

Producción de biogás a partir de estiércol porcino y co-sustratos orgánicos: evaluación de la eficiencia de tres tratamientos en Retes, Perú

Biogas production from pig manure and organic co-substrates: evaluation of the efficiency of three treatments in Retes, Peru

Katherin Jhojanny Huarac-Cadillo¹, Mahely Nicoll More-Peña²,
Hellen Yahaira Huertas-Pomasoncco³, María del Rosario
Grados-Olivera⁴, Keneth Denner Chagua-Namuche⁵

Fecha de recepción: 14 de octubre, 2025

Fecha de aprobación: 29 de enero, 2026

Huarac-Cadillo, K.J; More-Peña, M.N; Huertas-Pomasoncco, H.Y; Grados-Olivera, M.R; Chagua-Namuche, K.D. Producción de biogás a partir de estiércol porcino y co-sustratos orgánicos: evaluación de la eficiencia de tres tratamientos en Retes, Perú. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 67-77.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8257>



1 Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.

 katherinhuarac@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-1085-2018>

2 Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.

 mmorep98@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0003-4765-1636>

3 Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.

 hhuertas@unjfsc.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-4204-7320>

4 Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.

 mgradoso@unjfsc.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-3004-0252>

5 Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

 keneth.chagua.n@uni.pe

 <https://orcid.org/0009-0000-5282-2979>

Palabras clave

Biogás; digestión anaeróbica; estiércol porcino; residuos orgánicos; aprovechamiento de residuos.

Resumen

La gestión inadecuada de los residuos agropecuarios en el centro poblado de Retes (Huaral), considerado un núcleo productivo clave de la región Lima, plantea importantes desafíos ambientales. Este estudio evaluó la eficiencia de la producción de biogás mediante la co-digestión anaeróbica de estiércol porcino con otros sustratos orgánicos locales para ofrecer una solución sostenible. Se implementó un diseño experimental con tres tratamientos en reactores tipo *batch* de 120 L durante un periodo de 42 días: T1) estiércol porcino y estiércol de cuy; T2) estiércol porcino y residuos orgánicos de origen vegetal; y T3) una mezcla ternaria de estiércol porcino, estiércol de cuy y residuos orgánicos de origen vegetal. Cada semana se monitoreó la producción de biogás, el pH, la temperatura y la presión. Los resultados demostraron que el tratamiento T3 mostró una mayor eficiencia, alcanzando un volumen acumulado de 49.6 L de biogás, superando en un 10.5% a T1 (44.9 L) y en un 31.6% a T2 (37.7 L). El éxito del T3 se atribuyó a su capacidad para mantener un pH estable y óptimo (7.2-7.5) durante las fases de máxima actividad biológica, favoreciendo la metanogénesis. Se concluye que la co-digestión de múltiples sustratos es la estrategia más efectiva, dado que la combinación de materiales optimiza las condiciones fisicoquímicas y asegura un proceso más estable y productivo en la generación de biogás.

Keywords

Biogas; anaerobic digestion; pig manure; organic waste; waste utilization.

Abstract

The inadequate management of agricultural waste in the town of Retes (Huaral), considered a key production center in the Lima region, poses significant environmental challenges. This study evaluated the efficiency of biogas production through the anaerobic co-digestion of pig manure with other local organic substrates to offer a sustainable solution. An experimental design with three treatments was implemented in 120 L batch reactors over a period of 42 days: T1) pig manure and guinea pig manure; T2) pig manure and organic waste; and T3) a ternary mixture of pig manure, guinea pig manure, and organic waste. Biogas production, pH, temperature, and pressure were monitored weekly. The results showed that treatment T3 showed higher efficiency, reaching a cumulative volume of 49.6 L of biogas, exceeding T1 (44.9 L) by 10.5% and T2 (37.7 L) by 31.6%. The success of T3 was attributed to its ability to maintain a stable and optimal pH (7.2-7.5) during the phases of maximum biological activity, favoring methanogenesis. It is concluded that the co-digestion of multiple substrates is the most effective strategy, given that the combination of materials optimizes physicochemical conditions and ensures a more stable and productive process in biogas generation.

Introducción

La producción porcina del continente americano ha experimentado un crecimiento sostenido, impulsado por una creciente demanda global [1]. Esta expansión, si bien es económicamente beneficiosa, genera desafíos ambientales significativos. Se estima que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector cárnico se incrementarán un 9 % para el 2050 [2].

La generación de grandes cantidades de residuos de estiércol animal (REA) es uno de los principales causantes del impacto ambiental, debido a sus altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes. Si no se tratan adecuadamente, estos residuos pueden convertirse en una amenaza importante para los ecosistemas [3][4]. La disposición inadecuada de residuos de estiércol animal (REA) puede contaminar las fuentes de agua con bacterias patógenas como *Escherichia coli*. Esta bacteria está relacionada con enfermedades gastrointestinales en humanos [5][6].

Desde una perspectiva química, la lixiviación de compuestos nitrogenados (estiércol porcino) eleva las concentraciones de nitratos en el agua potable, lo que puede provocar metahemoglobinemia, una condición que impide el transporte de oxígeno en el torrente sanguíneo [7][8]. Además, el estiércol porcino contiene hormonas esteroides como los estrógenos que, al ingresar a los cuerpos de agua, se han correlacionado con efectos adversos en la salud reproductiva masculina [9][10].

En este escenario, la digestión anaerobia se manifiesta como una tecnología fundamental para la valorización de residuos de origen porcino. Este proceso permite la reducción de agentes contaminantes de los residuos de estiércol porcino, a la vez, posibilita la generación de biogás para su aprovechamiento energético [6][11][12]. El biogás es un gas producto de la fermentación de biomasa en ausencia de oxígeno. Dicha mezcla está compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), además de otros gases como el hidrógeno (H_2) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S) [13][14]. La formación de biogás sigue una ruta biológica que requiere condiciones de ausencia de oxígeno (anaerobiosis), indispensables para la metanogénesis. Este proceso da lugar a una fuente de energía renovable que se encuentra distribuido en pantanos, sistemas digestivos de rumiantes y rellenos sanitarios [15][16].

El presente estudio aborda la problemática ambiental generada por la inadecuada gestión de residuos agropecuarios en el centro poblado de Retes (Huaral), un importante centro productivo de la región Lima. El objetivo principal fue determinar la eficiencia de la codigestión de estiércol porcino y otros sustratos orgánicos para la producción de biogás.

Materiales y métodos

Área de experimental

La investigación se realizó en una parcela experimental ubicada en el centro poblado de Retes, provincia de Huaral, departamento de Lima, tal como se muestra en la Figura 1. El área experimental se localizó a 5 metros de una granja familiar dedicada a la cría de porcinos y cuyes, actividad económica predominante en la región. El estudio experimental se llevó a cabo en condiciones ambientales favorables, caracterizadas por una temperatura que osciló entre 15 y 24 °C, precipitaciones escasas (1 mm/mes) y una elevada humedad relativa (94 %).

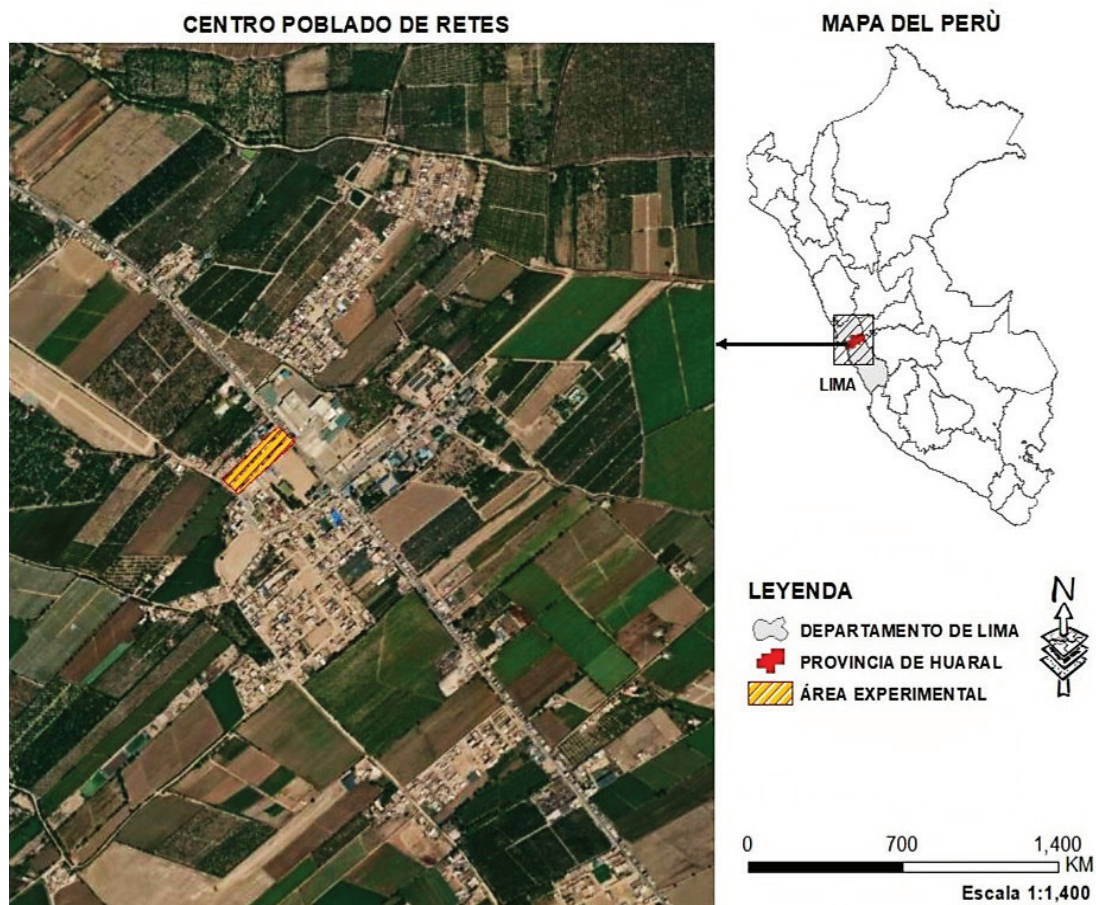


Figura 1. Área de estudio de la investigación ubicada en el centro poblado de Retes.

Análisis de composición química del estiércol

Se recolectaron *in situ* muestras representativas de 1 kg de excremento fresco de cada especie, aplicando el método de cuarteo para obtener una muestra representativa. Después del proceso de pesado, las muestras se almacenaron en bolsas herméticas rotuladas para asegurar su trazabilidad. Finalmente, fueron acondicionadas en un contenedor isotérmico con refrigerantes para mantener la cadena de frío durante su transporte, preservando así la integridad de las muestras biológicas para su análisis en el laboratorio ANOBA LAB SAC.

En el Cuadro 1 se presentan los resultados del análisis de la composición química, con el objetivo de definir las proporciones de mezcla que permitan alcanzar una relación C/N óptima de 30:1, indispensable para la producción efectiva de biogás [17]. Se encontró que la relación C/N del estiércol porcino era de 17.21, por lo que se requiere combinarlo con una mayor cantidad de estiércol de cuy, cuyo valor es elevado (36.19), para equilibrar la mezcla final en los biodigestores. Asimismo, el contenido de sólidos totales, 27.96% en el estiércol de cerdo y 48.82% en el de cuy, indica que el volumen de agua a añadir variará según la proporción de la mezcla.

Cuadro 1. Análisis de la composición química de la materia orgánica sólida.

Tipo de muestra	Parámetros					
	Físico- Químicos			Macronutrientes		Relación de interés
	Humedad (%)	Sólidos Volátiles (%ST)	Sólidos Totales (%)	Carbono Total (%ST)	Nitrógeno Total (%ST)	Carbono/Nitrógeno
Estiércol porcino	72.24	66.91	27.96	38.81	2.27	17.21
Estiércol de cuy	51.18	88.60	48.82	51.39	1.42	36.19

Nota. Informe de Ensayo (IEFO3509) y (IEFO3508)

Recolección de sustratos

Para la investigación se recolectaron tres tipos de materia orgánica. Primero, se juntaron 42.97 kg de estiércol porcino en baldes de 20 litros durante un periodo de cinco días. Segundo, se recolectaron 49.14 kg de estiércol de cuy en costales de rafia a lo largo de catorce días, el cual fue posteriormente triturado para asegurar su homogeneización con los otros sustratos [18]. Finalmente, se obtuvieron 8.75 kg de otros residuos orgánicos de origen vegetal en un lapso de tres días; estos últimos fueron picados antes de ser almacenados en un balde de 20 litros. Las proporciones de recolección se ajustaron de acuerdo al informe de ensayo de la composición química del estiércol.

Diseño experimental

La Figura 2 ilustra el diseño del área experimental, cuyas dimensiones fueron de 6 m x 6 m. Dicha área fue cercada perimetralmente con malla plástica, la cual fue fijada con soportes de madera en cada vértice. El estudio se desarrolló con un diseño experimental de tipo exploratorio (a escala piloto y sin réplicas), instalando un reactor tipo *batch* de 120 L de capacidad como unidad experimental para cada uno de los tres tratamientos. Los reactores operaron con un tiempo de retención hidráulica de 42 días. Se realizó un seguimiento del proceso mediante el monitoreo de parámetros fisicoquímicos a intervalos de siete días. La dilución del sustrato se efectuó en todos los casos con agua no clorada [17]. Finalmente, los tratamientos experimentales se definieron en función de la disponibilidad de biomasa residual:

- T1) sustrato binario de estiércol porcino y estiércol de cuy;
- T2) sustrato binario de estiércol porcino y residuos orgánicos de origen vegetal;
- T3) sustrato ternario compuesto por estiércol porcino, estiércol de cuy y residuos orgánicos de origen vegetal.

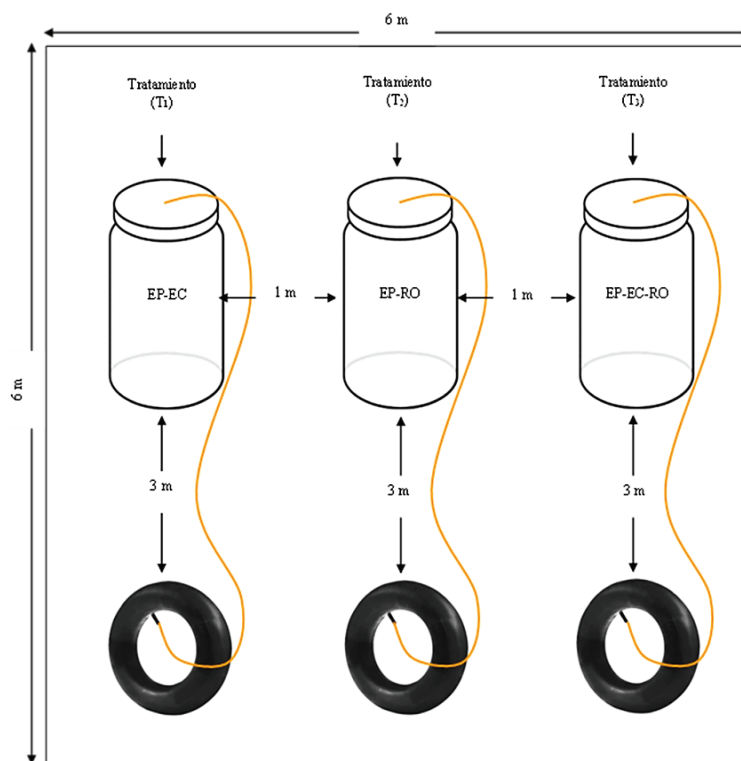


Figura 2. Croquis del área experimental que se instaló en el Centro Poblado de Retes.

La preparación del sustrato para cada unidad experimental se diseñó considerando una relación de 2:1 (v/p) entre agua y la masa de material orgánico total [17]. Se formularon tres tratamientos (T1, T2, T3) empleando un volumen constante de 70 L de agua y variando las proporciones de estiércol porcino (EP), estiércol de cuy (EC) y residuos orgánicos (RO). La composición detallada y la masa exacta de los componentes para cada tratamiento se especifican en el Cuadro 2. Posteriormente, los biodigestores fueron cargados con la mezcla líquida hasta alcanzar el 80% de su capacidad total, constituyendo el volumen de operación. El 20% restante fue designado como espacio de cabeza (cámara de gas) para permitir la acumulación del biogás generado durante el proceso de digestión anaeróbica.

Cuadro 2. Descripción de los tratamientos del experimento.

N°	Código	Tratamientos
T1	EP - EC	EP (6.65 kg) + EC (24.50 kg) + 70 L H ₂ O
T2	EP - RO	EP (28.00 kg) + RO (7.00 kg) + 70 L H ₂ O
T3	EP - EC - RO	EP (7.00 Kg) + EC (24.50 kg) + RO (1.75 kg) + 70 L H ₂ O

Nota. EP (estiércol porcino), EC (estiércol de cuy) y RO (Residuos orgánicos)

Resultados y discusión

Producción de biogás

Se muestra en el Cuadro 3 la producción de biogás durante las seis semanas de retención hidráulica, donde el tratamiento T3, compuesto por una codigestión de estiércol porcino (EP), estiércol de cuy (EC) y residuos orgánicos (RO), demostró ser el más eficiente. Este tratamiento alcanzó el pico de producción más alto del ensayo (10.7 L en la semana 5) y generó el mayor volumen acumulado de biogás (49.6 L). Por su parte, el tratamiento T1 (EP-EC) mostró un rendimiento robusto, con un pico de 9.8 L en la semana 4 y un total acumulado de 44.9 L. Finalmente, el tratamiento T2 (EP-RO) fue el menos productivo, registrando un máximo de 8.2 L en la semana 5 y el menor volumen acumulado (37.7 L).

Cuadro 3. Resultados de producción de biogás (L) por semana.

N° de tratamiento	Código de campo	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Total (L)
T1	EP - EC	0	8.5	9.3	9.8	9.6	7.7	44.9
T2	EP - RO	0	7.3	7.9	7.8	8.2	6.5	37.7
T3	EP - EC - RO	0	9.7	10.3	10.5	10.7	8.4	49.6

Nota. EP (estiércol porcino), EC (estiércol de cuy) y RO (Residuos orgánicos)

La Figura 3 evidencia que la codigestión de múltiples sustratos (T3) genera un efecto sinérgico que maximiza la producción de biogás. Esta estrategia mejora la estabilidad del proceso y aumenta el rendimiento de metano en comparación con la monodigestión [19][20][21]. La combinación de sustratos con perfiles nutricionales complementarios previene la inhibición por acidificación o acumulación de amoníaco y asegura un suministro de nutrientes más equilibrado para la comunidad microbiana [22]. La superioridad del tratamiento T3 puede atribuirse a la optimización de la relación Carbono/Nitrógeno (C/N), un parámetro crítico para la digestión anaeróbica y probablemente alcanzó un balance C/N cercano al rango óptimo de 20-30/1, favoreciendo una actividad metanogénica eficiente y sostenida [21][23][24][25].

El rendimiento del tratamiento T1, aunque alto, decayó tras la cuarta semana, lo que podría sugerir un agotamiento de la fuente de carbono fácilmente disponible al no incluir los residuos orgánicos de origen vegetal. Es particularmente notable el bajo rendimiento del tratamiento T2 en comparación con T1 y T3. Esto sugiere que la inclusión del estiércol de cuy es un factor determinante para potenciar la producción de biogás en las mezclas estudiadas. Investigaciones realizadas ya han validado el estiércol de cuy como un sustrato de alto valor para la generación de biogás [26][27][28]. Su aporte puede no solo estar en la mejora del balance C/N, sino también en la inoculación de una comunidad microbiana diversa y adaptada o en el suministro de micronutrientes esenciales. El rendimiento limitado de la mezcla de estiércol porcino y residuos orgánicos de origen vegetal (T2) es consistente con otros estudios que, si bien validan su viabilidad, a menudo requieren de optimización adicional para alcanzar altos rendimientos [29].

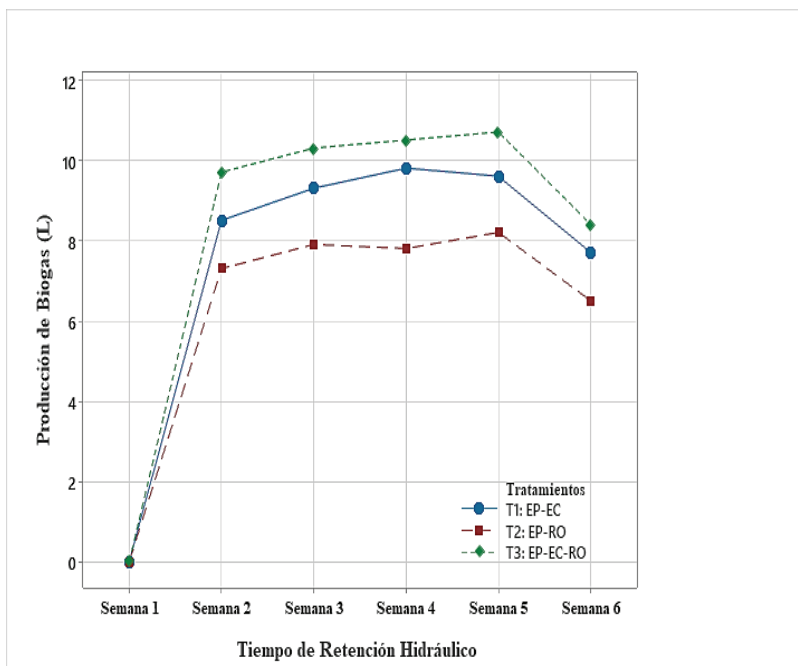


Figura 3. Evolución temporal de la producción de biogás (L) para los tres tratamientos evaluados.

Evaluación de los parámetros físico-químicos

Se puede apreciar en la Figura 4 que el pH fue un factor crítico en la digestión anaeróbica, ya que las arqueas metanogénicas son altamente sensibles a condiciones ácidas [30][31]. El rango óptimo para la metanogénesis se sitúa típicamente entre 6.5 y 7.5 [21][32][33]. En las tres configuraciones de los tratamientos, se observó un pH inicial ligeramente ácido (6.24 - 6.51), lo cual es característico de la fase de hidrólisis y acidogénesis, donde se producen ácidos grasos volátiles (AGV) [32][34][35].

El tratamiento T3 mostró el comportamiento más favorable, alcanzando y manteniendo un pH estable en el rango neutro-alkalino (7.21-7.51) durante las semanas de mayor producción (semana 5). Esta estabilidad sugiere una excelente capacidad de amortiguación (buffering), a menudo mejorada por la co-digestión, permitiendo que la fase metanogénica procediera sin inhibición por acidificación [19][36]. Es notable que en la semana 6, todos los tratamientos experimentaron una caída en la producción y el pH, lo que podría indicar el agotamiento del sustrato o una acumulación final de AGV [37].

Todos los biodigestores operaron dentro del rango mesofílico (20-45 °C), con temperaturas que fluctuaron entre 24.6 °C y 32.3 °C. Estas condiciones son adecuadas para las comunidades microbianas involucradas en la digestión anaeróbica, y mantener una temperatura estable dentro de este rango es fundamental para optimizar la producción de biogás [30][33]. Los picos de temperatura más altos registrados en T1 y T3 en la semana 5 coinciden con una alta tasa de producción, lo que refleja la naturaleza exotérmica de la actividad microbiana intensiva.

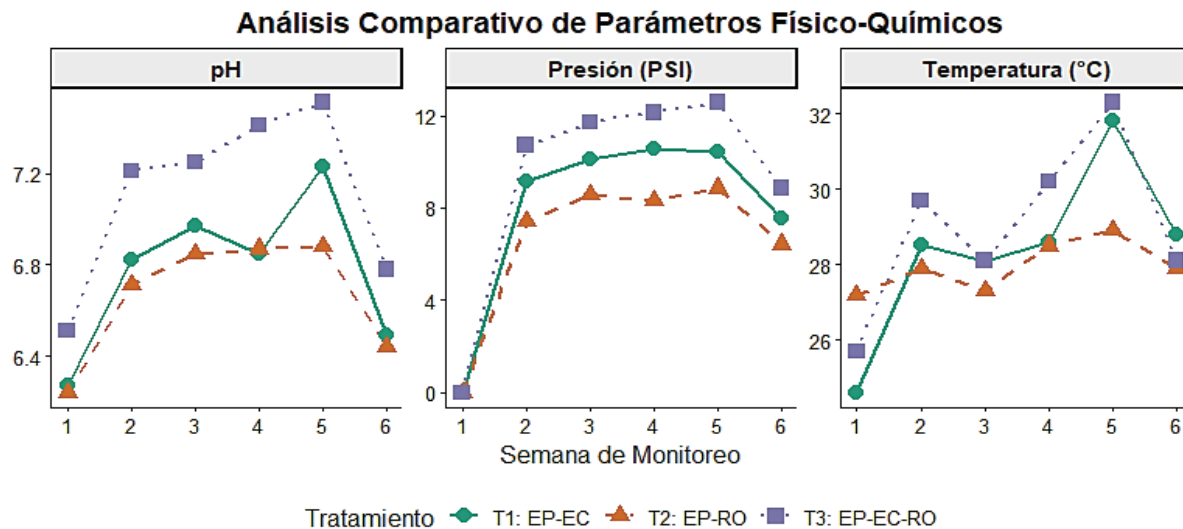


Figura 4. Análisis comparativo de la presión (PSI), pH y temperatura (°C) para los tres tratamientos (EP-EC, EP-RO y EP-EC-RO) durante 6 semanas de monitoreo.

La presión interna de los biodigestores es una consecuencia directa de la acumulación de gas. Como era de esperar, los resultados de presión (PSI) mostraron una fuerte correlación con los volúmenes de biogás medidos, lo que valida el monitoreo manométrico como un indicador fiable de la actividad biológica en tiempo real [38]. El tratamiento T3 mantuvo consistentemente las presiones más altas, alcanzando un máximo de 12.57 PSI, lo que corrobora su superioridad en la tasa de generación de biogás.

Es importante señalar, como limitación metodológica del presente estudio, que la evaluación se basó exclusivamente en la medición manométrica del volumen de biogás acumulado. Al no haberse cuantificado la composición cualitativa del gas (específicamente el porcentaje de metano, CH₄), la interpretación del rendimiento energético de los tratamientos tiene carácter preliminar.

Conclusiones y/o recomendaciones

La co-digestión de los sustratos EP, EC y RO (Tratamiento T3) demostró ser la estrategia más efectiva para la producción de biogás, generando un 10.5 % más que el tratamiento T1 y un 31.6 % más que el T2. El éxito del tratamiento T3 puede atribuirse principalmente a su capacidad para mantener un pH estable y óptimo (7.2-7.5) durante el pico de actividad biológica, lo que favoreció de manera crucial la etapa de metanogénesis. Si bien la temperatura se mantuvo en un rango mesofílico adecuado para todos los tratamientos, la estabilidad del pH fue el factor diferenciador clave para el rendimiento superior. Estos resultados subrayan la importancia de la selección y combinación de sustratos para optimizar los procesos de digestión anaeróbica, no solo para maximizar el volumen de gas, sino también para asegurar la estabilidad del sistema a lo largo del tiempo.

Dado que este estudio se limitó a la medición volumétrica, para futuras investigaciones se recomienda encarecidamente analizar la composición cualitativa del biogás mediante un medidor de metano (CH₄). Cuantificar este gas permitirá determinar el poder calorífico real y el valor energético de cada mezcla, además de complementar el análisis con la relación C/N post-tratamiento. Asimismo, optimizar el tiempo de mezcla o agitación en cada tratamiento para

prevenir la sedimentación y/o la formación de costras en el fondo del biodigestor, lo que podría incrementar la producción de biogás, reducir el tiempo de retención hidráulica y homogeneizar la distribución de temperatura y la mezcla de sustratos y productos.

Referencias

- [1] U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service, "Livestock and Poultry: World Markets and Trade," Apr. 2025. [Online]. Available: <https://www.fas.usda.gov/data/livestock-and-poultry-world-markets-and-trade-04102025>
- [2] OCDE y FAO, "OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2022-2031," Oct. 2022. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1787/820EF1BB-ES>
- [3] J. A. Foley *et al.*, "Solutions for a cultivated planet," *Nature*, vol. 478, no. 7369, pp. 337-342, 2011. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- [4] M. Wang *et al.*, "Microbial mechanism for improving biogas production performance from boiling acidified pig manure feedstock," *Bioresour. Technol.*, vol. 419, p. 132104, 2025. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2025.132104>
- [5] J. T. LeJeune and A. N. Wetzel, "Preharvest control of Escherichia coli O157 in cattle," *J. Anim. Sci.*, vol. 85, no. 13 Suppl., pp. E73-E80, 2007. <https://doi.org/10.2527/JAS.2006-612>
- [6] C. Xu *et al.*, "Mini-review: Antibiotic-resistant Escherichia coli from farm animal-associated sources," *Antibiotics*, vol. 11, no. 11, p. 1535, 2022. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11111535>
- [7] J. Miner *et al.*, *Managing Livestock Wastes to Preserve Environmental Quality*. Ames, IA, USA: Iowa State Univ. Press, 2000. Available: <https://archive.org/details/managinglivestoc0000mine>
- [8] M. H. Ward *et al.*, "Drinking water nitrate and human health: An updated review," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 7, p. 1557, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15071557>
- [9] R. M. Sharpe and N. E. Skakkebaek, "Are oestrogens involved in falling sperm counts and disorders of the male reproductive tract?," *Lancet*, vol. 341, no. 8857, pp. 1392-1396, 1993. [https://doi.org/10.1016/0140-6736\(93\)90953-E](https://doi.org/10.1016/0140-6736(93)90953-E)
- [10] I. M. Ramírez-Sánchez *et al.*, "Efectos de los estrógenos como contaminantes emergentes en la salud y el ambiente," *Tecnol. y Cienc. del Agua*, vol. 6, no. 5, pp. 31-42, 2015. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000500003
- [11] M. A. Sarabia-Méndez *et al.*, "Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 33, no. 1, pp. 109-116, 2017. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.10>
- [12] J. J. Hoyos-Sebá *et al.*, "Animal manure in the context of renewable energy and value-added products: A review," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 196, p. 109660, 2024. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2023.109660>
- [13] Q. Zhang *et al.*, "Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates," *Renew. Energy*, vol. 98, pp. 108-119, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.029>
- [14] P. G. Kougias and I. Angelidaki, "Biogas and its opportunities-A review," *Front. Environ. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 1-12, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1037-8>
- [15] M. Askari *et al.*, "Landfill biogas production process," *Proc. Int. Conf. Food Engineering and Biotechnology*, vol. 09, pp. 208-212, 2011. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.1761.0886>
- [16] FAO, "Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores," Colección Documentos Técnicos N° 12, Buenos Aires, Argentina, 2019. [Online]. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca5082es>
- [17] M. Varnero, Manual de biogás. Santiago, Chile: FAO, 2011. [Online]. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/items/71b5b48f-4ba2-44fc-ba9a-4188e3ca4838>
- [18] D. Castillo and C. Tito, "Obtención de biogás a partir de excremento de cuy en condiciones ambientales en Tacna Perú," *Cienc. & Desarro.*, vol. 13, no. 85, pp. 84-91, 2019. <https://doi.org/10.33326/26176033.2011.13.284>
- [19] J. Mata-Alvarez *et al.*, "A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 412-427, 2014. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.04.039>

- [20] J. C. Solarte Toro *et al.*, "Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio," *Revista ION*, vol. 30, no. 1, p. 105-116, 2017. <https://doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017008>
- [21] R. Castro-Rivera *et al.*, "Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 36, no. 3, pp. 529-539, 2020. <https://doi.org/10.20937/RICA.53545>
- [22] K. Hagos *et al.*, "Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 1485-1496, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.184>
- [23] X. Wang *et al.*, "Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw," *Bioresour. Technol.*, vol. 120, pp. 78-83, 2012. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.06.058>
- [24] J. Ning *et al.*, "Effects of C/N ratio on biogas production by anaerobic co-digestion of pig manure and corn straw," *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, vol. 34, no. Z, pp. 93-98, 2018. <https://doi.org/10.11975/J.ISSN.1002-6819.2018.Z.015>
- [25] M. Kumari and M. K. Chandel, "Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste: Focus on mix ratio optimization and synergistic effects," *J. Environ. Manage.*, vol. 345, p. 118821, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118821>
- [26] J. E. Barreda-Del-Carpio *et al.*, "Co-digestión de tres tipos de estiércol (vaca, cuy y cerdo) para obtener biogás en el sur del Perú," *Rev. Investig. Altoandin.*, vol. 24, no. 3, pp. 174.181, 2022. <https://doi.org/10.18271/RIA.2022.457>
- [27] Y. D. Valdez y D. M. Lozano, "Producción de biogás mediante combinación de estiércol vacuno y de cuy en la región Moquegua," Tesis de título, Univ. Continental, Huancayo, Perú, 2023. [Online]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/14035>
- [28] R. F. Vargas *et al.*, "Enhancement of biogas production using nanostructured magnetite (Fe₃O₄) in a bioreactor fed with Peruvian guinea pig manure," *RSC Adv.*, vol. 15, no. 19, pp. 15375-15383, 2025. <https://doi.org/10.1039/D5RA00102A>
- [29] H. Carrère *et al.*, "Improving pig manure conversion into biogas by thermal and thermo-chemical pretreatments," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 15, pp. 3690-3694, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.015>
- [30] M. H. Gerardi, *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003. <https://doi.org/10.1002/0471468967>
- [31] A. Pérez y P. Torres, "Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables," *Ing. Compet.*, vol. 10, no. 2, pp. 41-52, 2008. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323482002>
- [32] J. Mata-Alvarez, *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*. London, UK: IWA Publishing, 2005, pp. 59-61. <https://doi.org/10.2166/9781780402994>
- [33] A. J. Ward *et al.*, "Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 17, pp. 7928-7940, 2008. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.02.044>
- [34] L. C. Corrales *et al.*, "Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta," *Nova*, vol. 13, no. 23, pp. 55-80, 2015. <https://doi.org/10.22490/24629448.1717>
- [35] R. Lauri *et al.*, "Acidogenic fermentation of urban organic waste: Effect of operating parameters on process performance and safety," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 86, pp. 55-60, 2021. <https://doi.org/10.3303/CET2186010>
- [36] C. Gonzalez-Fernandez *et al.*, "Anaerobic digestion of microalgal biomass: Challenges, opportunities and research needs," *Bioresour. Technol.*, vol. 198, pp. 896-906, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.095>
- [37] F. Xu *et al.*, "Anaerobic digestion of food waste - Challenges and opportunities," *Bioresour. Technol.*, vol. 247, pp. 1047-1058, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.09.020>
- [38] S. D. Hafner and S. Astals, "Systematic error in manometric measurement of biochemical methane potential: Sources and solutions," *Waste Manage.*, vol. 91, pp. 147-155, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.05.001>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.