,05 ± 0,50
Sólidos volátiles	g/L	633,99 ± 5,64	792,74 ± 0,82	98,22 ± 0,57
Sólidos fijos	g/L	137,06 ± 5,07	180,83 ± 0,68	26,82 ± 0,11
DQO	mg/L	604,33 ± 6,66	946,67 ± 7,23	309,00 ± 4,58
Carbohidratos	%	30,07 ± 0,09	32,01 ± 0,09	18,22 ± 0,06
Proteína	%	12,73 ± 0,63	10,21 ± 1,00	1,48 ± 0,44
Grasa	g	0.068 ± 0.005	-	0.008 ± 0.001
Densidad	g/ml	0.81	1.2	1

X±SD

De acuerdo con los resultados obtenidos en lo que respecta al análisis de ST, estos valores reflejan la alta concentración de materia seca en ambos residuos, especialmente en la melaza, lo que es consistente con su naturaleza concentrada como subproducto de la industria azucarera. Estudios recientes reportan que residuos agroindustriales como la cáscara de plátano suelen presentar valores de sólidos totales entre 700 y 800 g/L, mientras que residuos líquidos concentrados como la melaza pueden superar los 900 g/L,

dependiendo de su origen y procesamiento (Sánchez, 2021). El inóculo, por su parte, presenta valores inferiores, lo cual es esperado ya que generalmente se utiliza lodo digerido o mezclas microbianas con menor concentración de sólidos para facilitar la transferencia de masa y el contacto microbiano (Salgado, 2020).

En cuanto a SV, los resultados indican que tanto la cáscara de plátano como la melaza poseen una alta proporción de materia orgánica disponible para la digestión anaerobia. De acuerdo con Ramírez et al. (2023), su estudio sobre residuos agroindustriales reporta porcentajes de SV respecto a los ST superiores al 80 % en residuos como estiércol bovino y residuos de frutas, lo cual coincide con los valores observados en este estudio (cáscara de plátano: 82%, melaza: 81% aprox.). La alta proporción de SV en ambos sustratos es favorable, ya que una mayor fracción volátil suele traducirse en mayor potencial de generación de biometano.

El contenido de cenizas representa la cantidad total de minerales que permanecen tras la incineración completa de la materia orgánica (Bashir et al., 2021). Con respecto a los resultados obtenidos y de acuerdo con el estudio de Salgado, (2020) reporta valores de SF para residuos vegetales entre 10 % y 20 % de los ST, lo que concuerda con los resultados obtenidos. Un contenido moderado de SF es deseable, ya que una fracción mineral excesiva puede afectar la operación del digester y la calidad del digestato final.

Con respecto a la DQO, los resultados de los sustratos se consideran idóneos, pese a que la cáscara de plátano presenta menor DQO que la melaza, esta contiene una fracción significativa de materia orgánica biodegradable, lo que la convierte en un sustrato ideal para digestión anaerobia tal como menciona Elizondo et al. (2025), es su estudio sobre residuos lignocelulósicos de frutas con potencial bioquímico de metano. De acuerdo con el estudio de (Rahim et al., 2019) una disminución en la DQO indica que se está llevando a cabo la etapa de hidrólisis, por el contrario, un incremento de este parámetro puede asociarse con una mayor carga orgánica.

En lo que corresponde a carbohidratos, los resultados mostraron que la melaza presentó el mayor contenido, seguido de la cáscara de plátano y finalmente el inóculo. De acuerdo con el estudio de Flores n (2008), reporta el contenido de carbohidratos de residuos de frutas en rangos similares a los obtenidos en la cáscara de plátano, que oscilan entre 40 y 60 % de la materia orgánica total. Mientras que el elevado contenido de

carbohidratos simples (azúcares reductores) de la melaza, facilita una rápida fermentación, aumentando así la tasa de producción de metano (Pulgarin et al., 2022). Por otro lado, el inóculo, aunque con bajo contenido de carbohidratos, es esencial para mantener la actividad metabólica (Flores, 2008).

Con respecto al contenido de grasa, se obtuvo una variación considerable entre las tres muestras. La cáscara presentó un contenido moderado mientras que la melaza e inóculo mostraron valores bajos, lo que es coherente con su composición y naturaleza. Este comportamiento según Zou et al. (2022), se debe a que la cáscara tiene una proporción relevante de ácidos grasos polinsaturados, los cuales constituyen más del 40 % del total de ácidos grasos. Una carga excesiva de grasas puede provocar la acumulación de ácidos grasos de cadena larga, los cuales pueden inhibir la actividad de las bacterias metanogénicas y afectar la estabilidad del proceso (Hidalgo et al., 2014). Por ello, el contenido moderado observado en las muestras resulta favorable, ya que aporta energía adicional sin exceder los niveles que podrían causar inhibición.

Los resultados en cuanto al análisis elemental se muestran en la tabla 6 estos revelaron diferencias significativas. Yi et al., (2025) en su estudio menciona que el contenido de nitrógeno en la materia prima proporciona nutrientes para el crecimiento microbiano, pero el nitrógeno excesivo conduce a la inhibición del amoníaco. Por esta razón, y de acuerdo con el estudio de Mata-Alvarez et al. (2014), entre 20 y 30 lograron la mayor eficiencia de metano. Por tanto, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango recomendado para mantener el equilibrio nutricional necesario. De acuerdo con el estudio de obtuvieron (Khatun et al., 2023) obtuvieron una relación C/N del inóculo de $19,56 \pm 0,17$, valor que concuerda con el obtenido en el presente estudio. La ligera diferencia observada entre ambos resultados puede atribuirse a factores como la variabilidad en la composición del inóculo.

Tabla 6. Resultados del análisis elemental

Parámetros	Unidad	Cáscara de plátano	Melaza	Inóculo microbiano
Carbono	%	$41,16 \pm 0,01$	$34,61 \pm 0,08$	$27,48 \pm 0,12$
Nitrógeno	%	$2,04 \pm 0,10$	$1,63 \pm 0,16$	$1,48 \pm 0,07$
C/N	%	20.24 ± 1.01	21.33 ± 2.07	18.63 ± 0.87

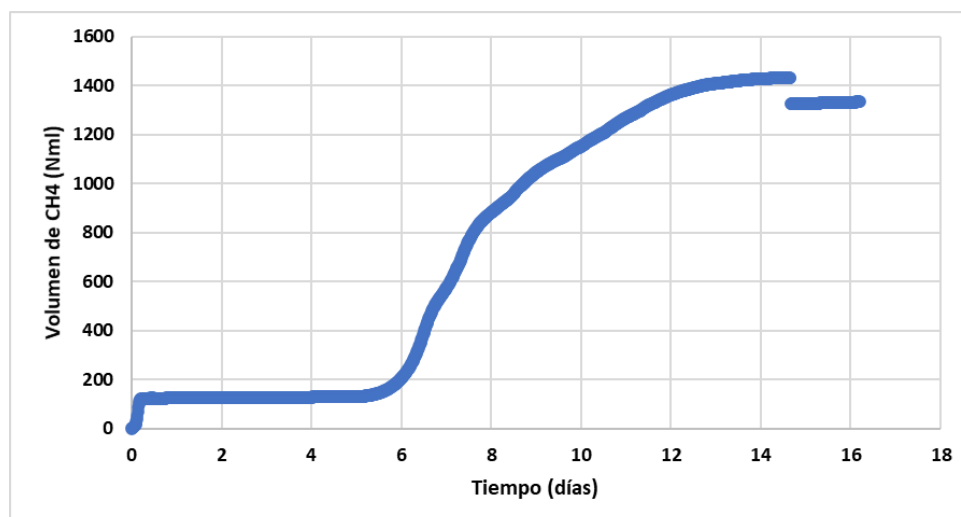
4.2 DETERMINACIÓN DE LA CONDICIÓN DE GENERACIÓN ÓPTIMA DE METANO A TRAVÉS DEL MODELO MODIFICADO DE GOMPERTZ.

Los resultados del proceso de digestión anaerobia que se llevó a cabo utilizando el sistema AMPTS II se presentan a continuación.

El volumen acumulado de CH₄ se registró durante 16 días, para cada uno de los cinco tratamientos, realizados por triplicado. Los datos mostraron que el tratamiento 5 presentó el mayor volumen acumulado de CH₄, tal como se muestra en la figura 4. Sin embargo, los tratamientos 1 a 4 como se observa en el anexo 1, 2, 3 y 4 presentaron tasas de producción de metano más bajas y volúmenes finales sustancialmente menores pero similares, por lo que el resultado indica que la combinación de sustratos utilizada en el tratamiento 5 que se componía de 100% cáscaras de plátano y 0% melaza de caña de azúcar adicional inóculo microbiano, favoreció significativamente la producción de metano, alcanzando un valor máximo superior a los observados en los otros tratamientos.

Los resultados obtenidos concuerdan con la literatura existente. Joute et al. (2016), en su investigación sobre la codigestión anaerobia de la cáscara de plátano y el estiércol de vaca coinciden con lo obtenido en el presente estudio ya que la combinación de estos sustratos ejerce un efecto sinérgico, traduciéndose en un incremento del rendimiento de metano en comparación con la digestión individual de cada sustrato. De igual manera el estudio de Beteta et al. (2022), mencionan que la combinación de cáscaras de plátano e inóculo (sistema bajo tratamiento) sí logran una mayor producción de metano.

Figura 4. *Volumen de biometano producido en el nivel 5*



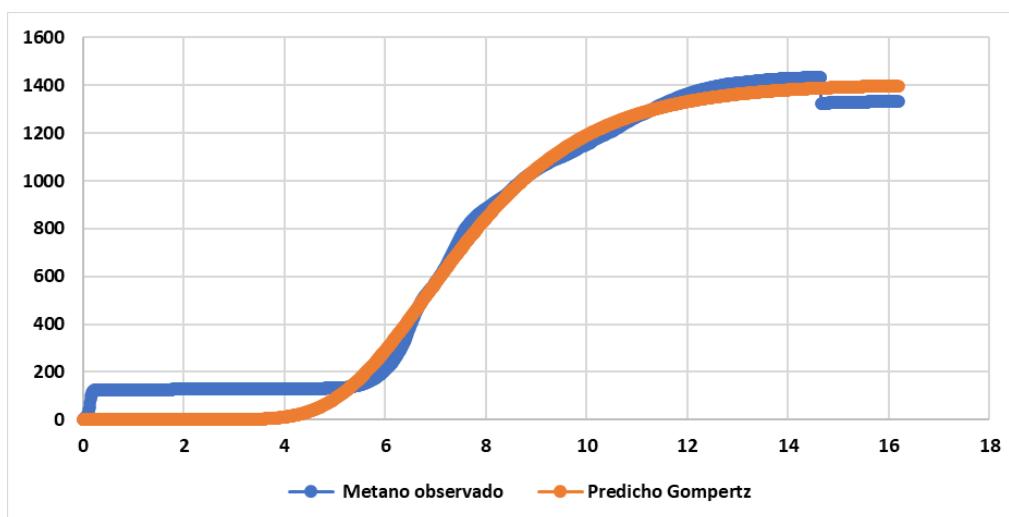
4.2.1 Análisis estadístico

Tras la adquisición y el análisis de los datos correspondientes al volumen acumulado de biometano, se procedió a la optimización del proceso a través del ajuste de datos experimentales con el modelo modificado de Gompertz. El ajuste se realizó de forma independiente para cada uno de los cinco tratamientos evaluados.

Los valores de mejor ajuste obtenidos para los parámetros cinéticos: potencial máximo de producción de metano (P_0), tasa máxima de producción de metano (R_m) y fase de latencia (λ), proporcionan información relevante sobre el rendimiento de la digestión anaeróbica en diferentes mezclas de sustratos (Al-Hamamre et al., 2025). La estimación de estos parámetros se determinó con la ayuda de la herramienta Solver en Microsoft Excel.

Tras comparar los resultados obtenidos, se identificó que el tratamiento 5 fue el óptimo, ya que presentó el mayor volumen acumulado de metano en comparación con los demás tratamientos. Por ello, el análisis detallado y la interpretación posterior se centraron exclusivamente en dicho tratamiento, cuyas curvas de metano observado y de ajuste mediante el modelo de Gompertz se presentan en la figura 5.

Figura 5. Curvas de producción acumulada de metano: observado vs. Gompertz



Al analizar el comportamiento de la producción acumulada de metano en el tratamiento 5 mediante la aplicación del modelo modificado de Gompertz se observó un ajuste global satisfactorio entre los datos experimentales y los valores predichos por el

modelo, reflejado en un coeficiente de determinación elevado (R^2 de 0.98). Los parámetros estimados, como el potencial máximo de producción de metano ($P_0 = 1405,09$ Nml CH_4), la tasa máxima de producción ($R_m = 291,41$ Nml $\text{CH}_4 \text{ d}^{-1}$), y una latencia relativamente corta ($\lambda = 5,04$ d), indicaron que el tratamiento 5 presenta condiciones cinéticas óptimas para la digestión anaerobia.

Sin embargo, un análisis detallado de las curvas muestra que el ajuste del modelo presenta limitaciones en los primeros días (0-4 días). En ese intervalo inicial, el modelo no logra describir adecuadamente la acumulación de metano observada experimentalmente, subestimando la producción temprana. Esto se refleja en la divergencia entre valores observados y los predichos. A partir del día 6, la correspondencia entre la curva experimental y la predicha mejora significativamente, mostrando un ajuste muy cercano hasta el fin de la cinética, lo que se observa claramente en la superposición de ambas curvas.

Como señala Moharir et al. (2020), en sistemas donde la fase inicial de producción de metano es rápidamente significativa o donde la adaptación microbiana al sustrato ocurre de manera ágil, el modelo de Gompertz tiende a subestimar esa producción temprana, mostrando un desfase entre los datos experimentales y el modelo en el periodo inicial. Esto explica por qué el modelo asume la existencia de una latencia que ralentiza el inicio del crecimiento, un factor que puede no reflejar con precisión sistemas con mínima fase de adaptación (Ajayi-Banji et al., 2021; Ware & Power, 2017)

4.3 COMPARACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE BIOMETANO OBTENIDA A TRAVÉS DEL EQUIPO AMPTS II CON LA PRODUCCIÓN TEÓRICA ESTIMADA MEDIANTE CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS.

4.3.2 Determinación de la formula empírica de los sustratos

Con base en el contenido elemental de cada una de las muestras y mediante cálculo gravimétrico se estimó el contenido de oxígeno por diferencia (Regalado & Marín, 2017). Se procedió a realizar los cálculos correspondientes y establecer la formula empírica aplicando el método propuesto por Murphy & Thamsiriroj, (2013). Este procedimiento, detallado en las tablas 7, 8 y 9 para cada una de las muestras, involucró la determinación de la proporción relativa de cada átomo presente en cada muestra.

Tabla 7. *Composición química de la cáscara de plátano*

Componente	Peso atómico	%	Numero de átomos por moles
Nitrógeno	14	2,04	0,15 (1)
Carbono	12	41,16	3.43 (25)
Hidrógeno	1	7,12	7.12 (58)
Oxígeno	16	32,74	2.05 (22)

Tabla 8. *Composición química de la melaza de caña de azúcar*

Componente	Peso atómico	%	Numero de átomos por moles
Nitrógeno	14	1,63	0,12 (1)
Carbono	12	34,61	2,88 (25)
Hidrógeno	1	6,80	6,80 (58)
Oxígeno	16	41,91	2,62 (22)

Tabla 9. *Composición química del inóculo microbiano*

Componente	Peso atómico	%	Numero de átomos por moles
Nitrógeno	14	1,48	0,11 (1)
Carbono	12	27,48	2,29 (22)
Hidrógeno	1	6,43	6,43 (61)
Oxígeno	16	61,89	3,87 (37)

La aplicación de este método, basado en el análisis elemental y la consideración de los pesos atómicos de los elementos constituyentes, permitió establecer la descripción estequiométrica de las muestras. Las fórmulas empíricas resultantes fueron: $C_{24}H_{49}O_{14}N$; $C_{25}H_{58}O_{22}N$; $C_{22}H_{61}O_{37}N$, para las cáscaras de plátano (CP), la melaza (M) y el inóculo microbiano, respectivamente.

A partir de las fórmulas empíricas establecidas de cada muestra, se determinó el volumen teórico de metano (Ecuación 3.7), rendimiento máximo estequiométrico de metano (Ecuación 3.8) que se define como B_0 y en base a carbohidratos, proteínas y lípidos determinar el rendimiento teórico máximo de los sustratos (Ecuación 3.9), identificado como B_T . Estos cálculos se centraron en el tratamiento 5, previamente identificado como el de mayor producción de metano experimental. Los resultados se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados experimentales y teóricos de producción de metano

Parámetros	Total
Volumen experimental CH ₄ (Nml)	1400
Volumen teórico CH ₄ (Nml)	51530
B ₀ (Nml /g SV)	19558
B _T (Nml /g SV)	19317

Los resultados indicaron que el volumen de metano producido a partir del tratamiento 5 (100 % cáscara de plátano, 0 % melaza de caña de azúcar más la adición de inóculo microbiano) podía alcanzar aproximadamente 51,530 Nml de CH₄ bajo condiciones normales de presión y temperatura. No obstante, el volumen experimental medido con el sistema AMPTS II fue de solo 1,400 Nml de CH₄, equivalente a solo un 2,72 % de la producción teórica estimada.

Si bien la cáscara de plátano presentó características químicas favorables para la digestión anaerobia, tales como un elevado contenido de carbono (41,16 %), una relación C/N favorable (20,24), una concentración significativa de sólidos volátiles (633,99 g/L) y una apreciable fracción de carbohidratos (30,07 %), lo que sugiere una alta biodegradabilidad y un potencial elevado para la producción de biometano. Por otro lado, el inóculo microbiano, aunque una baja concentración de sólidos y nutrientes, su adición fue fundamental para el inicio y el mantenimiento de la actividad microbiana. Esta interacción sinérgica entre el sustrato y el inóculo como señalan Joute et al. (2016), justifica la producción experimental de biometano observada.

El contraste entre dichos resultados incluyendo el rendimiento estequiométrico (B₀) y rendimiento teórico máximo (B_T) con el volumen experimental, evidenció una brecha significativa. Estas diferencias pueden atribuirse a varios factores, entre ellos las limitaciones en la biodegradabilidad del sustrato, las condiciones del proceso experimental tal como se reporta en la literatura (R. Parra, 2015b). Adicionalmente, las incidencias operacionales observadas durante la experimentación que influyeron negativamente en la producción y medición de biometano.

Además, se analizó la productividad de cada uno de los tratamientos, tal como se muestra en la tabla 11. Para dicho análisis se tomó en cuenta el mayor rendimiento de metano de cada tratamiento y se verificó el tiempo en el que llega al máximo volumen.

Tabla 11. *Productividad*

Niveles	CH₄ (Nml)	Tiempo (días)	Productividad
CP:M 0:100	142,7	5	28,24
CP:M 25: 75	146	5	29,2
CP:M 50: 50	140	4	35
CP:M 75: 25	134	0.3	446,7
CP:M 100: 0	1433,65	14	102,4

Observando que el tratamiento CP: M 75:25 exhibió una tasa de producción inicial elevada, atribuible a un corto periodo de actividad metanogénica. Si bien este valor representa un pico inicial, no refleja una productividad sostenida. Este comportamiento se asocia a una rápida liberación y consumo de compuestos fácilmente biodegradables, seguido de una rápida desaceleración que limita su representatividad. Por el contrario, el tratamiento CP: M 100:0 demostró la producción más elevada y sostenida de CH₄, alineándose con literatura que destacan el potencial del material lignocelulósico para favorecer la producción de CH₄ (González et al., 2015) Mientras que los demás tratamientos presentaron productividades más bajas, lo que indica que la incorporación de mayores proporciones de melaza puede limitar la actividad microbiana o acelerar la degradación temprana sin mantener producción estable.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Con base en los resultados experimentales, el estudio actual permite concluir lo siguiente:

- El análisis fisicoquímico de los sustratos reveló un elevado contenido de sólidos volátiles en la cáscara de plátano y la melaza (superiores al 80 % de los SV), sugiriendo un alto potencial de degradación anaerobia, mientras que el inóculo tiene menor concentración, facilitando su función microbiana. La relación C/N observada en los sustratos (entre 18 y 21) es adecuada para mantener la estabilidad del proceso anaerobio.
- La digestión de cáscara de plátano mostró el mayor volumen de metano experimental y la mejor cinética según el modelo modificado de Gompertz indicando condiciones óptimas de producción con alta tasa máxima y baja latencia.
- Se observó una marcada diferencia entre la producción teórica de metano calculada estequiométricamente y la producción experimental, reflejando las complejidades y restricciones inherentes al proceso de digestión anaerobia.

5.2 Recomendaciones

- Validar y complementar el modelado cinético con otros modelos que consideren la producción temprana de metano para un ajuste más preciso en sistemas con rápida adaptación microbiana.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahou, Y. S., Bautista Angeli, J. R., Awad, S., Baba-Moussa, L., & Yves, A. (2021). Lab-scale anaerobic digestion of cassava peels: the first step of energy recovery from cassava waste and water hyacinth. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 42(9), 1438–1451. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1670266>
- Al-Hamamre, Z., Saidan, M., & Al-Addous, M. (2025). Kinetic modeling of anaerobic Co-digestion of municipal food waste and wastewater sludge. *Biomass and Bioenergy*, 202, 108199. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108199>
- Alharbi, M., & Alkathami, B. S. (2024). Modeling of Biogas Production of Camel and Sheep Manure Using Tomato and Rumen as Co-Substrate via Kinetic Models. *Journal of Ecological Engineering*, 25(8), 10–23. <https://doi.org/10.12911/22998993/189231>
- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). *Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants*.
- Arotingo, H. (2023). *Optimización de la producción de biogás mediante la digestión anaeróbica del suero de leche, suplementado con melaza de caña de azúcar, a escala laboratorio* [Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14158>
- Arotingo, H., Espín, R. del C., Núñez, J., Lara, M., Pereda, I., & Pais, J. (2023). Modelisation of the biomethane accumulation in anaerobic co-digestion of whey and sugarcane molasse mixtures. *Fermentation*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/fermentation9090834>
- Bashir, F., Hassan, A., Mushtaq, A., Rizwan, S., Jabeen, U., Raza, A., Anjum, S., & Masood, A. (2021). Phytochemistry and antimicrobial activities of aifferent varieties of banana (Musa Acuminate) peels available in Quetta city. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(2), 1531–1538. <https://doi.org/10.15244/PJOES/122450>
- Benítez, M., Abalos, A., Rodríguez, S., & Ramírez, F. (2020). Co-digestión anaerobia de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y su lixiviado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(2), 70–81. <https://doi.org/10.15446/REV.COLOMB.BIOTE.V22N2.70345>
- Bernal, J., & Orozco, J. (2019). *Comparación del estiércol bufalino y bovino como potenciales inóculos en el proceso de digestión anaerobia*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- BESEL, S. A. (Departamento de E. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios* (IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), Ed.).

- Beteta, V., Díaz, J., Oré, L., Loarte, W., Garcia, G., Díaz, L., & Malpartida, J. (2022). El compostaje de cáscara de *Musa paradisiaca* L. para la producción de biogás y biometano como estrategia de preservación de la salud ambiental. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 62(5), 1048–1054. <https://doi.org/10.52808/bmsa.7e6.625.019>
- BPC Instruments AB. (2021). *AMPTS II & AMPTS II Light Automatic Methane Potential Test System*.
- Burboa, V., Orrantía, M., & Álvarez, L. (2023). Materiales conductores de electrones y su impacto durante la producción anaerobia de metano. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 11(25), 1–17. <https://doi.org/10.22201/ENESL.20078064E.2023.25.85046>
- Buswell, A., & Muellepi, H. (2002). Mechanism of methane fermentation. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(3), 550–552. <https://doi.org/10.1021/ie50507a033>
- Camacho, R., Villada, H. S., & Hoyos, J. L. (2017). Evaluación del estiércol de vaca como inóculo en la digestión anaerobia termófila de residuos sólidos urbanos. *Información Tecnológica*, 28(3), 29–36. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000300004>
- Castro, R., Solís, M., Chicatto, V., & Solís, A. (2020). Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 529–539. <https://doi.org/10.20937/RICA.53545>
- Cirino, C., & Reyes, M. (2023). *Producción de biogás por codigestión anaerobia de banano rechazo con estiércol de ganado vacuno en un CSTR a temperatura óptima mesofílica*. [Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/67195>
- Cisneros, S., Veana, F., Arjona, M., Álvarez, C., & Pérez, S. (2021). Optimización de las variables del proceso de digestión anaerobia de lactosuero en la producción de biogás. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37, 307–318. <https://doi.org/10.20937/RICA.53879>
- CITOLIVA. (2024). *Tecnologías de valorización de subproductos del sector oleícola* (pp. 1–37).
- Cueva, S., Díaz, J., Valles, C., & Salmeron, I. (2023). Producción de biogás a partir de la co-digestión de melazas de caña de azúcar con estiércol de vaca. *Actas Del VIII Congreso de Investigación, Desarrollo e Innovación de La Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología – IDI-UNICYT*. <https://doi.org/https://doi.org/10.47300/actasidi-unicyt-2023-14>
- de Vasconcelos, J. N. (2015). Ethanol Fermentation. In *Sugarcane: Agricultural Production, Bioenergy and Ethanol* (pp. 311–340). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00015-3>

- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (2002). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/AC60111A017>
- Durán, A., Gonzáles, G., Basurto, G., Castelán, G., Peralta, S., Aguilar, M., & Sánchez, A. (2018). *Estudio de digestión anaeróbica seca y húmeda en planta piloto, para determinar el potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos generados en el municipio de Naucalpan de Juárez*. GIZ: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- Elizondo, J., Díaz, D., Ríos, A., Ochoa, E., Castellanos, X., Villalobos, M., Castro, D., & Aguirre, D. (2025). Valorización de residuos de comida mediante potencial bioquímico de metano. *Agroindustrial Science*, 15(1), 19–31. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2025.01.02>
- Encina, A., Pacheco, M., & Vargas, V. (2023). *Técnicas de Machine Learning para la predicción del caudal efluente de la represa Condorama* [Universidad ESAN]. www.juntadeandalucia.es
- Flores, C. (2008). *Tratamiento de residuos sólidos provenientes de rastros mediante digestión anaerobia*. Centro de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C.
- Fuji Electric France. (n.d.). *Del biogás al biometano*. Retrieved May 7, 2025, from <https://www.fujielectric.fr/es/blog/del-biogas-al-biometano/>
- García, C., Quirós, V., & Rosales, L. (2022). Los residuos generados en la producción de la industria azucarera en los últimos 25 años. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 8(16), 1979–1991. <https://doi.org/10.5377/RIBCC.V8I16.15041>
- González, M., Pérez, S., Wong-Villarreal, A., Bello, R., & Yáñez, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
- Guerrero, A., Aguado, P. L., Sánchez, J., & Curt, M. (2016). GIS-based assessment of banana residual biomass potential for ethanol production and power generation: a case study. *Waste and Biomass Valorization*, 7(2), 405–415. <https://doi.org/10.1007/S12649-015-9455-3>
- Hidalgo, D., Gómez, M., Aguado, A., Martín, J. M., & Sastre, E. (2014). Valorización de los residuos generados en el procesado de aceites vegetales usados. *DYNA*, 81(184), 20–27. <https://doi.org/10.15446/DYNA.V81N184.39189>
- Joute, Y., El Bari, H., Belhadj, S., Karouach, F., Gradi, Y., Stelte, W., & Bjerre, A. B. (2016). Semi-continuous anaerobic co-digestion of cow manure and banana waste:

- effects of mixture ratio. *Applied Ecology and Environmental Research*, 14(2), 337–349. https://doi.org/10.15666/aeer/1402_337349
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste Management to 2050. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Khatun, L., Nime, J., Nandi, R., Alam, M., & Saha, C. (2023). Co-digestion of poultry droppings and banana waste for maximizing biogas production in Bangladesh. *Fuel*, 346. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128346>
- Lima, D. R. S., Adarme, O. F. H., Baêta, B. E. L., Gurgel, L. V. A., & de Aquino, S. F. (2018). Influence of different thermal pretreatments and inoculum selection on the biomethanation of sugarcane bagasse by solid-state anaerobic digestion: A kinetic analysis. *Industrial Crops and Products*, 111, 684–693. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.048>
- Liu, L., Tian, Y., Zhao, J., Xia, Z., Wang, N., & Wang, D. (2025). Machine learning for predicting methane production and optimizing parameter in anaerobic digestion process. *Fuel*, 396, 135206. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2025.135206>
- López, H., Barrón, A., Franco, M., Paz, A., & Pérez, A. (2021). Modelación de la generación de metano a partir de suero lácteo y excreta de ganado en codigestión anaerobia. *Nova Scientia*, 13(27), 1–17. <https://doi.org/10.21640/NS.V13I27.2791>
- Lopez, I., & Borzacconi, L. (2017). Anaerobic digestion for agro-industrial wastes: a latin american perspective. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(8), 257390. <https://www.neliti.com/publications/257390/>
- Marín, J., & Castro, L. (2016). *Efectos sinérgicos en la codigestión anaerobia de gallinaza de jaula con residuos industriales*. Universidad Industrial de Santander.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.04.039>
- Moharir, S., Bondre, A., Vaidya, S., Patankar, P., Kanaskar, Y., & Karne, H. (2020). Comparative analysis of the amount of biogas produced by different cultures using the modified Gompertz model and logistic model. *European Journal of Sustainable Development Research*, 4(4), em0141. <https://doi.org/10.29333/ejosdr/8550>
- Morales, D., Cano, J., & Londoño, N. (2019). Red inalámbrica de biosensores enzimáticos para la detección de contaminantes en aguas. *Revista Politécnica*, 15(29), 9–22. <https://doi.org/10.33571/RPOLITEC.V15N29A1>
- Murphy, J., & Thamsiriroj, T. (2013). Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production. In *The Biogas Handbook*:

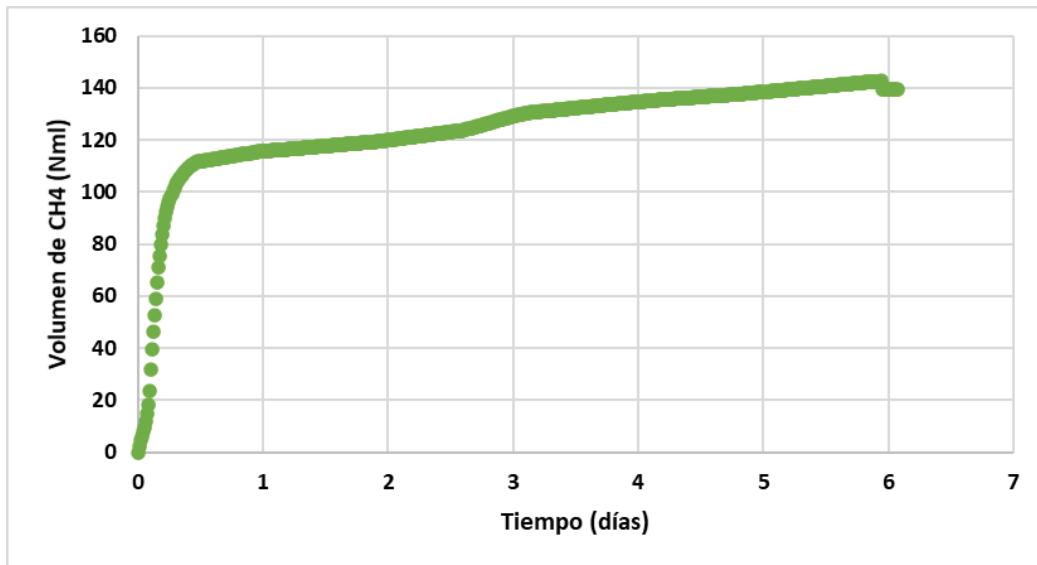
- Science, Production and Applications* (pp. 104–130). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857097415.1.104>
- Owamah, H., Alfa, M., & Onokwai, A. (2020). Preliminary evaluation of the effect of chicken feather with no major pre-treatment on biogas production from horse dung. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *14*, 100347. <https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2020.100347>
- Palomino, M., Ortegón, M., Rojas, T., Martínez, J., Valderrama, J., Barragán, R., Pérez, A., & Luna, H. (2016). Evaluación del potencial acidogénico para producción de AGV de melaza de la industria azucarera como valorización de este subproducto. *Revista ION*, *29*, núm. 1, 71–80. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016006>
- Paques Technologies. (n.d.). *Digestión anaeróbica de alta tasa para el tratamiento de aguas residuales*. Retrieved June 25, 2025, from <https://www.paquesglobal.com/es-es/aplicaciones/digestion-anaerobia-eliminacion-anaerobia-de-la-dq>
- Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cárdenas, L., Vásquez, C., Torres, W., & Ordoñez, J. (2014). *Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal* (Vol. 17, Issue 2).
- Parra, D., Botero, M., & Botero, J. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, ISSN-e 2145-8456, ISSN 1657-4583, Vol. 18, No. 1 (Enero - Marzo), 2019, Págs. 149-160, 18(1), 149–160. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019013>
- Parra, R. (2015a). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, *10*(2), 142–159. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Parra, R. (2015b). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, *10*(2), 142–159. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Prajapati, S. K., Malik, A., & Vijay, V. K. (2014). Comparative evaluation of biomass production and bioenergy generation potential of *Chlorella* spp. through anaerobic digestion. *Applied Energy*, *114*, 790–797. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.021>
- Prifti, H., & Floqi, T. (2021). Biogas production in laboratory scale from different organic wastes using primary sludge as co-substrate. *European Journal of Engineering and Technology Research*, *6*(3), 44–46. <https://doi.org/10.24018/ejers.2021.6.3.2412>

- Pulgarin, C., Saldarriaga, J., & Correa, M. (2022). Análisis y perspectivas del tratamiento anaerobio y el aprovechamiento de lodos biológicos en América Latina. *Revista EIA*, 19(38), 3802 pp. 1–25. <https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1516>
- Quilumba, B. (2021). *Evaluación de la producción de biogás al mezclar estiércol vacuno con residuos orgánicos urbanos de Pedro Moncayo mediante digestión anaerobia* [Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11197>
- Rahim, I., Lando, A., Sari, K., Asriyanti, E., & Ihsan, M. (2019). Feasibility study of biogas from banana peel waste and livestock manure mixture as renewable energy source. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 676(1), 3260. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/676/1/012024>
- Ramírez, H., Domínguez, D., Ramírez de León, A., Hernández, S., & Altamirano, A. (2023). Plan de negocio para la producción de biometano envasado en tanques, como propuesta de aprovechamiento para residuos de estiércol. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(2). <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.710>
- Regalado, D., & Marín, K. (2017). *Determinación de parámetros cinéticos en la combustión de raquis de banano y tallos de rosas*. Universidad Central del Ecuador.
- Riera, M., Maldonado, S., & Palma, R. (2018). Residuos agroindustriales generados en Ecuador para la elaboración de bioplásticos. *Revista de Ingeniería Industrial*, 227–246. <https://doi.org/10.22320/S07179103/2018.13>
- Rojas, A. F., Rodríguez, S., & Montoya, J. (2019). Evaluación de alternativas de aprovechamiento energético y bioactivo de la cáscara de plátano. *Informacion Tecnológica*, 30(5), 11–24. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500011>
- Romero, M. (2022). Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular. *TecnoLógicas*, 25(54), e2505–e2505. <https://doi.org/10.22430/22565337.2505>
- Salgado, G. (2020). *Valorización energética de residuos agrícolas: Cáscara de plátano, cascarilla de arroz y bagazo de caña mediante proceso de biodigestión y combustión*. Escuela Politécnica Nacional.
- Sánchez, E. (2021). *Análisis del potencial de obtención de biometano en España y evaluación del impacto ambiental asociado a su proceso de producción*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Sandoval, A., Santacruz, F., Chuquer, D., & Astorga, D. (2020). Análisis de inóculos microbianos para la optimización de la producción de biogás a partir de fangos residuales. *ALFA, Revista de Investigación En Ciencias Agronómicas y Veterinarias*, 4, núm. 12, 255–284. <https://doi.org/https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v4i12.88>

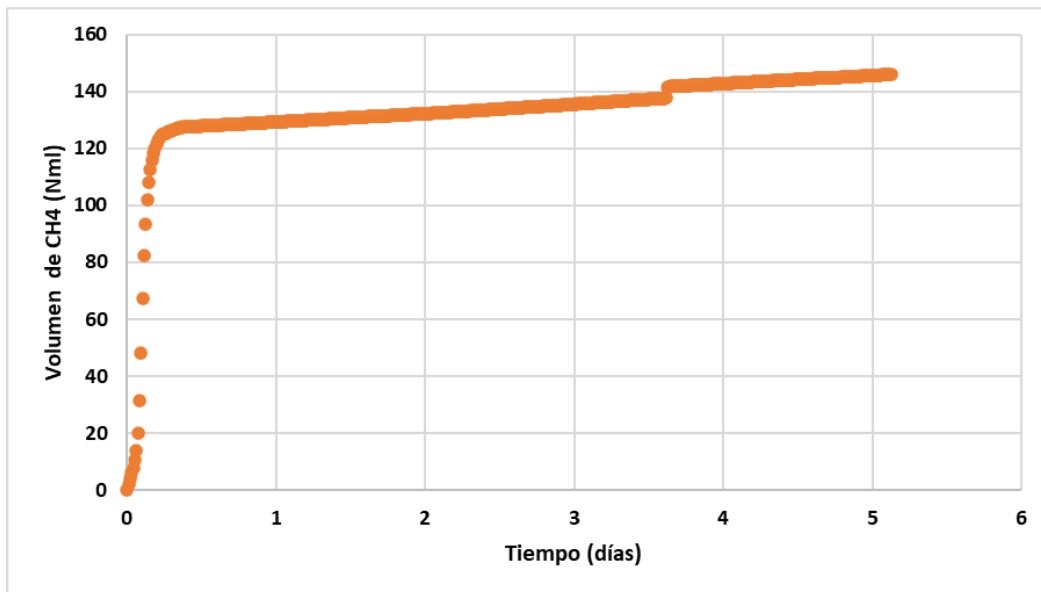
- Sialve, B., Bernet, N., & Bernard, O. (2009). Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. In *Biotechnology Advances* (Vol. 27, Issue 4, pp. 409–416). <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.03.001>
- Solano, A., Ponce, W., & Zambrano, F. (2022). Biodigestión anaeróbica de residuos de musaceas: caso Ecuador. *Biotempo*, 19(1), 51–63. <https://doi.org/10.31381/biotempo.v19i1.4803>
- Sosa, E. (2021). *Predicción del grado de superhidrofobicidad en superficies microtexturizadas, mediante el uso de inteligencia artificial en Python*.
- SUEZ. (2024). *Diferencia entre biogas y biometano*. <https://www.suez.com/es/aire-espana/noticias/diferencia-entre-biogas-y-biometano-como-se-pasa-de-uno-a-otro>
- Tchobanoglous, G. (1993). *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues* (S. Vigil & H. Theisen, Eds.) [Book]. McGraw-Hill.
- Varnero, M. (2011). Manual de Biogas. In *FAO: Food and Agriculture Organization* (FAO). <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Veana, F., González, P., Wong, J., Aguilar, P., & Muñiz, D. (2019). Tendencias de la bioenergía: del metagenoma de hábitats ricos en azufre a la purificación del biogás. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 22. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.190>
- Ware, A., & Power, N. (2017). Modelling methane production kinetics of complex poultry slaughterhouse wastes using sigmoidal growth functions. *Renewable Energy*, 104, 50–59. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.11.045>
- Wasajja, H., Lindeboom, R., Van Lier, J., & Aravind, P. (2020). Techno-economic review of biogas cleaning technologies for small scale off-grid solid oxide fuel cell applications. *Fuel Processing Technology*, 197. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2019.106215>
- Yi, M., Blanco, E., & Borrion, A. (2025). Investigating the influence of feedstock feeding frequency and carbon-to-nitrogen ratio on anaerobic digestion of food waste in lab-scale mesophilic reactors. *Renewable Energy*, 254, 123731. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2025.123731>
- Zou, F., Tan, C., Zhang, B., Wu, W., & Shang, N. (2022). The Valorization of banana by-products: nutritional composition, bioactivities, applications, and future development. *Foods* 2022, Vol. 11, Page 3170, 11(20), 3170. <https://doi.org/10.3390/FOODS11203170>

ANEXOS

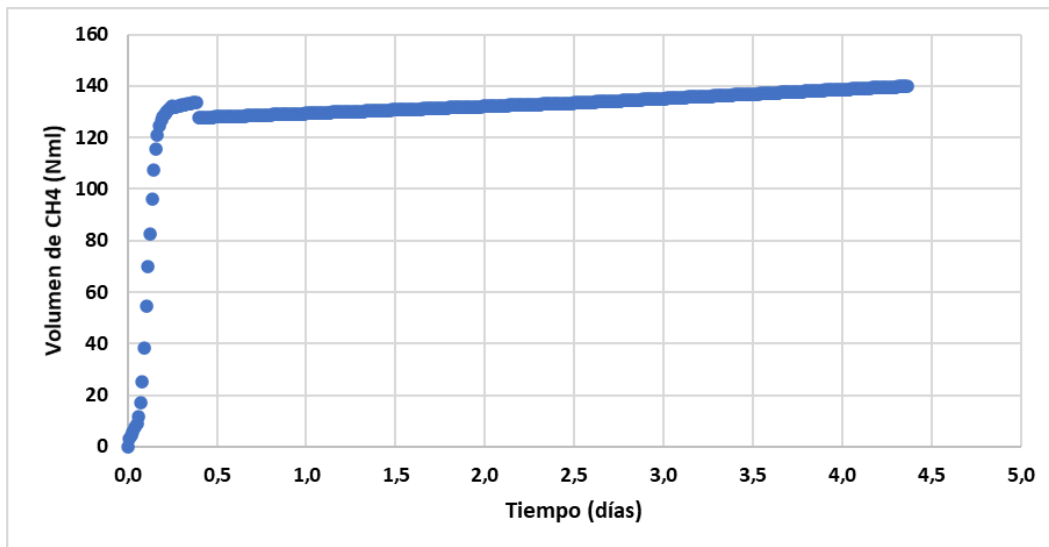
Anexo 1. *Volumen de biometano producido en el nivel 1 (0 % CP y 100 % M)*



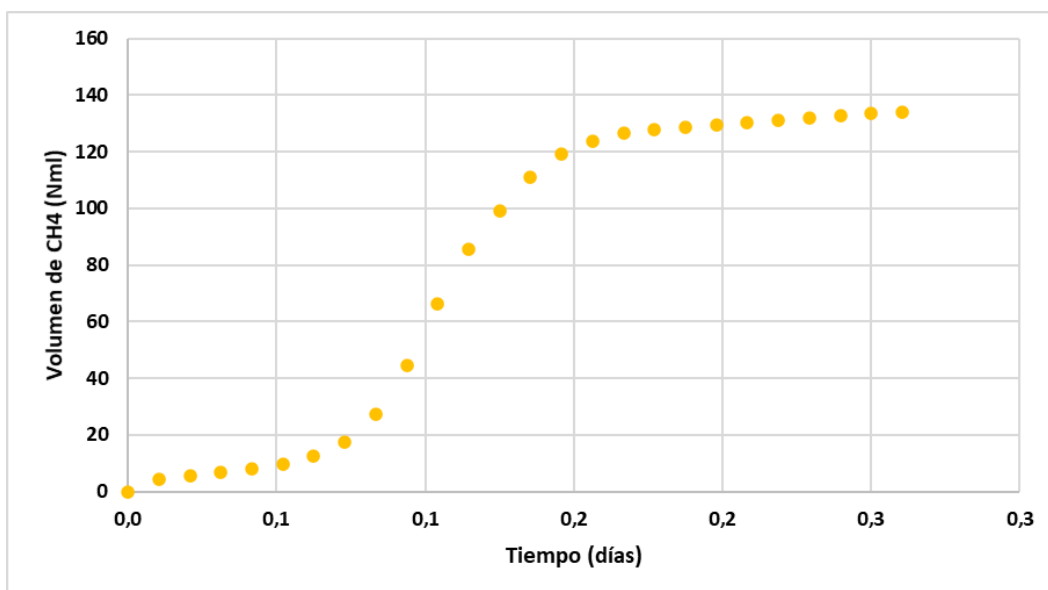
Anexo 2. *Volumen de biometano producido en el nivel 2 (25 % CP y 75 % M)*



Anexo 3. *Volumen de biometano producido en el nivel 3(50 % CP y 50 % M)*



Anexo 4. *Volumen de biometano producido en el nivel 4 (75 % CP y 25 % M)*



Anexo 5. *Sistema automático de prueba de potencial de metano*

