

Jane

Evaluación de la eficiencia en la producción de biogás inoculado con microorganismos eficientes (EM) y excretas de ...



Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:596886324

Fecha de entrega

2 jun 2026, 3:40 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

2 jun 2026, 3:43 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

Evaluación de la eficiencia en la producción de biogás inoculado con microorganismos eficientespdf

Tamaño del archivo

419.3 KB

15 páginas

6318 palabras

36.254 caracteres

10% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 6%  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

- 8% Fuentes de Internet
- 4% Publicaciones
- 6% 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	hdl.handle.net	<1%
2	Internet	cjasience.com	<1%
3	Internet	repositorio.unicach.mx	<1%
4	Internet	ridda2.utp.ac.pa	<1%
5	Internet	www.researchgate.net	<1%
6	Trabajos entregados	Universidad Regional Autónoma de Los Andes on 2026-01-01	<1%
7	Trabajos entregados	CONACYT on 2017-03-28	<1%
8	Internet	portal.amelica.org	<1%
9	Internet	diariovoces.com.pe	<1%
10	Trabajos entregados	Universidad de Salamanca on 2025-10-31	<1%
11	Trabajos entregados	lasallemx on 2025-10-27	<1%

12	Internet	www.ije.ir	<1%
13	Internet	journals.cincader.org	<1%
14	Publicación	Carlos Igor Morr-Verenzuela, Eric Fuentes Latorre, Susanna Prat-González. "Evalu...	<1%
15	Internet	www2.mdpi.com	<1%
16	Internet	1library.org	<1%
17	Internet	bdigital.uncu.edu.ar	<1%
18	Internet	files.eric.ed.gov	<1%
19	Internet	gredos.usal.es	<1%
20	Internet	www.terralatinoamericana.org.mx	<1%
21	Publicación	Saire Roenfi Guerra Lima, Eduardo Juan Manzaneda Cabala, Franklyn Elard Zapan...	<1%
22	Internet	api.index-360.com	<1%
23	Internet	cienciasmarinas.com.mx	<1%
24	Internet	indico.una.py	<1%
25	Internet	repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar	<1%

26	Internet	revistas.usac.edu.gt	<1%
27	Internet	revistas.utm.edu.ec	<1%
28	Internet	rosap.ntl.bts.gov	<1%
29	Trabajos entregados	unasam on 2025-08-28	<1%
30	Internet	www.archbronconeumol.org	<1%
31	Internet	www.coursehero.com	<1%
32	Internet	www.news-medical.net	<1%
33	Trabajos entregados	Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador on 2023-09-02	<1%
34	Trabajos entregados	Universidad de los Hemisferios on 2026-05-23	<1%
35	Internet	pingpdf.com	<1%
36	Internet	renatiqa.sunedu.gob.pe	<1%
37	Internet	repositorio.utn.edu.ec	<1%
38	Internet	rsdjournal.org	<1%
39	Internet	worldwidescience.org	<1%

40	Internet	www.ijrte.org	<1%
41	Internet	www.jove.com	<1%
42	Internet	www.mdpi.com	<1%
43	Internet	www.metarevistas.org	<1%
44	Internet	www.tdx.cat	<1%

Evaluación de la eficiencia en la producción de biogás inoculado con microorganismos eficientes (EM) y excretas de bovino – 2025.
Jane Barrera Viena¹

Universidad Peruana Unión, Ingeniería Ambiental, Tarapoto, Perú

Autor de correspondencia: jane.barrera@upeu.edu.pe
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9712-5736>

Abstract

The objective of this study was to evaluate the efficiency of biogas production from bovine manure inoculated with effective microorganisms (EM) under tropical conditions. A completely randomized design was applied with two treatments (with and without EM), each with three replicates using 80 L artisanal biodigesters over 41 days. Variables such as biogas volume, temperature, pH, pressure, and C/N ratio were monitored, and statistical analyses were performed to assess data distribution and compare means. The results showed that the non-inoculated treatment achieved higher total biogas production (915.17 mL) compared to the EM treatment (641.77 mL), as well as a higher specific yield (30.54 ± 9.18 mL/kg versus 21.39 ± 4.61 mL/kg), with highly significant differences ($p < 0.001$). Additionally, the EM treatment reached approximately 70% of the control efficiency. It is concluded that the use of effective microorganisms does not improve biogas production from fresh bovine manure due to the presence of active native microbiota, allowing cost optimization and simplified biodigester operation.

Keywords

Biogas; Anaerobic digestion; Bovine manure; Effective microorganisms (EM); Specific biogas yield; Renewable energy; Artisanal biodigester.

Resumen

El objetivo de la investigación fue evaluar la eficiencia en la producción de biogás a partir de excretas bovinas inoculadas con microorganismos eficientes (EM) bajo condiciones tropicales. Se aplicó un diseño completamente aleatorizado con dos tratamientos (con y sin EM), cada uno con tres repeticiones en biodigestores artesanales de 80 L durante 41 días. Se monitorearon variables como volumen de biogás, temperatura, pH, presión y relación C/N, y se realizó análisis estadístico mediante pruebas de normalidad, homogeneidad y comparación de medias. Los resultados evidenciaron que el tratamiento sin inoculación presentó mayor producción total de biogás (915.17 mL) en comparación con el tratamiento con EM (641.77 mL), así como una mayor producción específica (30.54 ± 9.18 mL/kg frente a 21.39 ± 4.61 mL/kg), con diferencias altamente significativas ($p < 0.001$). Asimismo, el tratamiento con EM alcanzó aproximadamente el 70% del rendimiento del control. Se concluye que la inoculación con microorganismos eficientes no mejora la producción de biogás en excretas bovinas frescas, debido a la actividad de la microbiota nativa, lo que permite optimizar costos y simplificar la operación de biodigestores.

Palabras claves

Biogás, Digestión anaerobia, Excretas bovinas, Microorganismos eficientes (EM), Producción específica de biogás, Energía renovable, Biodigestor artesanal

21

Introducción

La actividad pecuaria constituye uno de los sectores con mayor generación de residuos orgánicos a nivel mundial, principalmente derivados de las excretas bovinas, porcinas y avícolas. Estos residuos, cuando son manejados inadecuadamente, generan impactos ambientales significativos, entre los que destacan la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), la contaminación de cuerpos de agua y los riesgos sanitarios asociados a su acumulación (Trujillo & Quito, 2024). Frente a esta problemática, la digestión anaerobia ha surgido como una alternativa tecnológica clave para transformar dichos residuos en biogás, una fuente de energía renovable con alto potencial para zonas rurales y productivas (Carrera et al., 2023).

34

En este contexto, la problemática adquiere especial relevancia en la región San Martín, donde la actividad ganadera presenta una importante presencia de bovinos. Según el Servicio Nacional de Sanidad Agraria, en la región se han registrado más de 33 000 cabezas de ganado bovino (SENASA, 2021). Considerando que cada bovino puede generar entre 10 y 20 kg de excretas frescas por día, la producción de residuos orgánicos resulta significativa; sin embargo, en muchos casos estos no reciben un tratamiento adecuado, lo que incrementa el riesgo de contaminación ambiental. Esta situación no solo contribuye a la degradación ambiental, sino que también refleja un limitado aprovechamiento de estos residuos como recurso energético. A pesar del potencial de la digestión anaerobia en sistemas artesanales, su implementación continúa siendo restringida, principalmente por la falta de conocimiento técnico y la incertidumbre sobre la eficiencia de tecnologías complementarias, como la inoculación con microorganismos eficientes en condiciones tropicales.

Durante la última década, las investigaciones en producción de biogás han avanzado hacia la optimización de los factores que determinan su eficiencia, tales como la calidad del sustrato, las condiciones de fermentación, la temperatura, la relación carbono/nitrógeno y el pH del sistema. Estudios recientes señalan que los residuos pecuarios poseen un alto contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable, lo cual los convierte en sustratos idóneos para la obtención de biogás de alta calidad (Ante & Naranjo, 2024). Sin embargo, la eficiencia del proceso continúa siendo variable, especialmente cuando se utilizan excretas bovinas, debido a la composición fibrosa y la presencia de microorganismos nativos que pueden ralentizar la biodegradación (Chicoma & Quezada, 2022).

En respuesta a estas limitaciones, la inoculación con microorganismos eficientes (EM) ha sido propuesta como una estrategia innovadora para mejorar la actividad microbiana, acelerar la hidrólisis y optimizar la producción de metano. Espitia & Ruiz (2022) y Kumari & Chandel (2023) indican que los EM incrementan la estabilidad del proceso y favorecen la generación de biogás; sin embargo, los resultados aún no son concluyentes para todos los tipos de sustratos y condiciones ambientales. En particular, se carece de estudios actualizados que evalúen el efecto directo de los EM sobre excretas bovinas en contextos tropicales, donde la temperatura ambiente puede influir de manera significativa en la cinética de digestión anaerobia.

Pese a los avances logrados, persisten vacíos críticos en el conocimiento. Entre ellos destacan: (a) la falta de estudios experimentales con diseños controlados que comparen tratamientos con y sin EM; (b) la escasez de información sobre la dinámica físico-química del proceso en sistemas de pequeña escala utilizados por productores locales; y (c) la limitada evidencia sobre la mejora real del rendimiento energético cuando se emplean EM en excretas bovinas. Estos aspectos no resueltos justifican la necesidad de investigaciones aplicadas que aporten datos técnicos confiables y replicables, especialmente en regiones con alta actividad agropecuaria como San Martín.

1

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la eficiencia en la producción de biogás a partir de excretas de bovino inoculadas con microorganismos eficientes (EM), comparando su desempeño frente a un tratamiento sin inoculación y analizando las condiciones fisicoquímicas que intervienen en el proceso anaerobio. Bajo este enfoque, se plantea como hipótesis que la incorporación de EM incrementa significativamente la producción y calidad del biogás, mientras que la hipótesis nula establece que dicha inoculación no genera mejoras en el rendimiento. De este modo, se busca aportar evidencia científica que contribuya a optimizar el aprovechamiento energético de los residuos pecuarios y fortalecer la implementación de sistemas sostenibles en la región.

26

5

Materiales y Métodos

Área de estudio y condiciones generales

9

El estudio se desarrolló en el campus de la Universidad Peruana Unión, sede Tarapoto, ubicado en el distrito de Morales, provincia y departamento de San Martín, Perú. El área experimental fue georreferenciada mediante coordenadas UTM (WGS 84, Zona 18S), registrándose el punto X: 345621 m E y Y: 9284699 m N.

11

El entorno presenta condiciones climáticas tropicales. Durante el periodo experimental, la temperatura ambiente osciló entre 22 y 36 °C, mientras que la temperatura interna del biodigestor varió entre 26 y 32 °C, registrándose diariamente con el fin de evaluar su influencia en la producción de biogás.

16

El experimento tuvo una duración de 41 días con carga única por biodigestor.

Materiales y equipamiento

Para el desarrollo del experimento se emplearon seis biodigestores artesanales de 80 L de capacidad, cuyo diseño se basó en configuraciones de biodigestores de pequeña escala reportadas en la literatura para la digestión anaerobia de residuos orgánicos, adaptadas a condiciones experimentales controladas.

Cada biodigestor fue construido a partir de recipientes cilíndricos de plástico con cierre hermético, acondicionados con conexiones de PVC, válvulas de control, adaptadores y mangueras para la conducción del biogás. Asimismo, se incorporó un manómetro en cada unidad con la finalidad de monitorear la presión interna del sistema y verificar su estabilidad durante el proceso. El volumen de trabajo fue de 60 L de mezcla orgánica, dejando un volumen libre de 20 L destinado a la acumulación de biogás.

Para la verificación de la capacidad volumétrica del biodigestor se utilizó la ecuación correspondiente al volumen de un cilindro:

$$V_{cil} = \pi * r^2 * h$$

Dónde:

V_{cil} = Volumen del cilindro

r^2 = Radio del cilindro

h = Altura del cilindro

$$V_{cil} = 3.1416 * (0.15\text{m})^2 * 1.13\text{m}$$



donde, al reemplazar los valores ($r = 0.15\text{ m}$; $h = 1.13\text{ m}$), se obtuvo un volumen aproximado de 0.0798 m^3 ($\approx 80\text{ L}$).

4

El volumen de biogás se determinó mediante el método de desplazamiento de agua, en el cual el gas generado fue conducido hacia una botella invertida llena de agua, desplazando un volumen equivalente que fue medido diariamente para cuantificar la producción.

Adicionalmente, se utilizaron termómetros, pH-metro, balanza digital, teflón y microorganismos eficientes (EM), aplicados a una dosis de 10 ml/kg de excreta fresca.



Figure 1. Homemade 80 L biodigester with inlet and outlet points.
Figura 1. Biodigester artesanal de 80 L con puntos de entrada y salida.

Diseño experimental

Se empleó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con dos tratamientos: T1 (excreta bovina sin inoculación) y T2 (excreta bovina con adición de microorganismos eficientes, EM), cada uno con tres repeticiones, totalizando seis unidades experimentales.

Cada biodigester fue cargado con 30 kg de excreta bovina fresca, a la cual se adicionó agua no clorada hasta alcanzar un volumen total de 60 L, manteniendo una proporción aproximada de 1:1 (excreta:agua).

Previo a la carga del sistema, el sustrato fue caracterizado mediante análisis fisicoquímicos, considerando parámetros clave para la digestión anaerobia como pH, relación carbono/nitrógeno (C/N), materia orgánica, sólidos y conductividad eléctrica, debido a su influencia directa en la actividad microbiana y en la eficiencia del proceso.

En el tratamiento T2 se incorporaron microorganismos eficientes (EM) en una dosis de 10 mL por kg de excreta fresca, equivalente a 300 mL por biodigester, los cuales fueron añadidos de manera uniforme durante la preparación de la mezcla. Esta dosificación se encuentra dentro de los rangos reportados en estudios previos para la activación microbiana en sistemas anaerobios (Kumari & Chandel, 2023; Mata et al., 2020). No obstante, es importante precisar que dicha cantidad representa una fracción reducida del volumen total del reactor, en comparación con proporciones mayores de inóculo recomendadas en otros sistemas de biodigestión, donde se emplean volúmenes cercanos al 10% de la carga total para favorecer una rápida estabilización del proceso.

La equivalencia entre masa y volumen del sustrato (30 kg $\approx$ 30 L) se asumió considerando la densidad aproximada de la excreta bovina fresca, cercana a 1 kg/L, comúnmente utilizada en estudios experimentales a pequeña escala.

La composición de los tratamientos y proporciones de la mezcla orgánica se presentan en la Tabla 1.

Table 1. Characterization of treatments and composition of the organic mixture.

Tabla 1. Caracterización de tratamientos y composición de la mezcla orgánica.

Tratamiento	Bovine manure (kg)	Water (L)	EM (mL)	Total volume (L)
Control (without EM)	30	30	0	60
With EM	30	29.7	300	60

Note: EM = effective microorganisms. The mixture was prepared in an approximate 1:1 ratio (manure:water), maintaining a total volume of 60 L per biodigester.

1

Cálculo de la producción de biogás

El volumen total de biogás se obtuvo a partir de la suma de los volúmenes diarios registrados en cada biodigestor durante el periodo de evaluación. Posteriormente, se calculó el promedio por tratamiento para comparar el comportamiento general de cada condición experimental.

La producción específica de biogás se determinó mediante la relación entre el volumen total producido y la masa de sustrato utilizada:

$$PE = V / M$$

Donde:

- PE = producción específica (mL/kg)
- V = volumen total (mL)
- M = masa de sustrato (kg)

donde PE es la producción específica de biogás (mL/kg), V el volumen total producido (mL) y M la masa de excreta utilizada (30 kg).

Asimismo, la eficiencia relativa del tratamiento con microorganismos se calculó respecto al tratamiento control mediante la siguiente expresión:

$$E (\%) = (T2 / T1) \times 100$$

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el objetivo de comparar la producción de biogás entre los tratamientos evaluados. Previamente, se evaluaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente, aplicadas a la variable volumen de biogás.

Dado que los datos no cumplieron con estos supuestos, se empleó la prueba t de Welch para la comparación de medias entre tratamientos. Asimismo, se estimó el tamaño del efecto mediante el estadístico de Cohen's d.

Preparación del sustrato y montaje del sistema

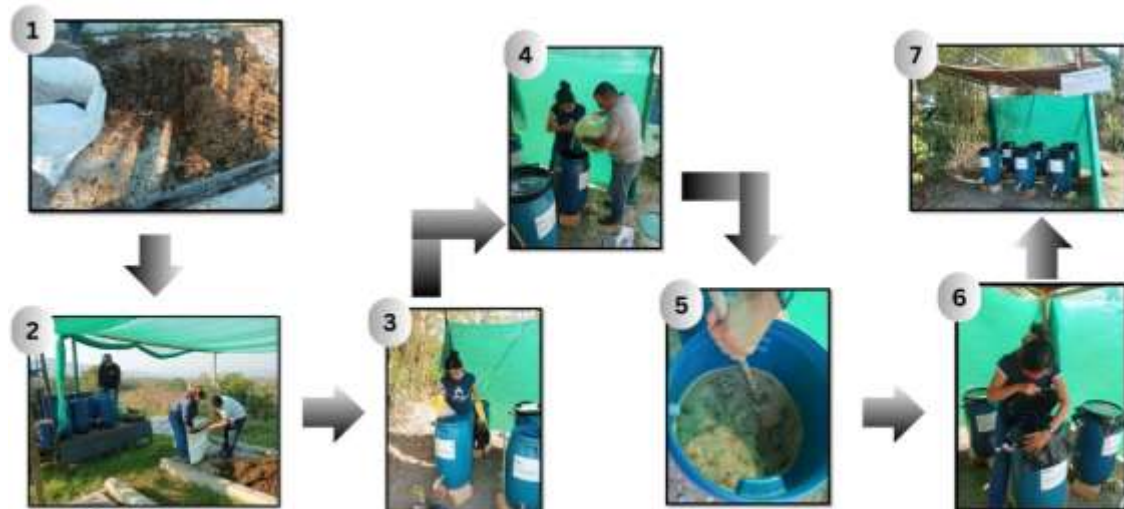
Se pesaron 30 kg de excreta bovina fresca, los cuales se mezclaron con 30 L de agua no clorada hasta alcanzar un volumen total de 60 L, manteniendo una proporción aproximada de 1:1 (excreta:agua). La mezcla fue homogenizada manualmente hasta obtener un sustrato uniforme.

En el tratamiento T2, se adicionaron microorganismos eficientes (EM) en la dosis establecida, los cuales fueron incorporados al sustrato mediante agitación manual durante 5 minutos para asegurar su adecuada distribución. Este procedimiento se realizó siguiendo enfoques metodológicos empleados en estudios de digestión anaerobia a escala experimental (Padmavathi et al., 2016).

Para el montaje del sistema, cada biodigestor fue conectado a un conducto de PVC acoplado a un sistema de medición por desplazamiento de agua, utilizando una botella invertida previamente acondicionada, lo que permitió cuantificar diariamente el volumen de biogás producido.

Los biodigestores fueron sellados herméticamente mediante el uso de cinta de teflón y juntas de presión, con el fin de evitar fugas y mantener condiciones anaerobias. Asimismo, se instaló un

manómetro en cada unidad para el monitoreo de la presión interna durante el periodo experimental.



The figure shows the stages of substrate preparation, biodigester loading, and system monitoring during the experimental period.

La figura muestra las etapas de preparación del sustrato, carga del biodigester y monitoreo del sistema durante el periodo experimental.

Figure 2. Flowchart of the procedure for preparing, loading and monitoring the biodigester.

Figura 2 Diagrama de flujo del procedimiento de preparación, carga y monitoreo del biodigester.

Monitoreo y medición de variables

El monitoreo experimental se realizó durante 41 días consecutivos. Este periodo fue establecido considerando el tiempo de retención hidráulica característico de los procesos de digestión anaerobia en condiciones mesofílicas. En este sentido, Mata et al. (2020) señalan que estos sistemas requieren periodos comprendidos entre 30 y 60 días para garantizar el desarrollo adecuado de las fases del proceso y la estabilidad microbiana. De manera complementaria, Rajendran et al. (2022) indican que estos intervalos permiten obtener resultados representativos en biodigestores a pequeña escala.

Durante el periodo experimental, las variables fueron determinadas mediante medición directa y análisis de laboratorio, según su naturaleza. El volumen de biogás, la temperatura (interna y ambiente) y la presión interna fueron medidos directamente en campo con frecuencia diaria, utilizando los instrumentos correspondientes. El pH fue medido semanalmente mediante un pH-metro portátil. Por su parte, la relación C/N fue determinada mediante análisis de laboratorio, a partir de la cuantificación del carbono total y nitrógeno total del sustrato al inicio y al final del experimento.

Las variables monitoreadas, sus unidades de medida, frecuencia y métodos empleados se detallan en la Tabla 2.

Para asegurar la reproducibilidad del estudio, se registraron sistemáticamente las condiciones operativas de cada biodigester mediante fichas técnicas durante todo el periodo experimental. Asimismo, se realizaron análisis fisicoquímicos del sustrato, incluyendo humedad, sólidos volátiles, carbono total y nitrógeno total, los cuales fueron determinados al final del proceso de biodigestión, con el fin de evaluar los cambios generados por la degradación de la materia orgánica. Este enfoque es consistente con lo señalado por Mata et al. (2020) y Rajendran et al. (2022), quienes indican que la caracterización fisicoquímica final del digestato es fundamental para comprender la eficiencia del proceso anaerobio y la transformación de los nutrientes durante la producción de biogás.

Table 2 Monitored variables, units of measurement, frequency and method of analysis.

Tabla 1 Variables monitoreadas, unidades de medida, frecuencia y método de análisis.

Variable	Unit	Frequency	Method / Instrument	Purpose
Biogas volume	mL/day	Daily	Water displacement method (inverted bottle)	Evaluate daily production

Internal temperature	°C	Daily	Contact thermometer	Control mesophilic process
Ambient temperature	°C	Daily	Environmental thermometer	Assess influence on biogas production
pH	–	Weekly	Portable pH meter	Monitor digestion phases
Internal pressure	kPa	Daily	Manometer	Verify system stability
C/N ratio	–	Final	Laboratory analysis	Characterize substrate

Resultados

Variables operativas del proceso

Temperatura interna del biodigestor

La temperatura interna del biodigestor sin microorganismos varió entre 26 y 32 °C, mostrando mayores fluctuaciones. En contraste, el tratamiento con EM presentó valores más estables (27–30 °C), con picos aislados de hasta 32 °C.

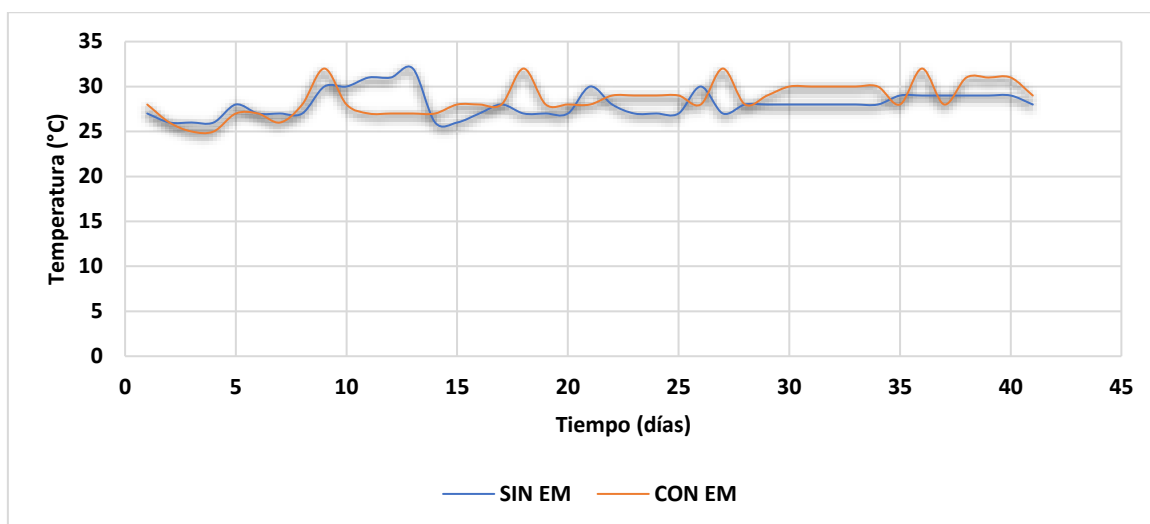


Figura 3 Internal temperature variation during anaerobic digestion in treatments with and without effective microorganisms (EM).

Figura 3 Variación de la temperatura interna durante la digestión anaerobia en tratamientos con y sin microorganismos eficientes (EM).

Temperatura ambiente

La temperatura ambiente osciló entre 22 y 36 °C, siendo similar para ambos tratamientos, lo que indica que las variaciones internas no estuvieron influenciadas por condiciones externas.

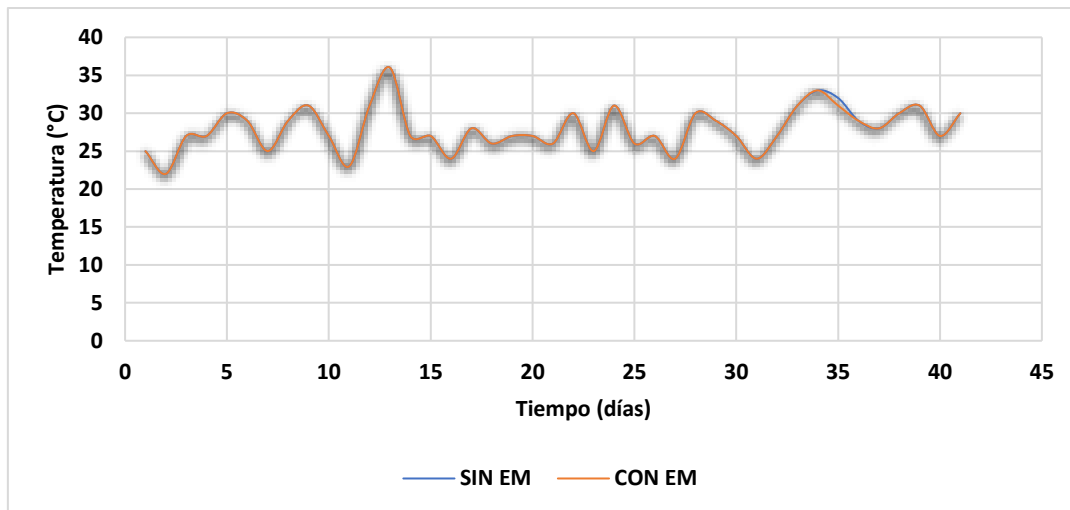


Figura 4 External temperature variation during the experimental period in treatments with and without effective microorganisms (EM).

Figura 4 Variación de la temperatura externa durante el periodo experimental en tratamientos con y sin microorganismos eficientes (EM).

pH del sustrato

El pH del sustrato se mantuvo cercano a la neutralidad en ambos tratamientos a lo largo del periodo experimental. El tratamiento control presentó valores entre 7.2 y 7.7, mientras que el tratamiento con microorganismos eficientes (EM) mostró un rango de 7.0 a 7.5.

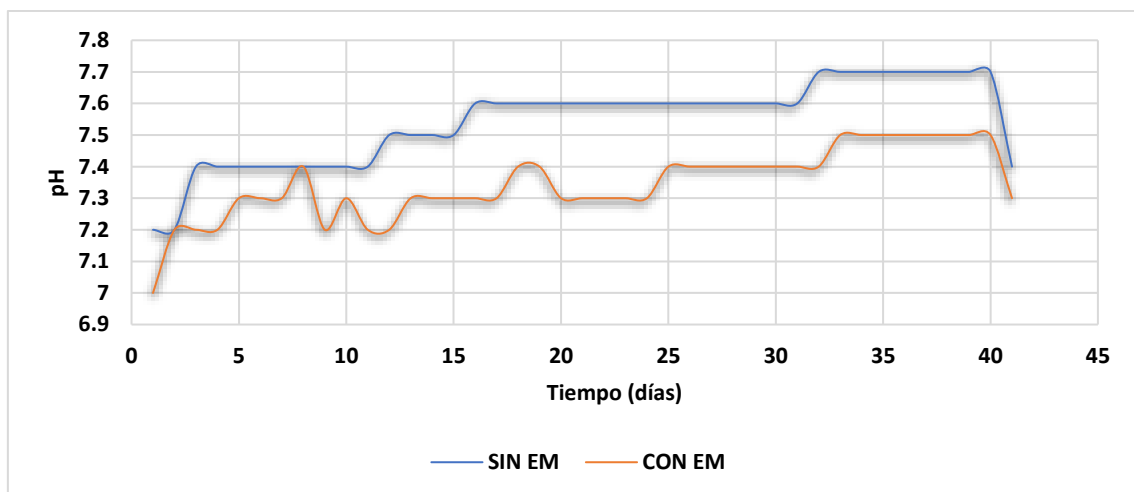


Figura 5 pH variation of the substrate during anaerobic digestion in treatments with and without effective microorganisms (EM).

Figura 5 Variación del pH del sustrato durante la digestión anaerobia en tratamientos con y sin microorganismos eficientes (EM).

Producción total de biogás

El tratamiento sin inoculación (T1) presentó una mayor producción total de biogás (915.17 mL) en comparación con el tratamiento con microorganismos eficientes (T2), que alcanzó 641.77 mL durante los 41 días de evaluación.

La Figura 7 muestra el comportamiento conjunto de la temperatura interna, el pH y el volumen de biogás a lo largo del periodo experimental en ambos tratamientos. En términos generales, se observa que el incremento de la temperatura interna coincide con mayores valores de producción de biogás, mientras que el pH se mantiene relativamente estable durante el proceso.

Asimismo, la Figura 8 presenta la comparación del volumen de biogás entre los tratamientos, evidenciando una mayor producción en el tratamiento control respecto al tratamiento con microorganismos.

Los resultados estadísticos se complementan con el análisis gráfico presentado en las Figura 7 y 8.

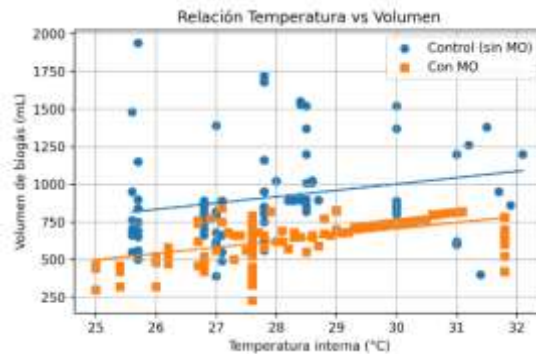


Figure 6 Relationship between internal temperature, pH, and biogas volume during the experimental period.

Figura 6 Relación entre la temperatura interna, el pH y el volumen de biogás durante el periodo experimental.

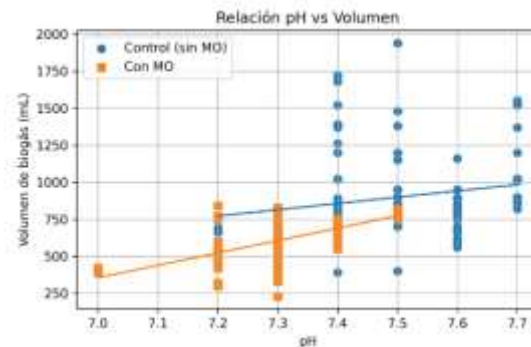


Figure 7 Biogas volume in the control and microorganism treatments.

Figura 7 Volumen de biogás en los tratamientos control y con microorganismos.

Comparación estadística de la producción específica de biogás

Los datos no cumplieron los supuestos de normalidad ni homogeneidad de varianzas, por lo que se aplicó la prueba t de Welch para la comparación entre tratamientos.

Se comparó la producción específica de biogás (mL/kg) entre los tratamientos sin microorganismos y con microorganismos. El tratamiento sin microorganismos presentó una media de 30.54 ± 9.18 , mientras que el tratamiento con microorganismos registró una media de 21.39 ± 4.61 .

La comparación de medias evidenció diferencias altamente significativas entre tratamientos ($t = 9.91$; $gl = 181.43$; $p < 0.001$). La diferencia de medias fue de 9.15 mL/kg, indicando una mayor producción en el tratamiento sin microorganismos.

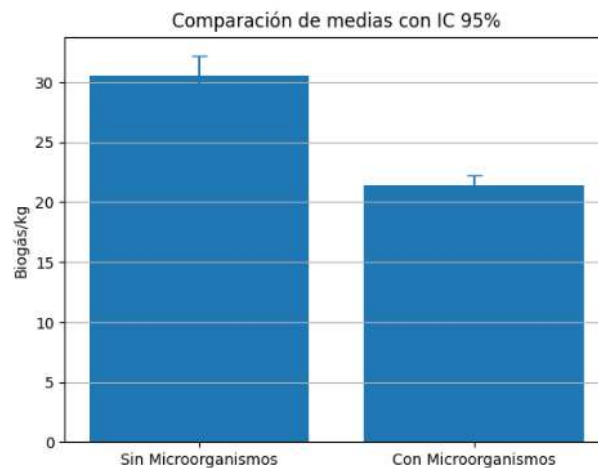


Figure 8 Comparison of mean biogas production (ml/kg) between treatments without microorganisms and with microorganisms. The bars represent the mean and the vertical lines the 95% confidence interval.

Figura 8 Comparación de medias de producción de biogás (ml/kg) entre los tratamientos sin microorganismos y con microorganismos. Las barras representan la media y las líneas verticales el intervalo de confianza al 95%.

Eficiencia del sistema

El tratamiento con microorganismos presentó una eficiencia relativa del 70% en comparación con el tratamiento control, evidenciando una reducción aproximada del 30% en la producción de biogás. Estos resultados indican que, bajo las condiciones evaluadas, la incorporación de microorganismos no incrementó la eficiencia del sistema.



Figure 9 Efficiency vs time (cumulative curve)

Figura 9 Eficiencia vs tiempo (curva acumulada)



Figure 10 Productivity (ml/day)

Figura 10 Productividad (ml/día)

El análisis de la producción acumulada de biogás mostró que el tratamiento control alcanzó mayores valores a lo largo del tiempo en comparación con el tratamiento con microorganismos. Asimismo, la productividad diaria evidenció que el tratamiento control presentó una mayor consistencia en la generación de biogás, mientras que el tratamiento experimental mostró una mayor variabilidad. Estos resultados indican una mayor eficiencia del tratamiento control en términos de producción total y estabilidad operativa.

Modelamiento cinético de la producción de biogás

El modelo de Gompertz presentó un mejor ajuste en ambos tratamientos en comparación con el modelo de primer orden, mostrando mayores valores de R^2 y menores valores de error (RMSE).

Table 5 Kinetic parameters of biogas production
Tabla 5 Parámetros cinéticos de producción de biogás

Treatment	Model	P (mL)	Rm (mL/day)	λ (days)	k (day ⁻¹)	R ²	RMSE (mL)
Control (without EM)	Gompertz	158547.39	3058.68	2.17	—	0.993	2685.96
Control (without EM)	First-order model	225378.00	—	—	0.0152	0.985	4018.74
With EM	Gompertz	132042.04	2230.32	4.69	—	0.997	1191.80
With EM	First-order model	157884.00	—	—	0.0143	0.965	4295.10

Note: P = cumulative biogas production potential (mL); Rm = maximum biogas production rate (mL/day); λ = lag phase or adaptation time (days); k = degradation rate constant (day⁻¹); R² = coefficient of determination; RMSE = root mean square error (mL); (—) not applicable.

Los resultados evidencian que el modelo de Gompertz modificado describe con mayor precisión la cinética de producción de biogás en ambos tratamientos. En el tratamiento control se obtuvo un R² de 0.993, mientras que en el tratamiento con microorganismos alcanzó un R² de 0.997, indicando un ajuste altamente satisfactorio a los datos experimentales.

En contraste, el modelo de primer orden presentó menores coeficientes de determinación y mayores valores de RMSE, lo que refleja un menor desempeño en la representación del proceso. Estos resultados confirman que el modelo de Gompertz es más adecuado para describir la dinámica de producción de biogás bajo las condiciones evaluadas.

Análisis de parámetros cinéticos

El tratamiento control presentó un mayor potencial de producción de biogás (P = 158547.39 ml) en comparación con el tratamiento con microorganismos (P = 132042.04 ml). Asimismo, la tasa máxima de producción (Rm) fue superior en el tratamiento control (3058.68 ml/día) respecto al tratamiento con microorganismos (2230.32 ml/día).

En relación con la fase de adaptación (λ), el tratamiento control mostró un menor tiempo (2.17 días) frente al tratamiento con microorganismos (4.69 días), indicando un inicio más rápido del proceso de digestión anaerobia.

Resultados fisicoquímicos finales del sustrato (Análisis de laboratorio)

Al finalizar el proceso de biodigestión anaerobia, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del digestato en ambos tratamientos (Tablas 6 y 7), con el fin de determinar los cambios generados durante el proceso y su potencial de aprovechamiento.

Los resultados muestran un pH final entre 7.96 y 8.09, indicando condiciones estables del sistema. La conductividad eléctrica (2.89–2.99 mS/cm) evidenció una concentración moderada de sales producto de la mineralización de la materia orgánica.

El contenido de materia orgánica (4.02–4.73%) y nitrógeno total (0.30–0.36%) refleja la degradación del sustrato y la liberación de nutrientes. Asimismo, los valores de fósforo (P₂O₅) y potasio (K₂O) confirman la presencia de macronutrientes en el digestato.

En cuanto a los micronutrientes, se registraron concentraciones adecuadas de Fe, Mn y Zn, destacando el hierro como el elemento predominante (677–770 mg/kg).

La relación C/N final, estimada a partir del contenido de materia orgánica mediante factores de conversión indirectos, presentó valores entre 6.4 y 9.1, lo que evidencia la transformación del carbono orgánico y la estabilización del sustrato durante el proceso de digestión anaerobia.

Table 6 Physicochemical properties of cow manure digestate
Tabla 62 Resultados fisicoquímicos de las excretas de vaca

Treatment	Laboratory code	pH	EC (mS/cm)	OM (%)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	S (%)	Na (%)
Control (without EM)	3837 – Batch 1	7.96	2.99	4.73	0.30	0.26	0.80	0.54	0.24	0.02	0.02
With EM	3838 – Batch 2	8.09	2.89	4.02	0.36	0.23	0.64	0.23	0.20	0.03	0.01

Note: EC = electrical conductivity; OM = organic matter. Data obtained from Instituto de Cultivos Tropicales – Agricultural Laboratory, Test Report No. 498-2025 (2025).

Table 7. Micronutrient content and C/N ratio of cow manure digestate

Tabla 7. Contenido de micronutrientes y relación C/N del digestato de estiércol de vaca.

Treatment	Laboratory code	B (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	C/N ratio
Control (without EM)	3837 – Batch 1	1.9	2.9	677.5	46.1	14.9	9.1
With EM	3838 – Batch 2	1.4	3.2	770.9	52.2	16.6	6.4

Note: Data obtained from Instituto de Cultivos Tropicales – Agricultural Laboratory, Test Report No. 498-2025 (2025).

Discusión

Los resultados del presente estudio evidencian que la inoculación con microorganismos eficientes (EM) no incrementó la producción total ni específica de biogás en excretas bovinas, siendo el tratamiento control el que alcanzó mayores rendimientos. Este hallazgo contrasta con lo reportado por estudios que atribuyen a los EM un efecto positivo en la actividad microbiana y en la optimización de la digestión anaerobia (Espitia & Ruiz, 2022; Kumari & Chandel, 2023). Sin embargo, coincide con investigaciones recientes que señalan que la efectividad de estos inoculantes es altamente dependiente del tipo de sustrato y de las condiciones operativas del sistema (Chicoma & Quezada, 2022), lo que sugiere que su aplicación no es universalmente beneficiosa.

Una explicación relevante de estos resultados radica en la naturaleza del sustrato utilizado. Las excretas bovinas frescas contienen una microbiota nativa diversa y metabólicamente activa, previamente adaptada a condiciones anaerobias, lo que favorece el desarrollo eficiente de las etapas de hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis sin necesidad de inoculación externa (Alcalde & Cubas, 2020; Mora & León, 2020). En este contexto, la incorporación de EM podría haber generado competencia microbiana o interferencias en la estructura del consorcio microbiano existente, afectando negativamente la eficiencia del proceso, tal como ha sido documentado en sistemas donde se introduce un inóculo no adaptado (Khalid et al., 2011).

En relación con las condiciones operativas, la digestión anaerobia se desarrolló bajo un régimen mesofílico estable (26–32 °C), considerado óptimo para la actividad metanogénica. No obstante, a pesar de que ambos tratamientos presentaron condiciones térmicas similares, la menor producción de biogás en el tratamiento con EM indica que la temperatura no fue un factor limitante ni determinante en la diferenciación del rendimiento. Esto refuerza la hipótesis de que los factores biológicos, más que los fisicoquímicos, jugaron un papel predominante en la respuesta del sistema. Por otro lado, el comportamiento del pH evidenció una estabilidad cercana a la neutralidad durante todo el periodo experimental, sin presentar fases de acidificación pronunciadas. Este patrón puede atribuirse a la elevada capacidad tampón del estiércol bovino, asociada a la presencia de bicarbonatos y compuestos nitrogenados, que contribuyen a mantener condiciones favorables para la metanogénesis. En este sentido, Chen et al. (2023) destacan que la digestión anaerobia de estiércol puede desarrollarse eficientemente en rangos neutros o ligeramente alcalinos, mientras que Piao et al. (2025) resaltan la importancia del equilibrio microbiano en la regulación del pH. Sin embargo, aunque estas condiciones favorecieron la estabilidad del proceso, no se tradujeron en un incremento del rendimiento en el tratamiento con EM, lo que coincide con lo reportado por Mata et al. (2020), quienes indican que la estabilidad fisicoquímica no garantiza mejoras en sistemas que ya operan en condiciones óptimas.

Asimismo, las condiciones iniciales del sustrato, incluyendo una relación C/N adecuada, temperatura mesofílica y pH estable, favorecieron el desarrollo microbiano sin necesidad de bioaumentación. Esto explica el mejor desempeño del tratamiento control y coincide con lo señalado por Rajendran et al. (2022), quienes indican que en sistemas con alta carga microbiana inicial, la adición de inóculos externos puede resultar redundante o incluso contraproducente.

Otro factor relevante es la dosis de microorganismos aplicada. La proporción de EM utilizada en este estudio fue relativamente baja en comparación con otros sistemas de biodigestión que emplean mayores porcentajes de inóculo para acelerar la estabilización del proceso. En este sentido, la baja dosificación podría no haber sido suficiente para generar un impacto significativo en la dinámica microbiana del sistema, limitando su efecto potencial sobre la producción de biogás.

El análisis cinético respalda estos resultados, evidenciando que el tratamiento control presentó una menor fase de adaptación (λ) y una mayor tasa máxima de producción (R_m), lo que indica un inicio más rápido y eficiente del proceso de digestión anaerobia. En contraste, el tratamiento con EM mostró una fase lag más prolongada, lo que sugiere una menor adaptación del consorcio microbiano añadido. Según Rajendran et al. (2022), este comportamiento suele estar asociado a incompatibilidades entre el inóculo y el sustrato o a procesos de reestructuración microbiana que retrasan la metanogénesis.

En términos de eficiencia, el tratamiento con EM alcanzó aproximadamente el 70% del rendimiento del control, evidenciando una reducción significativa en la producción de biogás. Este resultado es consistente con estudios que indican que los microorganismos eficientes presentan mejores resultados en procesos de codigestión o en sustratos con baja actividad microbiana inicial (Huamán Borja & Huayllani Velásquez, 2020), lo que no corresponde a las condiciones evaluadas en este estudio.

En conjunto, los resultados sugieren que la ausencia de un efecto positivo del uso de EM se debe a la interacción de múltiples factores, entre los que destacan la elevada actividad de la microbiota nativa, la posible competencia microbiana inducida por el inóculo externo y las condiciones fisicoquímicas favorables del sistema. Estos hallazgos aportan evidencia relevante que cuestiona la aplicabilidad generalizada de los microorganismos eficientes en sistemas de digestión anaerobia con sustratos altamente activos.

Finalmente, este estudio contribuye a la comprensión del papel de la bioaumentación en la producción de biogás, evidenciando que la inoculación con EM no constituye una estrategia eficiente en excretas bovinas bajo condiciones tropicales. En este sentido, los resultados no solo contradicen parcialmente el enfoque generalizado sobre el uso de estos inoculantes, sino que también refuerzan la importancia de considerar las características del sustrato y del sistema antes de implementar estrategias de optimización, destacando el rol determinante de la microbiota nativa en la eficiencia del proceso anaerobio.

Conclusiones

Los resultados del presente estudio demuestran que la inoculación con microorganismos eficientes (EM) no mejora la producción ni la eficiencia del biogás en excretas bovinas bajo condiciones mesofílicas, registrándose un mayor rendimiento en el tratamiento sin inoculación.

El tratamiento con EM presentó una menor tasa de producción y una fase de adaptación más prolongada, lo que sugiere una limitada adaptación del consorcio microbiano añadido y posibles interacciones competitivas con la microbiota nativa.

Asimismo, aunque la adición de EM contribuyó a una mayor estabilidad del pH y la temperatura, esta condición no se tradujo en un incremento del rendimiento, evidenciando que la estabilidad fisicoquímica no es determinante cuando el sustrato presenta condiciones óptimas.

En este contexto, los resultados respaldan la hipótesis nula y evidencian que el uso de microorganismos eficientes no es necesario en biodigestores artesanales que emplean excretas bovinas frescas, permitiendo optimizar costos y simplificar la operación del sistema.

Recomendaciones

Se recomienda no emplear microorganismos eficientes (EM) en biodigestores que utilicen excretas bovinas frescas, especialmente en condiciones tropicales, donde la temperatura ambiente favorece naturalmente la actividad de la microbiota nativa, permitiendo una adecuada producción de biogás sin necesidad de inoculación adicional.

Asimismo, se sugiere mantener condiciones operativas dentro del rango mesofílico y un pH cercano a la neutralidad, ya que en climas tropicales estos parámetros tienden a estabilizarse de forma natural, contribuyendo a la eficiencia del proceso de digestión anaerobia.

Para futuras investigaciones, se recomienda evaluar el uso de EM en procesos de codigestión o en sustratos con baja carga microbiana, así como analizar su comportamiento en diferentes condiciones climáticas, especialmente en zonas frías, donde la actividad microbiana es limitada.

Finalmente, se recomienda promover el uso de biodigestores artesanales en zonas tropicales como una alternativa sostenible para el aprovechamiento de excretas bovinas, debido a sus condiciones ambientales favorables, lo que permite optimizar la producción de biogás y reducir costos operativos.

Uso de inteligencia artificial

Se utilizaron herramientas de inteligencia artificial únicamente para mejorar la redacción del manuscrito. Los autores son responsables del contenido final.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Financiamiento

La investigación no recibió financiamiento externo.

Consideraciones éticas

Este estudio no involucró sujetos humanos ni animales que requirieran aprobación ética.

Referencias

- Alcalde Delgado, R. E., & Cubas Avellaneda, A. M. (2020). Revisión de la eficiencia de biodigestores para la producción de biogás con excremento vacuno [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3283>
- Ante, I. R. C., & Naranjo, W. P. P. (2024). Estimación del potencial eléctrico de residuos orgánicos mediante el uso de biodigestores experimentales. *Revista Científica Multidisciplinaria G-NERANDO*. <https://revista.gnerando.org/revista/index.php/RCMG/article/view/186>
- Carrera, P. J. V., Osorio, W. A. H., Cunuhay, K. A. E., & López, E. V. (2023). Eficiencia energética del biogás CH₄ producido con desechos de cosechas cacaoteras. *Universidad y Sociedad*, 15(5), 304–314. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/4079>
- Chicoma Frágides, K. M. J., & Quezada Romero, O. J. (2022). Efecto del tipo de residuo sólido orgánico en la eficiencia de producción de biogás [Tesis de pregrado]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/102395>
- Espitia Rincón, G., & Ruiz Padilla, N. (2022). Propuesta de digestión anaerobia en dos fases para la obtención de biogás mediante residuos cítricos [Tesis de pregrado]. <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/9043>
- Giubi, J., Bernal, M., & Cañete, F. (2019). *Anales de la Facultad de Ciencias Médicas (Asunción)*, 52(3), 53–58. <https://doi.org/10.18004/anales/2019.052.03.53-058>
- González, J., & Sadier, P. (2019). Guía para el análisis documental. CLACSO. https://www.academia.edu/download/33616343/analisis_documental.pdf
- González, K. (2023). Simulación de residuos orgánicos derivados del café para la producción de biogás [Tesis de pregrado]. <https://repository.universidadean.edu.co/handle/10882/12911>
- Greene, P. (2023). 101 for digester sizing and RNG performance modeling. *BioCycle*. <https://www.biocycle.net/digester-sizing-rng-performance/>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2020). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.

- Huamán Borja, M. M., & Huayllani Velásquez, Y. Y. (2020). Revisión sistemática de la obtención de biogás [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/75339>
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737–1744. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- Kumari, M., & Chandel, M. K. (2023). Anaerobic co-digestion of sewage sludge. *Journal of Environmental Management*, 345, 118821. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118821>
- Mahmoodi-Eshkaftaki, M., Mockaitis, G., & Rafiee, M. R. (2024). Dynamic optimization of volatile fatty acids. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(6), 8003–8014. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03336-5>
- Mamani Condori, R., & Pacco Huarachi, C. O. (2021). Diseño de planta de biodigestión [Tesis de pregrado]. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3219569>
- Martínez, S. G. (2019). Producción de biogás a partir de FORSU. *Gaceta Instituto de Ingeniería*, 15–17.
- Mata, T., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2020). Biogas production from organic waste. *Bioresource Technology*, 308, 123269. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123269>
- Mendoza, S. H., & Ávila, D. D. (2020). Técnicas de recolección de datos. *Boletín Científico ICEA*, 9(17), 51–53. <https://doi.org/10.29057/icea.v9i17.6019>
- Mora Aguirre, J. C., & León López, J. E. (2020). Evaluación de producción de biogás [Tesis de pregrado]. <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7780>
- Owamah, H. I., Ikpeseni, S. C., Alfa, M. I., Oyeibisi, S. O., Gopikumar, S., Samuel, O. D., & Ilabor, S. C. (2021). Influence of inoculum/substrate ratio on biogas yield and kinetics from the anaerobic co-digestion of food waste and maize husk. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100558.
- Rajendran, K., Aslanzadeh, S., Taherzadeh, M. J., & Horváth, I. S. (2022). Effect of substrate to inoculum ratio. *Bioresource Technology*, 357, 124335. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.124335>
- Shah, S. S. A., & Choo, K.-H. (2020). Isolation of quorum quenching bacteria. *Bioresource Technology*, 308, 123269. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123269>
- Trujillo Astudillo, J. M., & Quito Heredia, J. P. (2024). Obtención de biogás artesanal [Tesis de pregrado]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27513>
- Padmavathi, S., Latha, K., Nilavunesan, D., Baskaralingam, P., & Sivanesan, S. (2016). Biogas production from food waste codigested with sewage treatment plant sludge using biochemical methane potential method. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 15(3), 300–312.
- SENASA. (2021). Avance en la identificación de bovinos y porcinos para el sistema de rastreabilidad en San Martín.
- Piao, C., Wang, Z., Zhao, K., Du, M., & Wang, K. (2025). Bioaugmentation Versus pH Adjustment in High-Load Food Waste Anaerobic Digestion: Divergent Microbial Responses and Methanogenesis Regulation. *Fermentation*, 11(12), 702.
- Chen, B., Azman, S., Dewil, R., & Appels, L. (2023). Alkaline anaerobic digestion of livestock manure: Unveiling mechanisms, applications, and perspective. *Chemical Engineering Journal*, 477, 146852.