

ARTICULO_bio_ruben_roy.docx

 Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:575960349

Fecha de entrega

7 abr 2026, 9:36 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

17 abr 2026, 8:29 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

ARTICULO_bio_ruben_roy.docx

Tamaño del archivo

1.3 MB

20 páginas

6035 palabras

33.901 caracteres

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 7%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 7% Fuentes de Internet
- 7% Publicaciones
- 7% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repository.library.carleton.ca	2%
2	Trabajos entregados	upeu on 2024-12-18	1%
3	Internet	univendspace.univen.ac.za	1%
4	Internet	ejournal.undip.ac.id	<1%
5	Internet	repositorioinstitucional.uaslp.mx	<1%
6	Internet	link.springer.com	<1%
7	Trabajos entregados	Universidad Católica de Santa María on 2025-08-13	<1%
8	Internet	hdl.handle.net	<1%
9	Internet	ru.dgb.unam.mx	<1%
10	Internet	www.ptolomeo.unam.mx:8080	<1%
11	Trabajos entregados	University of Lincoln on 2025-12-16	<1%

12 Internet

repository.usta.edu.co

<1%

13 Internet

ri-ng.uaq.mx

<1%

Biodegradabilidad anaerobia de residuos de alimentos de comedores populares mediante pruebas de potencial bioquímico de metano

Anaerobic biodegradability of food waste from community kitchens using biochemical methane potential tests

Ruben Percy Huanca Cruz^{1*}

E-mail: ruben.hc@upeu.edu.pe - rpercyhc@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8761-8630>

Roy Uriel Sanizo Cuno^{2*}

E-mail: roy.sc@upeu.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4337-0727>

Enrique Mamani Cuela³

E-mail: enriqmc@upeu.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5905-6373>

¹Universidad Peruana Unión-Juliaca-Puno-Perú.

*Autor para correspondencia

RESUMEN

En los países en desarrollo, los residuos alimentarios (RA) representan una fracción significativa de los residuos sólidos urbanos, generando pérdidas económicas y problemas ambientales como la emisión de gases de efecto invernadero. Frente a esta problemática, su aprovechamiento mediante digestión anaerobia para producir energía renovable se presenta como una alternativa sostenible. Esta investigación evaluó el potencial de producción de metano a partir de RA generados en cuatro comedores populares de la ciudad de Juliaca, Perú: Coliseo, Santa María, San Miguel y Santa Juana, mediante pruebas de potencial bioquímico de metano (PBM) bajo condiciones mesofílicas. Se analizaron parámetros fisicoquímicos clave como pH, contenido de sólidos volátiles, Ácidos grasos volátiles y alcalinidad total, y se realizaron pruebas durante 116 días para medir la cantidad y calidad del

biogás. Los RA evaluados presentaron un alto contenido de materia orgánica biodegradable, permitiendo obtener porcentajes de metano entre 60% y 70%. En cuanto a la producción acumulada de metano, la mayor producción se observó en el comedor popular de San Miguel, con 270.88 mL CH₄/g SV, lo que evidencia un buen potencial energético y estabilidad en el proceso de digestión anaerobia. En conjunto, los resultados demuestran que los RA de comedores populares pueden utilizarse mediante el proceso de digestión anaerobia y transformarse en una fuente de energía limpia, reduciendo la contaminación y promoviendo un manejo responsable de los residuos. La implementación de esta tecnología contribuiría a la sostenibilidad ambiental y promover el desarrollo local en la región.

Palabras clave. Digestión Anaerobia, Biogás, Metano, Residuos de Alimentos, Residuos Orgánicos.

ABSTRACT

In developing countries, food waste (FW) represents a significant fraction of municipal solid waste, generating economic losses and environmental problems such as greenhouse gas emissions. Faced with this problem, its utilization through anaerobic digestion to produce renewable energy is presented as a sustainable alternative. This research evaluated the methane production potential from FW generated in four community kitchens in the city of Juliaca, Peru: Coliseo, Santa Maria, San Miguel, and Santa Juana, using biochemical methane potential (BMP) tests under mesophilic conditions. Key physicochemical parameters such as pH, volatile solids content, volatile fatty acids, and total alkalinity were analyzed, and tests were conducted over 116 days to measure the quantity and quality of the biogas. The FW evaluated presented a high content of biodegradable organic matter, allowing for methane percentages between 60% and 70%. Regarding cumulative methane production, the highest yield was observed at the San Miguel community kitchen, with 270.88 mL CH₄/g VS, demonstrating good energy potential and stability in the anaerobic digestion process. Overall, the results show that food waste from community kitchens can be used through anaerobic digestion and transformed into a clean energy source, reducing pollution and promoting responsible waste management. Implementing this technology would contribute to environmental sustainability and promote local development in the region.

Keywords: Anaerobic digestion, Biogas, Methane, Food waste, Organic waste.

Introducción

En países en desarrollo, la fracción orgánica constituye entre el 50 y 70% de los residuos sólidos municipales, siendo los residuos de alimentos (RA) el principal componente (Casallas-Ojeda et al., 2020). Diversos reportes mencionan que los residuos alimentarios (RA) constituyen aproximadamente entre el 30% y el 60% de los residuos sólidos municipales a nivel mundial. Asimismo, se proyecta que para el año 2025 la generación de RA alcanzará los 2.2 billones de toneladas (Ma and Liu, 2019). Además, de acuerdo con la FAO, cada año 1/3 de los alimentos producidos se desperdician como residuos, consecuentemente las pérdidas económicas se estiman en unos 7.500 T\$. El elevado desperdicio de alimentos no solo implica pérdidas económicas significativas, sino también un impacto ambiental considerable debido a la generación de gases de efecto invernadero y el uso ineficiente de recursos naturales.

De este modo, encontrar un método de tratamiento adecuado es crucial para resolver este creciente problema de generación de RA. Actualmente, los vertederos e incineración son los destinos más populares para la disposición final de RA; sin embargo, estos métodos incrementan los costos de tratamiento y causan problemas secundarios de contaminación, como la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), emisión de gases tóxicos, olores e infiltración de lixiviados. Con la disminución de combustibles fósiles y preocupación acerca del cambio climático, la energía renovable se está convirtiendo en una opción atractiva. La mayoría de la energía renovable se usa para generar electricidad y el combustible renovable es aún un suministro limitado. La utilización de gas natural representa una gran porción del consumo energético, y más del 96% del gas natural viene de los combustibles fósiles (US EIA, 2022). Ante este contexto, la digestión anaerobia de residuos agroindustriales (RA) representa una alternativa relevante, ya que posibilita la producción de biogás, una fuente de energía renovable capaz de sustituir parcialmente al gas natural y contribuir positivamente a la mitigación del impacto ambiental mediante la reducción de residuos.

Debido a los problemas de los RA y la necesidad de biocombustibles, las tecnologías de bioconversión como la digestión anaerobia (DA), es una opción muy atractiva. La digestión anaerobia es un proceso bioquímico que se desarrolla en ausencia de oxígeno molecular. Este mecanismo consta de varias etapas, cada una llevada a cabo por distintos microorganismos

especializados. Durante la DA, compuestos complejos tales como proteínas, lípidos y carbohidratos son degradados hasta generar productos simples, entre los que destacan el biogás (compuesto de CH_4 y CO_2), con alto potencial energético—y el digestato o biol, el cual puede emplearse como fertilizante orgánico ((Casallas-Ojeda et al., 2020). Los RA representan un desafío ambiental debido a su volumen y composición. La DA permite aprovechar estos residuos para producir energía renovable y fertilizantes, contribuyendo así a una gestión más sostenible. El biogás se puede usar como combustible y su poder calorífico varía entre 26 y 30 MJ/m^3 según la cantidad de metano. Los RA destacan por su alto potencial de metano: 0.5–0.6 $\text{m}^3/\text{kg SV}$ (Al Seadi et al., 2013)

En este sentido, la implementación de la DA en comedores representa una estrategia innovadora y sostenible para el aprovechamiento de los RA generados diariamente. A través de esta tecnología, los RA pueden transformarse eficientemente en biogás, proporcionando una fuente alternativa de energía renovable para actividades internas del propio comedor, como la cocción de alimentos. Además, el proceso de DA produce un fertilizante orgánico, el cual puede emplearse en huertos urbanos, o cultivos comunitarios. De esta manera los comedores no solo contribuyen a la reducción de emisiones contaminantes y el manejo responsable de residuos, sino que también fortalecen el vínculo con la sostenibilidad y el desarrollo local, convirtiendo un problema ambiental en una oportunidad energética y social. Diversos estudios han evaluado el potencial de generación energética a partir de RA, principalmente a nivel provincial y nacional (Bong et al., 2018). Por ejemplo, investigaciones realizadas en zonas urbanas de Vietnam, Estados Unidos y Australia señalan que la producción de biogás puede aportar entre el 2.2% y el 4.7% de la demanda energética.

8

Para estimar el potencial de producción de metano a partir de RA, se llevan a cabo pruebas de Potencial Bioquímico de Metano (PBM). Estas pruebas, ampliamente reconocidas, permiten evaluar la viabilidad del proceso de DA en diversos sustratos y constituyen el primer paso en el diseño de sistemas eficientes de aprovechamiento energético (Casallas-Ojeda et al., 2020). Las pruebas PBM consisten en inocular los sustratos bajo condiciones anaerobias controladas y medir la producción de metano durante un periodo determinado. Los resultados obtenidos permitirían seleccionar si los RA son sustratos adecuados y optimizar el diseño de los biodigestores si se desea instalar una planta de DA a escala real, contribuyendo a una mayor eficiencia energética y reducción de costos operativos.

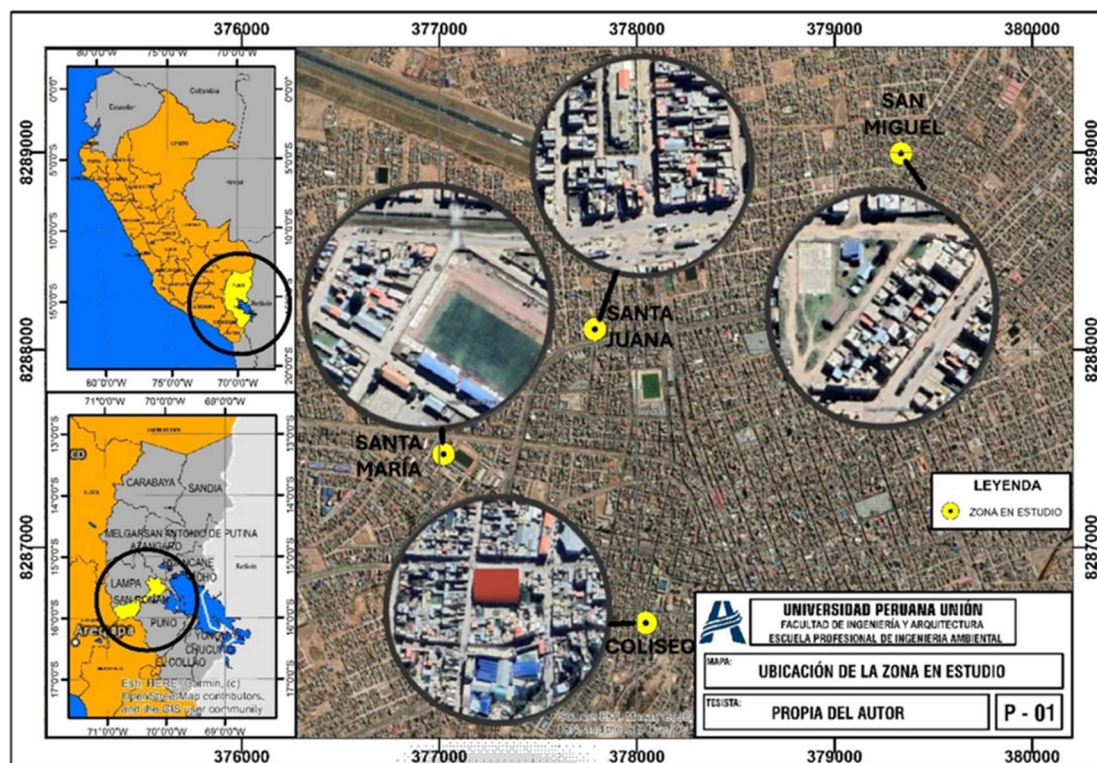
De acuerdo con lo expuesto anteriormente, el PBM de residuos alimentarios (RA) se analizó para determinar la tasa de conversión a metano. En este estudio, los RA fueron recolectados diariamente durante una semana de cuatro comedores populares ubicados en la ciudad de Juliaca, Perú, luego se almacenaron en condiciones controladas para las pruebas PBM. En consecuencia, el objetivo principal consistió en evaluar la producción máxima de metano a partir de estos residuos utilizando pruebas de PBM. La evaluación de la producción de metano es fundamental para optimizar el aprovechamiento energético y contribuir a la gestión sostenible en la ciudad de Juliaca.

Materiales y métodos

Recolección y preparación de muestras de residuos alimentarios de comedores populares

Las muestras de residuos alimentarios (RA) destinadas a las pruebas de biodegradabilidad se obtuvieron en cuatro comedores populares de la ciudad de Juliaca, Perú: Coliseo, Santa Maria, San Miguel y Santa Juana, como se muestra en la fig. 1.

Fig. 1: Mapa de ubicación de los comedores populares



Fuente. Elaboración propia

La recolección de RA se realizó en los cuatro comedores populares, seleccionados para asegurar la representatividad de los residuos generados en contextos urbanos. Se siguió un protocolo de muestreo basado en la selección del sitio de muestreo donde se eligieron 4 comedores populares. La frecuencia de muestreo se realizó durante 8 días para tener variaciones diarias; para la preparación de las muestras en campo, se utilizaron bolsas de plástico limpias de y rotuladas, separando solo los RA de verduras y hortalizas tales como, cáscaras de zanahoria, papa y cebolla, restos de tomate, lechuga, repollo, brócoli, apio, calabaza y pepino que no fueron cocinados es decir residuos orgánicos y son pesados en una balanza digital de 40 kg. La obtención de la muestra representativa se realizó empleando el método de cuarteo. Para ello, todos los RA fueron mezclados sobre una superficie limpia y divididos en cuatro partes iguales; se seleccionó un cuarto de la mezcla y se descartó el resto. Este procedimiento se repitió hasta lograr una muestra final de 2 kg, esta muestra final se puso en una bolsa de cierre hermético para evitar contaminación cruzada y pérdida de humedad e inmediatamente después se llevó al laboratorio para efectuar los análisis correspondientes, que incluyen determinaciones de humedad, pH y contenido de materia orgánica (Ministerio del Ambiente (MINAM), 2019).

Es importante mencionar que, en laboratorio, se procedió a homogeneizar las muestras mediante trituración con una licuadora doméstica. Este paso es esencial para obtener una mezcla representativa y reducir el tamaño de partícula, facilitando la degradación durante la DA. Posteriormente, se analizaron parámetros clave de los RA, tales como pH, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), humedad y contenido de cenizas. Estos análisis permiten caracterizar la naturaleza de los residuos y ajustar las condiciones experimentales de las pruebas PBM.

Preparación y caracterización del inóculo

Para la ejecución de los ensayos PBM, se utilizó un inóculo obtenido de un biodigestor tubular de 16 m³ instalado en el campus de la Universidad Peruana Unión, Juliaca. El biodigestor es alimentado con estiércol bovino. Este inóculo fue preincubado a una temperatura de 30°C durante cinco días, con el propósito de aclimatarlo a las condiciones experimentales y promover la actividad microbiológica fundamental para el proceso de digestión anaerobia. La preincubación se llevó a cabo bajo condiciones anaerobias controladas, lo que permitió asegurar la adaptación y activación de los microorganismos responsables de la digestión en el ambiente experimental.

Después de la preincubación, se procedió a la caracterización fisicoquímica. Se evaluaron parámetros como pH, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), ácidos grasos volátiles AGV), alcalinidad total (AT), humedad y contenido de cenizas.

Métodos analíticos

La caracterización fisicoquímica de las pruebas PBM se realizó tanto al inicio como al final del proceso (afluente y efluente), siguiendo los procedimientos estandarizados para asegurar la confiabilidad de los resultados. Todos los análisis se realizaron de acuerdo con Standart Methods (APPHA, 2017). Los contenidos de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), humedad y cenizas se determinaron mediante el calentamiento de las muestras en una estufa (BINDER, Alemania) a 105°C durante 24 horas. Posteriormente, para la medición de SV y cenizas, se utilizó una mufla (PROTHERM, Turkia) calcinando las muestras a 550°C durante 1 hora. La determinación de pH se realizó utilizando un potenciómetro de mesa (HANNA, EE. UU.) mediante el método potenciométrico. Para los análisis de ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (AT), las muestras fueron centrifugadas a 5000 rpm durante 30 minutos. El

sobrenadante resultante se utilizó para las determinaciones. Tanto el AGV como el AT se cuantificaron mediante el método titrimétrico descrito por Jobling et al., (2014). Las soluciones empleadas para determinar tanto AGV y AT fueron NaOH 0.1N y HCl 0.1N.

Configuración experimental y monitoreo del proceso

Las muestras de RA preparadas se utilizaron directamente para la evaluación de los ensayos PBM, permitiendo determinar la viabilidad de los RA como sustratos para la DA, así como optimizar el diseño y operación de futuros biodigestores a escala de comedor popular o comunitario.

Las pruebas PBM se desarrollaron de acuerdo a la metodología propuesta por (Holliger et al., 2016). Las pruebas se llevaron a cabo por triplicado en botellas serológicas de 120 ml, con un volumen de trabajo de 60 ml y 60 ml de espacio de cabeza para la acumulación del biogás. La relación inóculo – sustrato (RIS) en base a los SV fue de 2. Un blanco libre de sustrato fue incluido para medir la producción de metano endógena del inóculo. Después que las botellas fueron llenadas con las cantidades necesarias de inóculo y sustrato, el espacio de cabeza fue gaseado con gas N₂ por 30 segundos, y todas las botellas fueron sellados con septos de butilo y agrafes de aluminio para mantener condiciones anaerobias. Finalmente, las botellas se incubaron a 35 °C hasta la culminación de las pruebas, es decir, hasta que ya no se registre producción de biogás.

El biogás y CH₄ producido durante las pruebas fueron cuantificados mediante el método de densidad de gases (Gas Density Biochemical Potential Test, GD-BMP) (Justesen et al., 2019). El volumen de metano y biogás fueron ajustados a condiciones estándar, 100 kPa de presión y temperatura de 273.15 K.

El método de GD-BMP se basa principalmente en medir en cada evento de muestreo la pérdida de masa de la botella y el volumen de biogás venteado, con estas mediciones se obtienen la densidad y composición del biogás. La densidad de biogás (p_b , g mL⁻¹) a condiciones estándar se calcula a partir de la pérdida de masa de la botella (Δm_b , g) y volumen de biogás estandarizado (V_b , mL), con corrección del contenido de vapor de agua venteado (c_{H_2O} , g mL⁻¹) ver Ec. 1.

$$p_b = \frac{\Delta m_b}{V_b} - c_{H_2O}. \quad (1)$$

El contenido de vapor de agua venteado en el biogás (c_{H_2O} , g mL⁻¹) es calculado a partir de la masa molar de agua ($M_{H_2O} = 18.02 \text{ g mol}^{-1}$), presión del biogás en el espacio vacío de la botella justo antes del venteo (P_{hs} , kPa), y el volumen molar del biogás ($v_b = 22300 \text{ mL mol}^{-1}$), como se muestra en la ecuación 2:

$$c_{H_2O} = M_{H_2O} \cdot \frac{p_{H_2O}}{P_{hs} - p_{H_2O}} \cdot \frac{1}{v_b} \quad (2)$$

Luego, la masa molar del biogás (M_b , g mol⁻¹) es obtenido de la densidad del biogás:

$$M_b = p_b \cdot v_b \quad (3)$$

Finalmente, la fracción molar de CH₄ en el biogás (x_{CH_4}) es calculado a partir de la masa molar de CO₂ ($M_{CO_2} = 44.01 \text{ g mol}^{-1}$), CH₄ ($M_{CH_4} = 16.04 \text{ g mol}^{-1}$) y biogás (M_b):

$$x_{CH_4} = \frac{M_{CO_2} - M_b}{M_{CO_2} - M_{CH_4}} \quad (4)$$

Todas estas ecuaciones se encuentran detalladas y explicadas en el estudio realizado por Justesen et al. (2019).

Además, se utilizaron el modelo de Gompertz describe de manera adecuada la producción de metano en procesos de digestión anaerobia, ya que incorpora una fase inicial de adaptación microbiana. En esta etapa, la producción de metano es limitada debido a la aclimatación de los microorganismos al sustrato. Posteriormente, se presenta una fase de crecimiento acelerado, caracterizada por un incremento significativo en la producción de metano como resultado de una mayor actividad biológica. Finalmente, el proceso alcanza una fase estacionaria, en la cual la producción se estabiliza al aproximarse a su valor máximo. Este comportamiento sigmoideal permite representar de forma más realista la dinámica del proceso, por lo que el modelo resulta adecuado para evaluar la generación de metano a partir de residuos de alimentos. El cual considera la fase de adaptación microbiana. La ecuación se expresa como:

$$B(t) = B_0 \cdot \exp\left[-\exp\left(\frac{R_m \cdot e}{B_0} (\lambda - t) + 1\right)\right]$$

donde $B(t)$ es la producción acumulada de metano en el tiempo t , B_0 es el potencial máximo de producción, R_m es la tasa máxima de producción y λ representa el tiempo de latencia.

Análisis estadístico

Los resultados derivados de la caracterización fisicoquímica y las pruebas PBM fueron analizados mediante herramientas de estadística descriptiva. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis estadístico utilizando el software Statgraphics, aplicando un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95% (p -valor < 0). Asimismo, la desviación estándar de los triplicados fue calculada empleando Microsoft Excel.

Para garantizar la confiabilidad de los datos y propiciar una interpretación adecuada de los resultados, se realizó una comparación entre los valores observados en las distintas condiciones experimentales, prestando especial atención a las diferencias en los parámetros medidos antes y después del proceso de digestión anaerobia. Este enfoque permitió identificar tendencias y variaciones en la eficiencia del sistema, facilitando el análisis de la producción de metano y la evaluación del desempeño de los sustratos utilizados en las pruebas, tal como se detalla en la sección de resultados y discusión.

Resultados y discusión

Características de los residuos de alimentos

La Tabla 1 presenta las características fisicoquímicas de los cuatro comedores populares. En general, se observa una variabilidad entre los distintos sustratos, lo cual es común en residuos de origen domestico o de comida debido a la heterogeneidad de patrones de consumo durante los días e incluso durante un mismo día, el cual puede ser influenciado por el tipo de comida preparado o los métodos de manipulación.

Los valores de ST entre las distintas muestras: la concentración más baja ocurrió en Santa María (149.75 ± 0.72), mientras que la más elevada se registró en Santa Juana (210.46 ± 4.43). Los SV exhiben una tendencia comparable, con valores desde 130.76 ± 1.18 para Santa María hasta 181.66 ± 4.21 para Santa Juana. Por lo que respecta al contenido de humedad, los resultados obtenidos son característicos a residuos de alimentos, conforme a lo reportado por Paritosh et al., (2017), encontrándose dentro del rango de 75 a 84%. Además, diversos

estudios han demostrado que el contenido de ST y SV guarda una relación directamente proporcional con la producción de biogás; por lo tanto, niveles bajos de ST y SV se asocian con una menor generación de biogás (Tiong et al., 2023).

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 1, se observa que los sustratos presentan un alto contenido de materia biodegradable, lo cual confirma su potencial para ser empleados como sustratos en el proceso de DA y su conversión en biogás. La variabilidad observada entre los comedores permite identificar a San Miguel y Santa Juana como los sustratos con mayor aporte energético.

Tabla 1: Caracterización fisicoquímica del inoculo y residuos de alimentos de comedores populares.

Parámetro	Inoculo	Coliseo	Santa Juana	Santa María	San Miguel
Solidos totales (g/kg)	5.71 ± 0.03	181.17 ± 3.03	210.46 ± 4.43	149.75 ± 0.72	155.84 ± 6.91
Solidos volatiles (g/kg)	3.53 ± 0.02	157.27 ± 2.81	181.66 ± 4.21	130.76 ± 1.18	141.85 ± 7.15
Solidos Fijos (g/kg)	2.19 ± 0.00	23.90 ± 0.78	28.81 ± 0.79	18.99 ± 0.49	13.99 ± 0.25
Humedad (%)	99.43 ± 0.00	81.88 ± 0.30	78.95 ± 0.44	85.03 ± 0.07	84.42 ± 0.69

Fuente: elaboración propia

Producción de metano a través de los ensayos PBM.

La figura 2 presenta, para cada sustrato, la producción experimental de metano ($\text{mL CH}_4/\text{g SV}$) obtenida en los cuatro comedores analizados a lo largo de 116 días de DA: Coliseo, Santa María, San Miguel y Santa Juana. En todas las curvas de producción, bajo condiciones estándar de temperatura y presión, se identifica una fase exponencial de producción acelerada de metano que abarca desde el día 0 hasta el día 15. Posteriormente, a partir del día 15, se evidencia una disminución en la tasa de producción de metano, lo que indica la estabilización del proceso de DA, sugiriendo que los microorganismos han alcanzado un equilibrio en su actividad metabólica.

La producción de metano inició desde el día 0, lo que sugiere una fase hidrogénica sumamente rápida y breve, confirmando así que la producción de metano fue optima al reducir el tiempo de conversión de los diferentes compuestos. Aunque la fase hidrogénica fue breve, es crucial para la rápida conversión de compuestos complejos en AGVs, productos intermedios esenciales en la DA, que posteriormente alimentan las etapas acidogénica y

acetogénica. El mayor volumen de producción se registró entre los días 0 y 25, período asociado principalmente a la actividad acidogénica y acetogénica, mientras que la etapa metanogénica ocurrió de manera simultánea. Posterior al día 25, se identificó una desaceleración en la generación de metano, lo que podría señalar el agotamiento de la fracción fácilmente biodegradable. Estos resultados concuerdan con lo reportado en estudios previos que utilizan residuos orgánicos (Zhou et al., 2018; Angelidaki et al., 2009)

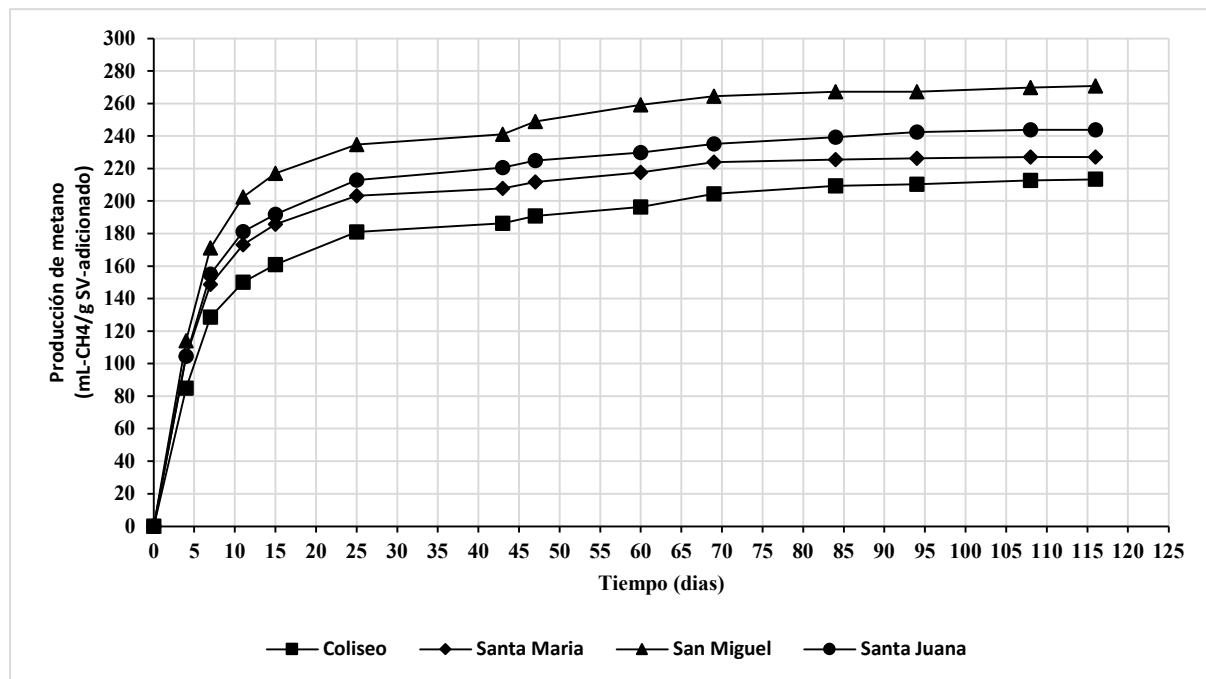
Se observa que la mayor producción acumulada de metano fue alcanzada por San Miguel, con una producción de 270.88 mL CH₄/g SV, lo que sugiere condiciones óptimas de biodegradabilidad del sustrato. Santa Juana y Santa María mostraron producciones intermedias, mientras que Coliseo presentó la menor producción, con un valor de 213.43 mL CH₄/g SV. Estas diferencias podrían atribuirse a variaciones en la composición de los sustratos. Por ejemplo, la mayor proporción de materia orgánica fácilmente degradable en San Miguel como restos de frutas y verduras podría explicar su mayor producción de metano, lo que le convierte en un sustrato viable para procesos de DA. Mientras que Coliseo presenta una mayor cantidad de compuestos como el tipo de residuos con mayores contenidos de fibra, celulosa y hemicelulosa que pueden limitar su biodegradabilidad, esto sugiere que los residuos de Coliseo podrían requerir pretratamientos adicionales para mejorar su aprovechamiento energético en procesos de DA.

Es importante notar que todas las curvas de producción presentaron un comportamiento similar, debido a que se está trabajando con sustratos que provienen del mismo tipo de fuente; todos los sustratos utilizados provienen de desperdicios de alimentos de comedores populares. Esto sugiere que la composición fisicoquímica y nutricional de los sustratos genera condiciones similares para el proceso de DA, lo que se ve reflejado en las curvas de producción de metano comparables.

Los resultados mostrados en la figura 2 indican que los residuos de comedor son sustratos prometedores para la producción de metano, debido a su alta biodegradabilidad y a su contenido energético. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas y refuerzan la viabilidad de implementar sistemas de DA de residuos de comida. Estudios previos como el de Zhang et al., (2019) han reportado producciones de metano de hasta 300 mL CH₄/g SV para frutas tropicales. Asimismo, la investigación de Li et al. (2020) sobre residuos de panadería mostraron rendimientos similares a los aquí reportados, con producción de 250 mL CH₄/g SV,

confirmando su potencial energético. Todas estas investigaciones coinciden en la necesidad de transformar los residuos orgánicos en recursos útiles como metano.

Fig. 2: Producción acumulada de metano.



Fuente: Elaboración propia

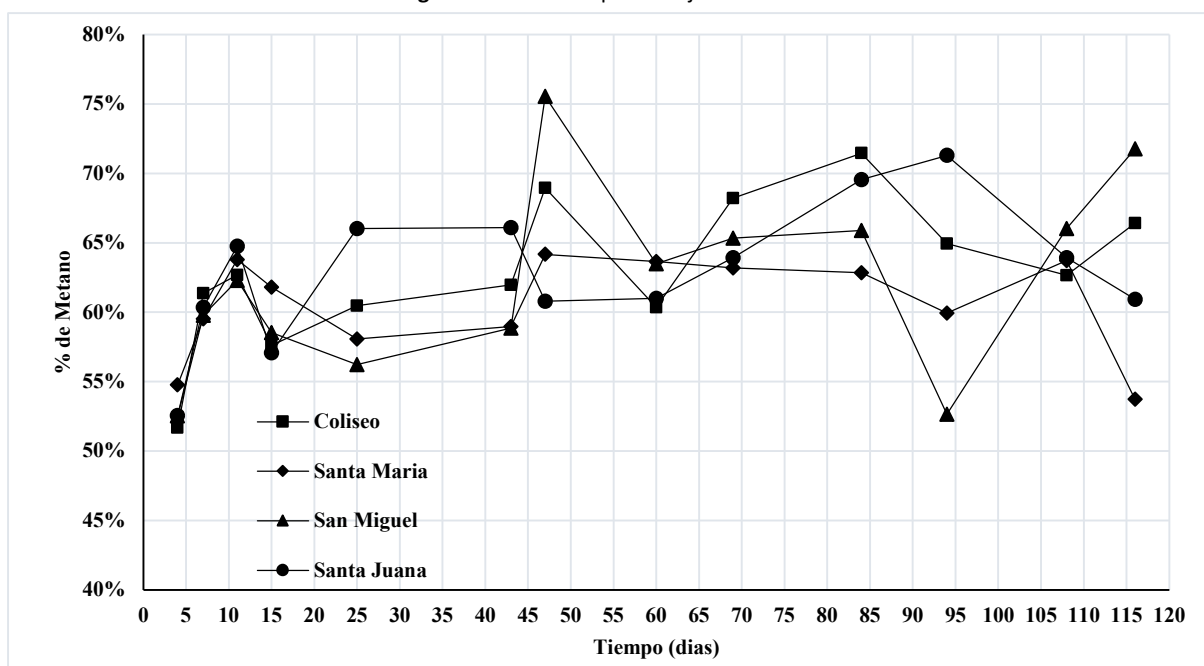
La figura 3 ilustra la evolución del porcentaje de metano (% CH₄) generado en Coliseo, Santa María, San Miguel y Santa Juana durante un periodo de 116 días. Los datos muestran ligeras fluctuaciones en la concentración de metano, posiblemente atribuidas al tipo de sustrato utilizado. En términos generales, todos los experimentos evidenciaron una fase inicial de adaptación microbiana durante los primeros 11 días, con aumentos en el % CH₄ desde aproximadamente 51% hasta 65%. Posteriormente, se produjo un incremento sostenido y constante en el porcentaje de metano, alcanzando valores máximos entre los días 45 y 85. Los resultados demostraron porcentajes de metano similares en todos los ensayos, con valores promedio de 62.99 % para Coliseo, 60.63 % para Santa María, 62.22 % para San Miguel y 62.95 % para Santa Juana. Estos hallazgos sugieren una notable estabilidad en el proceso de digestión anaerobia (DA) y una adecuada relación entre AGV y AT, como se detallará en la siguiente sección.

En los primeros 10 a 20 días de operación, el porcentaje de metano aumentó rápidamente desde valores próximos al 50 % hasta aproximadamente 60–65 %, lo que indica una fase activa de adaptación de la comunidad metanogénica. Posteriormente, las concentraciones de metano fluctuaron entre 55 y 75 %, dependiendo del tipo de sustrato utilizado. El sustrato San Miguel

presentó los valores más altos de % CH₄, alcanzando picos superiores al 75 %, mientras que los experimentos Coliseo y Santa Juana mantuvieron composiciones relativamente estables entre el 60 y 70 % durante la mayor parte de los ensayos. Por otro lado, Santa María exhibió una ligera disminución hacia el final del período experimental, con valores inferiores al 55 %, lo que podría asociarse a una mayor acumulación de AGV en comparación con los otros experimentos o a una leve reducción de la actividad metanogénica.

A partir del décimo día, la mayoría de los experimentos presentaron una tendencia estable, con variaciones inferiores al 10 %, lo que evidencia que el proceso de DA alcanzó un equilibrio entre las etapas acidogénica y metanogénica. Los valores de % CH₄ registrados en este estudio se encuentran dentro del rango reportado para la DA de residuos alimentarios, entre 60 % y 70 %, (Li et al., 2018; Zhang et al., 2020). Estos hallazgos confirman que los residuos alimentarios procedentes de comedores populares tienen estabilidad operacional adecuada, lo cual respalda su potencial como sustrato para la generación de biogás.

Fig. 3: Evolución del porcentaje de metano



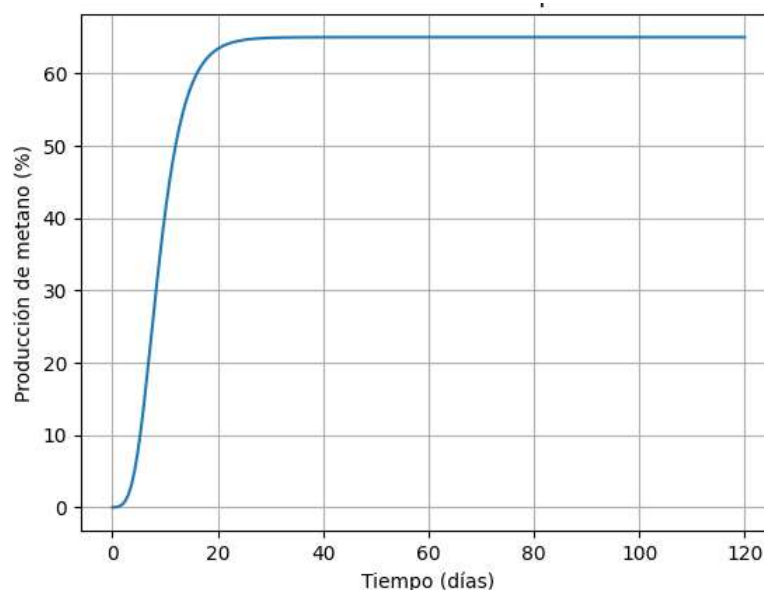
Fuente: Elaboración propia

Aplicación en la ecuación del modelo Gompertz

En la figura 4 correspondiente, la producción de metano presenta un comportamiento sigmoideal que puede ser descrito adecuadamente mediante el modelo de Gompertz. Se observa una fase inicial de baja producción (fase de latencia 0-5 días), atribuida al periodo de

adaptación de los microorganismos al sustrato. Posteriormente, la generación de metano se incrementa de manera acelerada (fase exponencial 5-20 días), lo que indica una mayor actividad microbiana y una rápida degradación de la materia orgánica. Finalmente, el proceso tiende a estabilizarse (fase estacionaria >20 días), alcanzando un valor máximo de producción cerca de 65% lo cual evidencia el agotamiento progresivo del sustrato biodegradable.

Fig. 4. Modelo cinético de Gompertz



Fuente: Elaboración propia

Este comportamiento ha sido ampliamente reportado en estudios recientes de digestión anaerobia, donde el modelo de Gompertz permite describir adecuadamente la fase de latencia, el crecimiento exponencial y la estabilización del proceso (Zhang et al., 2021; Omondi et al., 2023; Roberts et al., 2023). Asimismo, investigaciones más recientes han demostrado que este modelo presenta un alto nivel de ajuste y precisión para predecir la producción de metano en distintos sustratos orgánicos, con coeficientes de determinación superiores a 0.97 en muchos casos ((Tite et al., 2026; Wang et al., 2024; Zhang et al., 2025)

Comportamiento de parámetros fisicoquímicos durante el proceso de DA.

Los resultados obtenidos de las pruebas PBM muestran una reducción de los ST y SV en todos los experimentos, indicando la degradación de la materia orgánica biodegradable. En el caso del experimento coliseo, los ST disminuyeron de 5.95 g/kg a 3.98 g/kg, y los SV se redujeron de 4 g/kg a 2.20 g/kg. Similares comportamientos se observaron en los demás experimentos (Santa Juana, Santa María y San Miguel), con reducciones que alcanzaron en promedio hasta

50 % (ver tabla 1). Angelidaki et al., (2009) y Batstone et al., (2002) han reportado variaciones de ST y SV comparables a las identificadas en el presente estudio, destacando que la disminución de los SV está estrechamente vinculada con la producción de metano, dado que los SV constituyen la fracción orgánica susceptible de biodegradación anaerobia.

En cuanto al pH, todos los experimentos se mantuvieron dentro del rango recomendado para la actividad metanogénica (entre 8.26 a 8.38), disminuyendo ligeramente al final de las pruebas PBM (entre 7.56 a 7.84). Estos valores de pH indican la estabilidad del proceso de DA, indicando que existe una buena relación en la concentración de AGV y AT (Zhou et al., 2011; Li et al., 2017). Según lo mencionado por Speece, (2008), para obtener una buena producción de biogás y una adecuada actividad de los microorganismos metanogénicos, el pH debería estar entre 7 a 8.

Tabla 2. Comportamiento de parámetros fisicoquímicos

Parámetro		ST	SV	pH	AGV	AT	AGV/AT
Unidad		g/kg	g/kg	--	mg / L	mg/L	--
Coliseo	Inicio	5.95 ± 0.16	4 ± 0.10	8.26 ± 0.01	594.00 ± 42.00	1320.00 ± 26.46	0.45 ± 0.04
	Final	3.98 ± 0.25	2.20 ± 0.17	7.76 ± 0.10	560.00 ± 13.86	1920.33 ± 199.53	0.29 ± 0.03
Santa Juana	Inicio	6.16 ± 0.44	4.06 ± 0.30	8.30 ± 0.03	588.00 ± 36.00	1146.67 ± 77.67	0.51 ± 0.02
	Final	4.12 ± 0.03	2.11 ± 0.01	7.77 ± 0.03	109.20 ± 7.49	2293.33 ± 118.08	0.05 ± 0.00
Santa María	Inicio	4.83 ± 0.70	3.19 ± 0.45	8.31 ± 0.01	584.80 ± 13.22	1346.67 ± 37.86	0.43 ± 0.02
	Final	3.90 ± 0.20	2.05 ± 0.13	7.84 ± 0.04	111.24 ± 7.42	2174.33 ± 14.98	0.05 ± 0.00
San Miguel	Inicio	6.67 ± 0.72	4.53 ± 0.58	8.38 ± 0.03	548.00 ± 36.17	1080.00 ± 45.83	0.51 ± 0.04
	Final	3.60 ± 0.04	1.93 ± 0.07	7.56 ± 0.11	544.00 ± 61.29	2133.33 ± 70.24	0.25 ± 0.02

Fuente: Elaboración propia

Durante el proceso de experimentación, los valores de AGV mostraron comportamientos contrastantes. En los experimentos realizados en Santa Juana y Santa María, se observó una disminución significativa en el contenido de AGV, pasando de 588 mg/L y 584,80 mg/L a 109,20 mg/L y 111,24 mg/L, respectivamente. Evidenciando una conversión eficiente de los ácidos intermedios a CH₄. Además, la AT aumento en todos los experimentos, alcanzando valores finales entre 1920 y 2293 mg/L. todos estos valores reflejan a capacidad del sistema para mantener el pH en valores aceptables, favoreciendo la estabilidad del proceso de DA

(Appels et al., 2008). La capacidad buffer del sistema (relación AGV/AT) mostraron valores iniciales entre 0.43 a 0.51 y valores finales de 0.05 a 0.29, muy inferiores a 0.4. según Ripley et al., (1986), valores de AGV/AT menores a 0.4 indican estabilidad y eficiencia en el proceso, mientras que valores superiores a 0.4 indican sobrecarga o inhibición. Por lo tanto, los resultados confirman que el proceso de DA se desarrolla de manera estable.

Los valores presentados en la Tabla 2, tanto al inicio como al final de los experimentos, demuestran una conversión eficiente de la materia orgánica a biogás. Dichos resultados se alinean con investigaciones previas sobre residuos alimentarios, en las que la producción específica de metano varía entre 350 y 500 mL CH₄/g SV (Zeshan et al., 2012; Labalut et al., 2011). En conclusión, los residuos provenientes de comedores populares empleados en el presente estudio evidenciaron una elevada biodegradabilidad. Esto sugiere que los RA son una fuente prometedora para la producción sostenible de biogás.

Conclusión

Los resultados obtenidos demuestran que los residuos de alimentos de verduras y hortalizas generados en comedores populares presentan un elevado potencial para su valorización energética mediante digestión anaerobia, condicionado por diferencias en su composición fisicoquímica. Las variaciones en sólidos totales y volátiles se reflejaron en el rendimiento de metano, evidenciando San Miguel como el sustrato con mayor capacidad de bioconversión (270.88 mL CH₄/g SV), mientras que Coliseo presentó el desempeño más limitado (213.43 mL CH₄/g SV). Asimismo, los porcentajes de metano obtenidos se mantuvieron dentro de rangos característicos de sistemas estables (60–63 %), con picos superiores en sustratos con mayor fracción biodegradable, evidenciando una adecuada actividad metanogénica y una eficiencia consistente en el proceso. Estos resultados confirman que, aun cuando los residuos provienen de una fuente común, su composición determina de manera significativa el potencial energético y la dinámica de degradación.

El seguimiento de parámetros operacionales mostró una degradación eficaz de la materia orgánica, con reducciones de hasta 50% en sólidos totales y volátiles, pH dentro de límites óptimos para la metanogénesis y relaciones AGV/AT inferiores al umbral de inestabilidad, lo que evidencia una operación química y biológica equilibrada. La disminución de ácidos grasos volátiles y el incremento en alcalinidad respaldan la conversión eficiente de intermediarios

orgánicos en metano, indicando que el sistema no presentó signos de inhibición durante el proceso. En conjunto, estos hallazgos permiten afirmar que los residuos estudiados constituyen una fuente viable y sostenida de biogás, reforzando el papel de la digestión anaerobia como tecnología clave para la gestión circular de residuos orgánicos y la generación descentralizada de energía en entornos comunitarios.

Referencias bibliográficas

- Al Seadi, T., Drosch, B., Fuchs, W., Rutz, D., & Janssen, R. (2013). Biogas digestate quality and utilization. In *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* (pp. 267–301). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857097415.2.267>
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, 59(5), 927–934. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- 5 Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). *The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*. <https://iwaponline.com/wst/article-pdf/45/10/65/30636/65.pdf>
- 6 Casallas-Ojeda, M. R., Marmolejo-Rebellón, L. F., & Torres-Lozada, P. (2020). Evaluation of simultaneous incidence of head space and temperature on biochemical methane potential in food waste. *Cogent Engineering*, 7(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1729514>
- 3 Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficarra, E., Fotidis, I., Frigon, J. C., De Laclos, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- 2 Jobling Purser, B. J., Thai, S. M., Fritz, T., Esteves, S. R., Dindale, R. M., & Guwy, A. J. (2014). An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water Research*, 61, 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.020>
- Justesen, C. G., Astals, S., Mortensen, J. R., Thorsen, R., Koch, K., Weinrich, S., Triolo, J. M., & Hafner, S. D. (2019). Development and validation of a low-cost gas density method for measuring biochemical methane potential (BMP). *Water (Switzerland)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/W11122431>
- Ma, Y., & Liu, Y. (2019). Turning food waste to energy and resources towards a great environmental and economic sustainability: An innovative integrated biological approach. In *Biotechnology Advances* (Vol. 37, Number 7). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.06.013>
- Ministerio del Ambiente. (2019). *GUÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES*. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/523785/Gu%C3%ADa_para_la_caracterizaci%C3%B3n_rsm-29012020__1_.pdf?v=1581976231
- 4 Omondi, E. A., Ndiba, P. K., Chepkoech, G. K., & Kegode, A. A. (2023). Modeling anaerobic co-digestion of water hyacinth with ruminal slaughterhouse waste for first order, modified gomperz and logistic kinetic models. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(3), 627–634. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.52775>

- 1 Paritosh, K., Kushwaha, S. K., Yadav, M., Pareek, N., Chawade, A., & Vivekanand, V. (2017). Food Waste to Energy: An Overview of Sustainable Approaches for Food Waste Management and Nutrient Recycling. In *BioMed Research International* (Vol. 2017). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2017/2370927>
- Roberts, S., Mathaka, N., Zeleke, M. A., & Nwaigwe, K. N. (2023). Comparative Analysis of Five Kinetic Models for Prediction of Methane Yield. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 104(2), 335–342. <https://doi.org/10.1007/s40030-023-00715-y>
- Tiong, Y. W., Sharma, P., Tian, H., Tsui, T. H., Lam, H. T., & Tong, Y. W. (2023). Startup performance and microbial communities of a decentralized anaerobic digestion of food waste. *Chemosphere*, 318. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137937>
- Tite, T. E., Ruíz Palomar, C., Gutiérrez Campillo, M. A., Ngema, P. T., de Godos Crespo, I., & García Alvaro, A. (2026). Advancing renewable bioenergy from livestock waste through microparticle-assisted anaerobic digestion. *Renewable Energies*, 4(1). <https://doi.org/10.1177/27533735251409599>
- Zhang, H., An, D., Cao, Y., Tian, Y., & He, J. (2021). Modeling the methane production kinetics of anaerobic co-digestion of agricultural wastes using sigmoidal functions. *Energies*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/en14020258>
- 1 Zhou, M., Yan, B., Wong, J. W. C., & Zhang, Y. (2018). Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: A mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways. In *Bioresource Technology* (Vol. 248, pp. 68–78). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.121>