

Análisis comparativo del potencial sinérgico de la codigestión de lodos residuales con diferentes estiércoles animales en la producción de biogás

Comparative analysis of the synergistic potential of the co-digestion of sewage sludge with different animal manures in biogas production

Carlos Alfonso Sánchez González^{1*}, Sebastián Jostin Fernández Otiniano¹ y Julio Manuel Vargas Mendiola¹

¹ Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Científica del Sur. Lima, Perú.



Citar como: Sánchez González, C. A. et al. (2026). «Análisis comparativo del potencial sinérgico de la codigestión de lodos residuales con diferentes estiércoles animales en la producción de biogás». *South Sustainability*, 7(1), e136.
DOI: 10.21142/SS-0701-2026-e136

Artículo recibido: 16/10/2025
Revisado por pares
Artículo aceptado: 23/1/2026



© Los autores, 2026. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
100083539@cientifica.edu.pe

Editor asociado: Lorena Ramírez

RESUMEN

La contaminación producida por la acumulación y el tratamiento inadecuado de residuos con alta carga orgánica representa una problemática creciente en el contexto actual, debido a su generación continua por parte de actividades productivas y la expansión urbana. De este modo, se presenta una alternativa de valorización prometedora conocida como codigestión anaeróbica, lo que produce biogás como fuente de energía, a partir de distintos residuos orgánicos. Para esto se tomó en cuenta a los lodos residuales y estiércoles animales, dos residuos con alto potencial de valorización energética. En este contexto, el presente artículo evaluó el potencial sinérgico de la codigestión. Asimismo, se comparó su impacto sobre la eficiencia de producción de biogás y las condiciones operativas óptimas. Se estructuró la revisión en cuatro ejes temáticos que nos permitieran abordar la composición de los sustratos, la proporción de mezcla, las condiciones operativas y pretratamientos, sobre el rendimiento de este proceso. Además, se aplicó la metodología PRISMA para la selección sistemática de 32 artículos científicos. Se identificó que el potencial de codigestión varía según la relación C/N del tipo de estiércol y su proporción con los lodos, y es clave en el control de temperatura (mesófila), el tipo de biodigestor y los pretratamientos, con valores máximos reportados de hasta 1392,9 mL CH₄/g SV bajo condiciones óptimas. La codigestión anaerobia de lodos con estiércoles, especialmente gallinaza, demuestra alto potencial sinérgico bajo condiciones optimizadas, lo que constituye una estrategia clave para la producción energética sostenible, aunque aún se requiere estandarizar métodos de medición para mayor precisión.

Palabras clave: lodos residuales, codigestión, relación C/N, sustratos, metano

ABSTRACT

Pollution from the accumulation and inadequate treatment of waste with a high organic load is a growing problem in the current context, due to its continuous generation through production activities and urban expansion. It is in this context that we present a promising valorization alternative known as anaerobic co-digestion, for the production of biogas as an energy source from various forms of organic waste. For this purpose, sewage sludge and animal manure, two forms of waste with high energy recovery potential, were considered. In this article, we evaluate the synergistic potential of co-digestion, while also comparing its impact on biogas production efficiency and optimal operating conditions. Our review is structured around four thematic areas, enabling us to address the composition of the substrates, the mixing ratio, the operating conditions and pretreatments, all of which affect the performance of the process. Furthermore, we applied the PRISMA methodology for the systematic selection of 32 scientific articles. Co-digestion potential was found to vary according to the C/N ratio of the manure type and its proportion with the sludge. Key factors included temperature control (mesophilic), the type of biodigester and pretreatments, with maximum reported values under optimal conditions of up to 1392.9 mL CH₄/g VS. Anaerobic co-digestion of sludge with manure, particularly poultry manure, was found to demonstrate high synergistic potential under optimized conditions, marking it out as a key potential strategy for sustainable energy production; however, standardized measurement methods will be required to ensure greater accuracy.

Keywords: Sewage sludge, co-digestion, C/N ratio, substrates, methane



Introducción

La gestión adecuada de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es un desafío ambiental cada vez más importante, ya que estos son considerados residuos peligrosos por su contenido de materia orgánica y contaminantes (Araujo *et al.*, 2018; Qrenawi y Rabah, 2020). Su composición depende del tipo de aguas residuales y de los procesos que se realicen en la PTAR para descontaminar el agua antes de su reúso o vertimiento (Abdelrahman *et al.*, 2023). Asimismo, con el aumento de PTAR, la producción de lodos ha incrementado, como se muestra en el caso de Polonia, donde entre 2009 y 2016 se sumaron 100 nuevas PTAR, a fin de modernizar las instalaciones para cumplir con las regulaciones de la UE y mejorar la eficiencia del tratamiento, lo que aumentó la generación de lodos en 49 000 toneladas de materia seca entre 2011 y 2016 (Przydatek y Wota, 2020). Esta situación refleja la necesidad de métodos más eficaces para su tratamiento y valorización, porque disminuye su impacto ambiental y aprovecha su potencial, al contener materia orgánica y nutrientes (Amador *et al.*, 2015).

Además, la gestión de lodos representa un desafío económico significativo para las PTAR, ya que su tratamiento y eliminación pueden representar entre el 25 % y 60 % de los costos operativos (Molinos-Senante *et al.*, 2013; Lucia *et al.*, 2025). Desde el punto de vista ambiental, los lodos pueden acumular patógenos, metales pesados y compuestos emergentes que, sin un tratamiento adecuado, pueden transferirse al suelo o a la cadena trófica, lo que ha intensificado la presión regulatoria en regiones como la Unión Europea mediante normativas más estrictas, como la Directiva 86/278/EEC, para proteger la salud humana y el medioambiente (Domini *et al.*, 2022).

Debido a esto, se considera la transformación en biogás mediante la digestión anaeróbica en biodigestores, un proceso diseñado para aprovechar un sustrato como el lodo residual, como fuente de energía renovable, con la posibilidad de que los subproductos del proceso sean utilizados como fertilizantes (Solarte Toro *et al.*, 2017), lo que reduce volúmenes asociados a este residuo y funciona como proveedor energético a través del metano producido (Wang *et al.*, 2020; Arelli *et al.*, 2024). No obstante, utilizar lodos como único sustrato presenta limitaciones operativas que restringen la eficiencia, como desequilibrios nutricionales, baja biodegradabilidad de algunos compuestos y una inadecuada proporción entre el carbono presente en la materia orgánica a degradar y la cantidad de macronutrientes involucrados, la denominada relación C/N (Li *et al.*, 2024). Este último es un parámetro crítico, puesto que un exceso de nitrógeno provoca acumulación de amoníaco e inhibición del proceso, mientras que un déficit limita el crecimiento de los microorganismos metanogénicos y reduce la producción de biogás (Lorenzo Acosta y Obaya Abreu, 2005).

Frente a esto, la codigestión anaeróbica se presenta como una estrategia eficaz, ya que implica trabajar con mezclas de sustratos para superar limitaciones relacionadas con las propiedades fisicoquímicas y optimización de un solo sustrato (Sarabia Méndez *et al.*, 2017). Esto ayuda a la estabilización del proceso, el equilibrio de nutrientes y los efectos sinérgicos de los microorganismos, para mejorar la generación de biogás y metano (Siddique y Wahid, 2018; Alrbai *et al.*, 2024). En este escenario, el estiércol de animal se presenta como un cosustrato bastante común para la codigestión anaeróbica, debido a su alta disponibilidad, bajo costo, composición rica en materia orgánica y en bacterias que participan activamente en las etapas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Corrales *et al.*, 2015; Lavergne *et al.*, 2020). Además, complementa las deficiencias de los lodos residuales para obtener una relación C/N adecuada (Holm-Nielsen *et al.*, 2009). Asimismo, el uso de diferentes estiércoles animales en la codigestión permite explorar variaciones en la eficiencia del proceso, de modo que cada tipo posee características particulares en su contenido de sólidos volátiles, fibra, capacidad de amortiguar el pH y carga microbiana (Ma *et al.*, 2020).

Si bien existe un creciente número de estudios experimentales sobre codigestión de lodos residuales con estiércoles animales, donde su combinación mejora sus propiedades y optimiza la eficiencia en los digestores anaeróbicos (Julio Guerrero *et al.*, 2016), aún predomina una limitada sistematización comparativa, y la falta del análisis dificulta la identificación de tendencias claras, proporciones óptimas de mezcla y rangos de rendimiento reportados en la literatura (González *et al.*, 2022). Teniendo esto como base, nos planteamos como pregunta de investigación: ¿Cuáles podrían ser las combinaciones de sustratos más eficaces y en qué condiciones operativas generan los mayores efectos sinérgicos en la producción de biogás?

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo evaluar comparativamente el potencial sinérgico de la codigestión de lodos residuales con diferentes estiércoles animales, analizando su impacto en la eficiencia de producción de biogás. Asimismo, esta revisión proporciona una síntesis comparativa de los distintos tipos de estiércol animal empleados, considerando sus características fisicoquímicas, y de las condiciones operativas, identificando tendencias, proporciones óptimas y rangos de rendimiento reportados en la literatura.

Metodología

El presente artículo corresponde a una revisión sistemática de alcance con análisis comparativo, orientada a evaluar, analizar y comparar de manera estructurada la eficiencia de la codigestión anaerobia de lodos residuales con distintos tipos de estiércol, así como las condiciones operativas y estrategias de optimización

reportadas en la literatura reciente. Este tipo de revisión se seleccionó debido a la heterogeneidad metodológica de los estudios disponibles y a la necesidad de integrar resultados experimentales bajo un marco analítico común, sin restringirse exclusivamente a un metaanálisis cuantitativo.

La revisión se desarrolló siguiendo las directrices del método PRISMA, adaptadas a un enfoque analítico-comparativo, lo que permitió garantizar transparencia, reproducibilidad y rigor en los procesos de búsqueda, selección y análisis de la información. El procedimiento analítico se estructuró en cuatro etapas secuenciales: (i) identificación y selección de estudios relevantes; (ii) extracción sistemática de datos; (iii) estandarización de variables y unidades; y (iv) análisis comparativo de resultados en función de ejes temáticos definidos.

En primer lugar, se realizó una búsqueda exhaustiva de literatura científica en las bases de datos ScienceDirect,

Scopus, Web of Science (WOS) y Research4Life, complementada con una búsqueda manual para identificar estudios adicionales relevantes. Se emplearon ecuaciones de búsqueda avanzadas basadas en operadores booleanos, enfocadas en la producción de biogás, codigestión anaerobia, lodos residuales y estiércol. El periodo de búsqueda se delimitó entre 2021 y 2025, con el fin de capturar avances recientes en tecnologías de digestión anaerobia, mejoras en el rendimiento de metano y estrategias emergentes de optimización del proceso.

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión fueron los siguientes:

- Artículos originales de investigación experimental.
- Publicaciones en idioma inglés.
- Estudios publicados entre 2021 y 2025.
- Investigaciones que evalúen explícitamente la codigestión

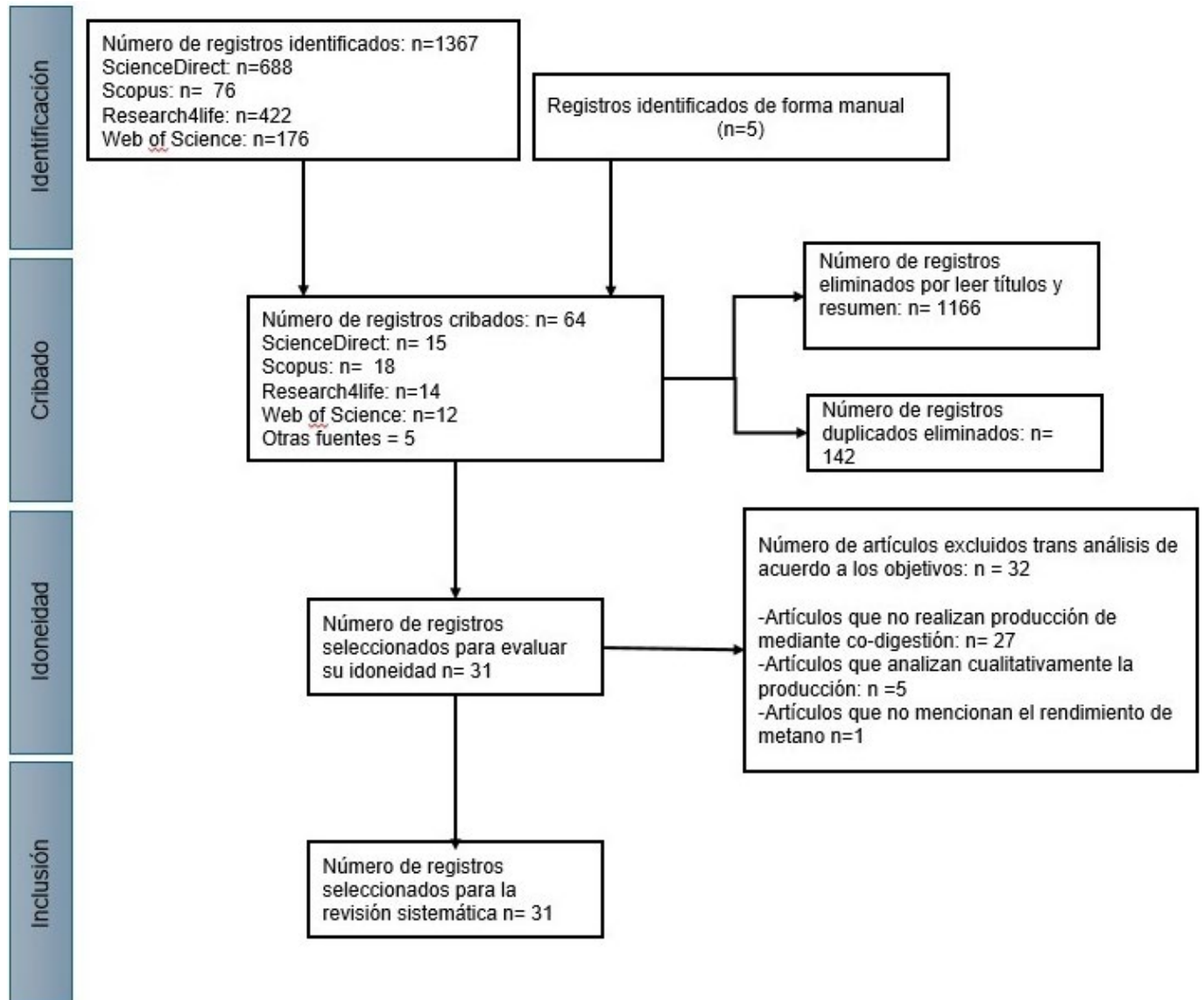


Figura 1. Diagrama PRISMA búsqueda y selección de artículos



anaerobia de lodos residuales con uno o más tipos de estiércol.

- Estudios que reporten de forma cuantitativa el rendimiento de metano y permitan su estandarización.

Los criterios de exclusión incluyeron:

- Artículos de revisión, libros, tesis o literatura gris.
- Estudios sin acceso a texto completo.
- Investigaciones que analicen exclusivamente digestión anaerobia simple (sin codigestión).
- Estudios que no reporten rendimiento de biogás o metano.
- Trabajos que no especifiquen el tipo de sustrato o que no incluyan lodos residuales.

Proceso de selección de estudios

La aplicación de las ecuaciones de búsqueda permitió identificar inicialmente 13 173 registros. Tras la eliminación de duplicados y la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión en títulos y resúmenes, se seleccionaron 64 artículos para lectura completa. Finalmente, luego de una evaluación detallada de contenido y una revisión independiente por los investigadores, se incluyeron 31 estudios, los cuales cumplieron plenamente con los objetivos y variables definidos. Este proceso se resume en el diagrama PRISMA correspondiente (Figura 1).

Para cada estudio seleccionado se extrajeron de manera sistemática las siguientes variables: tipo de estiércol, características fisicoquímicas del sustrato, proporciones de mezcla, condiciones operativas del digester, uso de pretratamientos o aditivos y rendimiento de metano (Tabla 1).

Con el fin de mejorar la comparabilidad entre estudios, todos los valores de rendimiento de metano fueron estandarizados a la unidad mL CH₄/g SV. Se realizaron las

conversiones necesarias cuando los datos originales se reportaban en unidades diferentes.

Resultados y discusión

Caracterización de sustratos

El primer eje está enfocado en la identificación y descripción de los distintos tipos de estiércol empleados en los 17 estudios analizados (Tabla 2), considerando principalmente el tipo de estiércol, su composición química (especialmente la relación C/N), y sus propiedades fisicoquímicas. Esta caracterización es fundamental, puesto que la codigestión busca generar un equilibrio de nutrientes con los lodos residuales, principalmente una relación C/N óptima que esté en un rango de 20 a 30.

La gallinaza fue el sustrato más estudiado, al presentar de manera consistente relaciones C/N bajas. Sillero *et al.* (2022, 2023c) reportaron las relaciones C/N más bajas registradas en esta revisión, de 3,24 y 3,04, respectivamente. De igual forma, aunque ligeramente superiores, se obtuvieron en los estudios de Jasinska *et al.* (2024a), con un valor de 7,38, y de Edunjobi *et al.* (2024) con 9, lo que indica exceso de nitrógeno en comparación con otros estiércoles, que pueden inhibir si no se acompañan de materiales con mayor carbono. En este último estudio reportan el porcentaje de lignina en la gallinaza, presente en baja cantidad (2,51 %), lo que facilita la biodegradación. Sin embargo, se encontraron casos con valores atípicos, con una relación C/N de 21 en la investigación de Mahmoud *et al.* (2022) y de 29 según Nuhu *et al.* (2021). Esto se puede atribuir a la alimentación o condiciones de salud, factores que también condicionan las propiedades del estiércol.

Por otro lado, el estiércol vacuno muestra relaciones C/N altas y más estables, como las reportadas por Song *et al.* (2021), con una relación de 25, y de Abdelhay *et al.* (2021), con una relación aún más alta de 35. El estiércol

Tabla 1. Ejes temáticos y manejo de variables

Eje temático	VARIABLES ESPECÍFICAS	¿Qué se va a hacer con cada variable?	Orientación del análisis
Eje 1: Caracterización de sustratos	- Tipo de estiércol - Composición química (C/N) - Propiedades fisicoquímicas (pH, humedad, densidad, sólidos volátiles)	Identificar el tipo de estiércol usado y describir sus propiedades más relevantes	Comparar características entre tipos de estiércol; analizar su potencial según composición
Eje 2: Proporciones de mezcla	- Tipo de estiércol - Proporción de la mezcla - Rendimiento de metano (mL CH ₄ /g SV)	Analizar el efecto de las proporciones de mezcla de sustratos sobre el rendimiento de metano	Comparar configuraciones de mezcla y tipo de estiércol para identificar combinaciones con mayor producción
Eje 3: Condiciones operativas	- Temperatura del digester - Tipo de reactor - Tiempo de retención hidráulica (TRH) - Rendimiento de metano (mL CH ₄ /g SV)	Describir las condiciones bajo las cuales se obtuvo el rendimiento reportado	Analizar cómo las condiciones operativas afectan la eficiencia y establecer parámetros óptimos
Eje 4: Pretratamientos y aditivos	- Relación de mezcla - Tipo de pretratamiento - Tipo de aditivo - Rendimiento de metano (mL CH ₄ /g SV)	Identificar el tipo de pretratamiento o aditivo usado y su efecto sobre la producción	Comparar estrategias de pretratamiento y uso de aditivos para determinar su influencia en el rendimiento

porcino también presentó valores prometedores cercanos a 21, reportados por Xu *et al.* (2022) y Zhang *et al.* (2021), aunque en el caso de Mosquera *et al.* (2021) tuvieron una relación alta de 33,18, hecho que puede deberse al estiércol que proviene de animales alimentados con fórmulas comerciales. Asimismo, otros estiércoles menos estudiados son el de equino en la investigación de Naji *et al.* (2023), con relación C/N de 32, y el de búfalo que usaron Zhou *et al.* (2023), con una relación de 32,01, que evidenciaron su potencial como alternativas viables para la codigestión con lodos residuales.

En el análisis de la composición química del estiércol, los niveles azufre (S) fueron generalmente bajos. Zhou *et al.* (2023), Wang *et al.* (2022) y Zhang *et al.* (2021) reportan contenidos <0,5 %, en estiércol de búfalo, gallinaza y estiércol porcino, respectivamente, lo que reduce el

riesgo de formación de H₂S. En cuanto al pH, Sillero *et al.* (2024) y Edunjobi *et al.* (2024) reportan pH ligeramente alcalino en rangos de aproximadamente 8,41 a 9,68 en la gallinaza, condición que debe corregirse para no inhibir el proceso; en contraste, otros estiércoles mostraron valores cercanos a la neutralidad, como el vacuno que reporta pH 7,16 según Alkhrissat *et al.* (2023) y 7,14 para Song *et al.*, (2021), o los lodos de pescado seco con un pH 7 según Estévez *et al.* (2022).

Al comparar los sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) se muestran marcadas diferencias. Destacan Estévez *et al.* (2022) con los valores más altos de sólidos totales (95 ± 9,0 %) y volátiles (72 ± 7,0 %) para lodos de pescado seco, seguidos por Nuhu *et al.* (2021), que también presenta buena concentración de sólidos (ST: 74,79 %; SV: 56,30 %) y baja humedad (CH: 25,21 %) en la gallinaza. En

Tabla 2. Análisis de las características del cosustrato.

Autor	Tipo de estiércol	Composición química	Propiedades fisicoquímicas
(Jasinska <i>et al.</i> , 2024a)	Gallinaza	C/N: 7,38	ST: 27 %
(Sillero <i>et al.</i> , 2023c)	Gallinaza	C/N: 3,04 ± 0,86	pH: 9,36 ± 0,12
(Sillero <i>et al.</i> , 2024)	Gallinaza	C/N: 5,29 ± 0,29	pH: 9,68 ± 0,09
(Edunjobi <i>et al.</i> , 2024)	Gallinaza	C/N: 9 Lignina: 2,51 ± 0,16 %	pH: 8,41 ± 0,005 ST: 52,38 ± 0,04 %
(Naji <i>et al.</i> , 2023)	Equino	C/N: 32	
(Zhou <i>et al.</i> , 2023)	De búfalo	C/N: 32,01 S: 0,20 ± 0,02 %	pH: 7,44 ST: 20,27 ± 0,16 % SV: 16,62 ± 0,28 %
(Sillero <i>et al.</i> , 2022)	Gallinaza	C/N: 3,24 ± 0,86	pH: 9,76 ± 0,32
(Alkhrissat <i>et al.</i> , 2023)	Vacuno	C/N: 20,74	pH: 7,16
(Mahmoud <i>et al.</i> , 2022)	Gallinaza	C/N: 21	CH: 83,11 % ST: 90,86 % SV: 9,14 % MO: 86,3 %
(Xu <i>et al.</i> , 2022)	Porcino	C/N: 20,94	ST: 23,11 ± 0,28 % SV: 20,52 ± 0,24 %
(Wang <i>et al.</i> , 2022)	Gallinaza	C/N: 4,14 S: 0,47 ± 0,02 %	pH: 7 ST: 59,16 ± 0,06 % SV: 48,19 ± 0,24 %
(Estévez <i>et al.</i> , 2022)	Lodos de pescado secos	Zn: 620 ± 155 (mg (kg TS) ⁻¹)	pH: 7 ST: 95 ± 9,0 % SV: 72 ± 7,0 %
(Mosquera <i>et al.</i> , 2021)	Porcino	C/N: 33,18	pH: 7,16 ± 0,22 ST: 29,32 ± 0,04 % SV: 22,92 ± 0,07 %
(Nuhu <i>et al.</i> , 2021)	Gallinaza	C/N: 29 S: 0,9%	CH: 25,21 % ST: 74,79 % SV: 56,30 %
(Zhang <i>et al.</i> , 2021)	Porcino	C/N: 20,70 ± 1,59 % S: 0,44 ± 0,03 %	pH: 8,58 ± 0,01 ST: 31,97 ± 0,16 % SV: 20,16 ± 0,28 %
(Song <i>et al.</i> , 2021)	Vacuno	C/N: 25	pH: 7,14
(Abdelhay <i>et al.</i> , 2021)	Vacuno	C/N: 35	

Nota. C/N: relación carbono/nitrógeno. ST: sólidos totales. SV: sólidos volátiles. S: azufre. CH: contenido de humedad. MO: materia orgánica.



contraste, Mahmoud *et al.* (2022) presentan alto contenido de ST 90,86 %, pero un bajo SV (9,14 %), pese a su alto contenido de materia orgánica (86,3 %), lo que sugiere presencia de compuestos recalcitrantes. Resultados similares se observaron en los estudios de Mosquera *et al.* (2021) y Zhou *et al.* (2023), que indican que no todo alto contenido orgánico se traduce necesariamente en mayor potencial metanogénico.

En conjunto, los estudios evidencian que las diferencias en la relación C/N y en la calidad de la fracción orgánica son determinantes para el desempeño de la codigestión. Mientras que la gallinaza requiere necesariamente mezclas compensatorias, aquellos con relaciones medias o altas, como el vacuno, muestran mayor compatibilidad con lodos residuales. Asimismo, aunque altos contenidos de SV suelen asociarse a un mayor potencial metanogénico, la calidad de la fracción orgánica y la presencia de compuestos recalcitrantes resultan determinantes. Esta variabilidad resalta la importancia de una selección adecuada del cosustrato, basada no solo en su disponibilidad, sino en su capacidad para equilibrar el sistema y favorecer una degradación anaerobia eficiente.

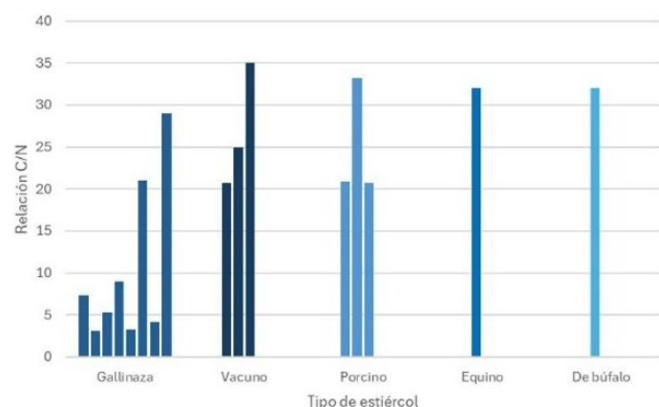


Figura 2. Relaciones C/N reportadas por los autores para diferentes tipos de estiércol.

Proporción de mezcla

El rendimiento de metano depende tanto del tipo de estiércol como de la proporción en que se mezcla con los lodos. Jasińska *et al.* (2024a) combinaron 6,3 L de gallinaza con 0,8 L de lodos y alcanzaron 0,631 mL CH₄/g de SV, mostrando que una mayor fracción de gallinaza, rica en materia orgánica, eleva la producción. Sillero *et al.* (2023b) usaron proporciones equitativas (792 mL lodos: 792 mL vinaza: 16 mL gallinaza) y obtuvieron 113 mL CH₄/g SV; aunque la gallinaza fue minoritaria, su aporte de nutrientes mejoró la biodisponibilidad. Stres *et al.* (2024), con 70 mL lodos, 35 mL suero de queso y 10 mL estiércol vacuno, lograron solo 52,5 mL CH₄/g SV.

Fernández Rodríguez *et al.* (2023) codigestionaron lodos, porcino y vacuno en 50: 270: 330 mL y reportaron 236 mL CH₄/g de SV, dentro de rangos aceptables pero

limitados por la similitud composicional de los estiércoles. Edunjobi *et al.* (2024) utilizaron 1500 g lodos, 89,8 g gallinaza y 11,21 g bagazo cervecero; la incorporación de bagazo aportó estructura y redujo inhibición por amonio, lo que alcanzó 400,34 mL CH₄/g de SV. Chernysh *et al.* (2022) emplearon 400 mL lodos y 2800 mL estiércol de codorniz, pero el bajo volumen relativo de lodos y la alta dilución derivaron en solo 50 mL CH₄/g SV.

Nikiema *et al.* (2022) combinaron 350 mL lodos, 350 mL estiércol vacuno y 20 mL solución mineral, para obtener 152,43 mL CH₄/g SV; la solución mineral estabilizó el sistema, aunque el rendimiento fue moderado. Lee *et al.* (2022) probaron una relación 67:33 (lodos: estiércol porcino) y lograron 160 mL CH₄/g SV, lo cual evidenció que una dosificación equilibrada incrementa la biodisponibilidad de nutrientes.

En conjunto, los estudios analizados evidencian que el rendimiento de metano en la codigestión anaerobia de lodos residuales está fuertemente condicionado por la proporción de mezcla y el tipo de estiércol incorporado, más que por la simple adición de un segundo sustrato. Se observa una tendencia consistente a mayores rendimientos cuando los estiércoles con alto contenido orgánico y capacidad tamponadora, como la gallinaza y el estiércol porcino, se incorporan en proporciones moderadas que complementan la composición de los lodos, optimizando la relación C/N y la biodisponibilidad de nutrientes. En contraste, proporciones excesivas de estiércol o mezclas con sustratos de composición similar a los lodos tienden a generar rendimientos más bajos, asociados a fenómenos de dilución, acumulación de amonio o limitaciones microbiológicas. Estos resultados sugieren que las combinaciones más eficientes no responden a una proporción universal, sino a un equilibrio entre aporte orgánico, estabilidad del proceso y sinergia bioquímica entre sustratos, lo cual contribuye directamente a responder la pregunta de investigación sobre las configuraciones de mezcla que optimizan la producción de metano.

Tabla 3. Análisis de la influencia de la proporción de mezcla de sustratos en el rendimiento

Autor	Tipo de estiércol	Proporción de la mezcla	Rendimiento de metano
(Jasińska <i>et al.</i> , 2024a)	Gallinaza	Gallinaza: 6,3 L Lodos: 8,7 L	0,631 mL CH ₄ /g de SV
(Sillero <i>et al.</i> , 2023b)	Gallinaza	Lodos: 792 mL Vinaza vínica: 792 mL Gallinaza: 16 mL	113 mL CH ₄ /g de SV
(Stres <i>et al.</i> , 2024)	Vacuno	Lodos: 70 mL Suero de queso: 35 mL Estiércol vacuno: 10 mL	52,5 mL CH ₄ /g de SV
(Fernández Rodríguez <i>et al.</i> , 2023)	Porcino y vacuno	Lodos: 50 mL Purín de cerdo: 270 mL Estiércol vacuno: 330 mL	236 mL CH ₄ /g de SV

(Edunjobi <i>et al.</i> , 2024)	Gallinaza	Lodos: 1500 g Gallinaza: 15,09 g Bagazo cervicero: 11,21 g	400,34 mL CH ₄ /g de SV
(Chernysh <i>et al.</i> , 2022)	Gallinaza	Lodos: 400 mL Estiércol de codorniz: 2800 mL	50 mL/g de SV
(Nikiema <i>et al.</i> , 2022)	Vacuno	Lodos: 350 mL Estiércol vacuno: 150 mL Solución mineral: 20 mL	152,43 mL/g de SV
(Lee <i>et al.</i> , 2022)	Porcino	Lodos: Estiércol porcino (67:33)	160 mL CH ₄ /g SV

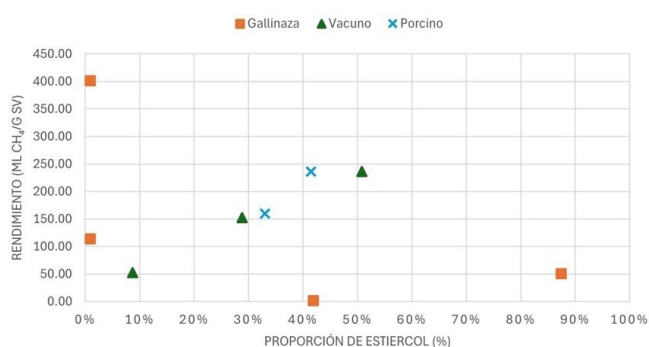


Figura 3. Influencia de la proporción de mezcla en el rendimiento de metano

Condiciones operativas

El tercer eje aborda las condiciones operativas bajo las cuales se evaluó la codigestión anaerobia en 9 artículos (Tabla 4), que analizaron variables como temperatura de operación, tipo de reactor y tiempo de retención hidráulica (TRH), entre otros parámetros, y permitieron determinar cómo se obtienen los resultados de eficiencia en la producción de biogás. Cabe señalar que los rendimientos de metano se reportan empleando diferentes unidades y criterios, lo que introduce cierta heterogeneidad; por ello, los valores elevados deben interpretarse considerando el diseño experimental, el volumen del reactor y el tipo de medición (producción específica o acumulada).

La mayoría de los estudios se desarrollaron bajo condiciones mesófilas (30-40 °C), asociadas a rendimientos elevados y mayor estabilidad del proceso, como el estudio de Jasinska *et al.* (2024b), donde utilizaron un sistema automatizado AMPTS II a 37 °C y se alcanzaron 340 mL CH₄/g de SV. De forma similar, Mudzanani *et al.* (2022), con una botella Schott como biodigestor a 37 °C, reportaron un rendimiento de 37,61 L CH₄/g de SV, acumulado tras 31 días de digestión.

Sin embargo, algunos estudios exploraron condiciones alternativas. Sillero *et al.* (2023a) evaluaron un reactor de tanque agitado continuo (CSTR) de dos etapas, una en condiciones mesófilas (35 °C) y otra en termófilas (55 °C), con un TRH de 20, que generó 476,2 mL biogás/g SV (67,2 % CH₄) con mayor estabilidad ante incrementos de carga. En otro ensayo Sillero *et al.* (2023b) utilizaron un

reactor tipo *batch* en condiciones hipertermófilas (70 °C), que mostró un rendimiento con 113 mL CH₄/g de SV, lo que en el estudio señalan como una condición que favorece notablemente el proceso más que condiciones mesófilas y termófilas. Cabe mencionar que la diferencia de rendimiento con su estudio previo se debe al uso de un reactor de menor capacidad, y, por ende, menor volumen de sustrato para la producción.

Por su parte, Stres *et al.* (2024) utilizaron un reactor semicontinuo operado a 38 °C, con un TRH de 17 días y OLR entre 7,5 y 8,7 DQO/L/d, que obtuvo un rendimiento de 52,5 mL CH₄/g de SV. La disminución podría deberse a una tendencia decreciente de oligoelementos esenciales, tal y como señalan los autores. En contraste, García *et al.* (2024), usando un CSTR operando a 35 ± 1 °C y TRH de 15 días, alcanzaron 435 mL CH₄/g de SV y, al igual que Sillero *et al.* (2023a), demuestran que tanto la agitación como un reactor que recibe alimentación de forma continua generan mayor producción de CH₄.

Ulukardesler *et al.* (2023) emplearon digestores discontinuos de vidrio a 35 ± 1 °C durante 65 días y obtuvieron una eficiencia para el biogás acumulado 109,5 L/kg de SV (70 % CH₄). Asimismo, los estudios de Ma *et al.* (2023) y Rani *et al.* (2022) demuestran que se pueden alcanzar altos niveles de eficiencia en la producción de biogás a pesar del uso de equipos simples, siempre que las condiciones de temperatura y tiempo de retención se mantengan estables. En el primero trabajaron con matraces cónicos a 35 ± 0,2 °C y alcanzaron una producción de 360,27 mL/g de SV, mientras que en el segundo emplearon botellas de vidrio operando entre 30 y 40 °C y TRH de 20 días y lograron 361 mL/g de SV.

El análisis conjunto sugiere que las condiciones mesófilas, combinadas con tiempos de retención moderados y sistemas con adecuada mezcla, favorecen una producción estable de metano. Aunque se han reportado buenos desempeños en condiciones térmicas extremas o con configuraciones simplificadas, los resultados dependen fuertemente del diseño del reactor y del manejo operativo (Figura 4), lo que refuerza la necesidad de interpretar los rendimientos en función del contexto experimental.

Tabla 4. Análisis de condiciones operativas que influyen en el rendimiento

Autor	Tipo de biodigestor	Parámetros de operación	Rendimiento
(Sillero <i>et al.</i> , 2023a)	Reactores de tanque agitado continuo (CSTR) con placa calefactora	T: Rango mesófilo (35 °C) y termófilo (55 °C) TRH: 20 días OLR: 3,02 gSV/L/d	Biogás: 476,2 mL/g de SV CH ₄ : 67,2 %
(Sillero <i>et al.</i> , 2023b)	Reactores tipo <i>batch</i>	T: Hipertermófilo (70 °C)	113 mL CH ₄ /g de SV



(Stres et al., 2024)	Reactores semicontinuos	T: 38 °C TRH: 15 días OLR: 7,5 - 8,7 g DQO/L/d	52,5 mL CH ₄ /g de SV
(García et al., 2024)	Reactores de tanque agitado continuo (CSTR)	T: 35 ± 1 °C TRH: 15 días	435 mL CH ₄ /g de SV
(Jasinska et al., 2024b)	Sistema Automático de Prueba de Potencial de Metano (AMPTS II)	T: 37 °C	340 mL CH ₄ /g de SV
(Ulukardesler, 2023)	Digestores discontinuos de vidrio	T: 35 ± 1 °C	Biogás: 109,5 L/kg de SV CH ₄ : 70%
(Mudzanani et al., 2022)	Botella Schott	T: 37 °C	37,61 L CH ₄ /Kg SV
(Ma et al., 2023)	Matraces cónicos	T: 35 ± 0,2 °C	Biogás: 360,27 mL/g de SV
(Rani et al., 2022)	Botellas de vidrio como digestores discontinuos	T: 30-40 °C TRH: 20 días	Biogás: 361 mL/g de SV

Nota. T: temperatura. TRH: tiempo de retención hidráulica. OLR: tasa de carga orgánica.

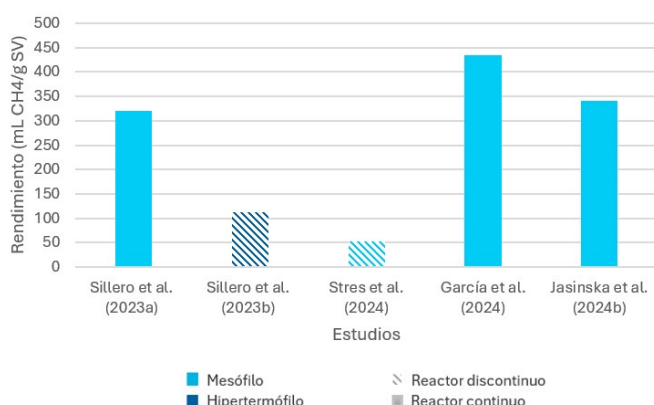


Figura 4. Comparación del rendimiento de metano bajo distintas condiciones operativas

Pretratamiento y aditivos

La eficiencia de la digestión anaeróbica depende en gran medida de los tratamientos previos que reciben los sustratos. Jasińska et al. (2024b) aplicaron pretratamiento térmico (121 °C, 30 min) a una mezcla 30 % lodo, 40 % gallinaza y 30 % restos orgánicos, lo que elevó el rendimiento 438,6 mL CH₄/g SV. Al añadir Fe metálico se alcanzaron 475 mL CH₄/g SV, y con 4,5 g NaOH se llegó a 501 mL CH₄/g SV, lo cual demostró que la alcalinización favorece la solubilización de compuestos orgánicos.

Nava et al. (2023) emplearon ácido acético al 2, 3 y 4 % sobre 60 % lodo, 20 % gallinaza y 20 % restos municipales.

El rendimiento creció de 877,8 a 1218 y a 1392,9 mL CH₄/g SV, y confirmó la correlación positiva entre la intensidad del pretratamiento ácido y la descomposición de materia compleja.

Alkhrissat et al. (2023) evaluaron la adición de 160 mg/L de nanopartículas de Fe₃O₄ en codigestión de lodo y estiércol vacuno. Los autores determinaron que la proporción óptima fue de 50:50 (lodo:estiércol) y alcanzó un rendimiento de 511,2 L CH₄/g SV. Estos resultados sugieren que la sinergia entre los sustratos maximiza la eficacia del aditivo ferroso. No obstante, este rendimiento presenta limitaciones para una comparación directa con otros estudios, dado que corresponde a una producción acumulada durante 35 días; aun así, subraya la importancia de la composición del sustrato para optimizar el desempeño del aditivo, tal como se analiza en el eje 2.

Xu et al. (2022) trabajaron con lodo y estiércol porcino (2:5) ajustando sólidos totales (ST) y añadiendo 5 g/L de biocarbón. A 14 % ST se midieron 83,1 mL CH₄/g SV y demostraron que el biocarbón actúa como soporte microbiano y amortiguador de pH.

Ma et al. (2023) compararon tres biocarbones (coco, bambú y restos de fruta) a 5 g/L en 20 % lodo, 76,2 % estiércol porcino y 5 % biocarbón. Frente al control (107,76 mL CH₄/g SV), el biocarbón de coco alcanzó 209,75 mL/g SV, lo que demostró una mayor efectividad de los tres.

El análisis integrado de los estudios incluidos en este eje muestra que la aplicación de pretratamientos físicos, químicos y la adición de materiales funcionales constituye una estrategia efectiva para potenciar el rendimiento de metano, siempre que se implemente de forma coherente con la proporción de sustratos utilizada. Los resultados revelan una tendencia clara hacia mayores producciones de metano cuando los pretratamientos favorecen la solubilización de la materia orgánica compleja y la estabilidad del sistema microbiano, como ocurre con los tratamientos termoquímicos, la alcalinización controlada y el uso de biocarbones o nanopartículas metálicas. No obstante, también se observa que incrementos en la intensidad del pretratamiento o en la dosificación de aditivos no garantizan mejoras proporcionales, lo que sugiere la existencia de umbrales operativos óptimos dependientes del tipo de sustrato y de la relación de mezcla. En este sentido, los pretratamientos y aditivos deben entenderse como herramientas de optimización complementarias, cuyo efecto máximo se alcanza cuando se integran adecuadamente a una configuración de sustratos previamente equilibrada.

Tabla 5. Impacto de pretratamientos y aditivos en el rendimiento de metano

Autor	Relación de mezcla	Pretratamiento	Aditivo	Rendimiento
(Jasińska <i>et al.</i> , 2024b)	30 % lodo 40 % gallinaza 30 % restos orgánicos	--	--	340 mL CH ₄ /g VS
		Térmico 121°C, 30 min	--	438,6 mL CH ₄ /g SV
		Termoquímico 121°C, 30 min	Fe metálico 3 g	475 mL CH ₄ /g SV
		Termoquímico 121°C, 30 min	NaOH 4,5 g	501 mL CH ₄ /g SV
(Nava <i>et al.</i> , 2023)	60 % lodo 20 % gallinaza 20 % restos municipales	Medio ácido 25°C, 90 min	Ácido acético (2 %)	877,8 mL CH ₄ /g SV
		Medio ácido 25°C, 90 min	Ácido acético (3 %)	1218 mL CH ₄ /g SV
		Medio ácido 25°C, 90 min	Ácido acético (4 %)	1392,9 mL CH ₄ /g SV
(Alkhrissat <i>et al.</i> , 2023)	30 % lodo 70 % estiércol vacuno	-	NP de Fe ₃ O ₄ 160 mg/L	340600 mL CH ₄ /g SV
	50 % lodo 50 % estiércol vacuno	-	NP de Fe ₃ O ₄ 160 mg/L	511002 mL CH ₄ /g VS
	70 % lodo 30 % estiércol vacuno	-	NP de Fe ₃ O ₄ 160 mg/L	420500 mL CH ₄ /g SV
(Xu <i>et al.</i> , 2022)	Lodo Estiércol porcino 2:5	Ajuste de ST 7 %	Biocarbón 5 g/L	66,5 mL CH ₄ /g SV
		Ajuste de ST 10 %	Biocarbón 5 g/L	73,6 mL CH ₄ /g SV
		Ajuste de ST 14 %	Biocarbón 5 g/L	83,1 mL CH ₄ /g SV
		Ajuste de ST 14 %	Control	75,3 mL CH ₄ /g VS
(Ma <i>et al.</i> , 2023)	20 % lodo 76,2 % estiércol porcino 5 % biocarbón	-	Control	107,76 mL CH ₄ /g SV
		-	Biocarbón de coco 5 g/L	209,75 mL/g de SV
		-	Biocarbón de bambú 5 g/L	123 mL/g de SV
		-	Biocarbón de retos de fruta 5 g/L	151,26 mL/g de SV

Nota. NP: nanopartículas. Fe₃O₄: óxido de hierro (III). NaOH: hidróxido de sodio. ST: sólidos totales.

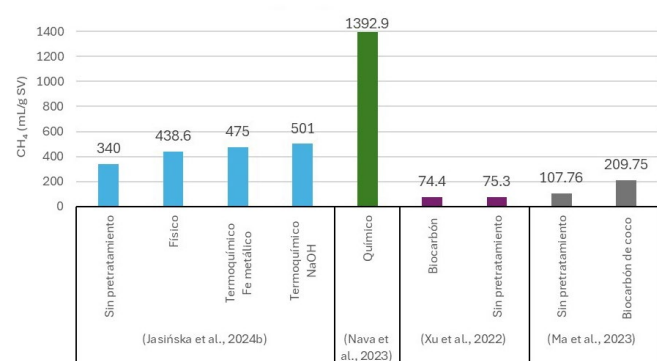


Figura 5. Comparación del rendimiento de metano bajo distintos pretratamientos o uso de aditivos

Conclusiones

La gallinaza, con baja relación C/N (3-9), requiere una codigestión con aporte de carbono para un C/N óptimo (20-30), mientras que los estiércoles vacuno y porcino presentan relaciones más equilibradas (20-35). Propiedades como pH (7-7,5), altos sólidos volátiles (>50 %) y bajo azufre (<0,5 %) son cruciales para maximizar la biodegradabilidad y evitar inhibiciones, y son la mejor elección al momento de escoger la materia prima.

La eficiencia en la producción de metano depende críticamente de la proporción de mezcla. Altas cargas de gallinaza (0,631 L CH₄/g SV) o mezclas equilibradas con bagazo cervicero (588,19 L CH₄/kg SV) demuestran rendimientos superiores. La proporción 67:33 de estiércol porcino con lodos, por ejemplo, optimiza la biodisponibilidad de nutrientes (160 mL CH₄/g SV), destacando que la sinergia compensa deficiencias nutricionales.

Los reactores CSTR en rango mesófilo (35-37 °C) con TRH de 15-20 días maximizan la producción de metano (340-476 mL CH₄/g SV) gracias a la agitación continua. Aunque las condiciones hipertermófilas (70 °C) en sistemas *batch* pueden degradar materia orgánica recalcitrante, exigen mayor control para mantener la estabilidad del proceso.

Los pretratamientos térmicos o termoquímicos (por ejemplo, gallinaza, 47 % de aumento a 501 mL CH₄/g SV) y la acidificación (ácido acético al 4 %, 1392,9 mL CH₄/g SV) mejoran drásticamente el rendimiento al solubilizar la lignina. Aditivos como nanopartículas de Fe₃O₄ o biocarbón de coco aumentan la producción un 40-95 %, lo cual confirma que la modificación del sustrato es esencial para la hidrólisis.



La codigestión anaerobia de lodos residuales con estiércoles es una tecnología estratégica viable para la transición energética. Integra la valorización de residuos con la generación de energía renovable y ofrece una solución sostenible. Su implementación práctica requiere la selección de cosustratos complementarios, operación optimizada en reactores continuos bajo condiciones controladas, y el uso estratégico de pretratamientos o aditivos.

Otro aspecto para tomar en consideración en los resultados que presentan los estudios se centra en la captura y el análisis del biogás, así como el contenido de metano. Muchos de los estudios utilizan sistemas bastante sensibles para una medición más precisa, y otros usan métodos que, si bien son efectivos, pueden encontrar imprecisiones, que pueden dificultar la comparación entre la efectividad de las condiciones aplicadas durante el proceso.

Contribución de los autores

C. S. G.: Conceptualización, Metodología, Análisis formal, Investigación, Escritura - Borrador original, Visualización, Supervisión.

S. F. O.: Conceptualización, Metodología, Análisis formal, Investigación, Escritura - Borrador original, Visualización, Administración de proyectos.

J. V. M.: Conceptualización, Escritura - Borrador original, Redacción - Revisión y edición.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración del uso de IA

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron la herramienta Gemini para mejorar la calidad de la redacción del contenido. Después de usar esta herramienta, revisaron y editaron cuidadosamente el contenido según fuera necesario y asumen plena responsabilidad por el contenido de la publicación.

Referencias bibliográficas

- Abdelhay, A., Al-Hasanat, L. y Albsoul, A. (2021). «Anaerobic co-digestion of cattle manure and raw algae: Kinetic study and optimization of methane potential by RSM». *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(2), pp. 1029-1037. Disponible en: <https://doi.org/10.15244/pjoes/125523>
- Abdelrahman, A. M., Kosar, S., Gulhan, H., Cicekalan, B., Ucas, G., Atli, E., Guven, H., Ozgun, H., Ozturk, I., Koyuncu, I., van Lier, J. B., Volcke, E. I. P. y Ersahin, M. E. (2023). «Impact of primary treatment methods on sludge characteristics and digestibility, and wastewater treatment plant-wide economics». *Water Research*, 235(119920), 119920. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119920>
- Alkhrissat, T., Kassab, G. y Abdel-Jaber, M. (2023). «Impact of iron oxide nanoparticles on anaerobic co-digestion of cow manure and sewage sludge». *Energies*, 16(15), 5844. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en16155844>
- Alrbai, M., Al-Dahidi, S., Shboul, B., Abusorra, M. y Hayajneh, H. (2024). «Techno-economic feasibility study of ammonia recovery from sewage sludge digestate in wastewater treatment plants». *Cleaner Environmental Systems*, 15, 100235. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100235>
- Amador-Díaz, A., Veliz-Lorenzo, E. y Bataller-Venta, M. (2015). «Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones». *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 46, pp. 1-10. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181642434003>
- Araujo, L., Molina, S. y Noguera, L. (2018). «Aprovechamiento de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales como materia prima en la industria de la construcción: revisión bibliográfica». *Revista Agunkuyãa*, 8(1), pp. 21-28. Disponible en: <https://doi.org/10.33132/27114260.1231>
- Arelli, V., Basava Rao, V. V., Mamindlapelli, N. K., Begum, S. y Anupaju, G. R. (2024). «Synergistic effect of biological pretreatment on co-digestion of rice straw and sewage sludge: Process optimization and microbial interactions». *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 61, 103364. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103364>
- Chernysh, Y. Y., Shtepa, V. N., Plyatsuk, L. D., Chubur, V. S. y Danylov, D. V. (2022). «Anaerobic digestion combined with electrolysis of poultry manure and activated sludge inoculum». *Problemele Energeticii Regionale*, 2(54), pp. 2(54). Disponible en: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.09>
- Corrales, L. C., Antolínez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A. y Corredor Vargas, A. M. (2015). «Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta». *Nova*, 13(24), pp. 55-82. Disponible en: http://www.scielo.org/co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702015000200007
- Domini, M., Abbà, A. y Bertanza, G. (2022). «Analysis of the variation of costs for sewage sludge transport, recovery and disposal in Northern Italy: a recent survey (2015-2021)». *Water Science and Technology*, 85(4), pp. 1167-1175. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2022.040>
- Edunjobi, T. D., Agbede, O. O., Aworanti, O. A., Adebayo, A. O., Agarry, S. E., Ogunkunle, O. y Laseinde, O. T. (2024). «Enhanced anaerobic digestion of brewers' spent grain: effect of inoculum, poultry manure application and iron (iii) chloride supplementation on biogas production and its kinetics». *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(23), pp. 29561-29577. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04813-6>
- Estévez, M. M., Tomczak-Wandzel, R. y Kvamme, K. (2022). «Fish sludge as a co-substrate in the anaerobic digestion of municipal sewage sludge- maximizing the utilization of available organic resources». *EFB Bioeconomy Journal*, 2, 100027. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2022.100027>
- Fernández Rodríguez, J., Di Berardino, M. y Di Berardino, S. (2023). «Promoting the circular economy on an island: Anaerobic co-digestion of local organic substrates as a possible renewable energy source». *Microorganisms*, 11(2), 285. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020285>
- García, A., Ruiz Palomar, C., Valenzuela, E. I., Hermosilla Redondo, D., Muñoz Torre, R. y de Godos Crespo, I. (2024). «Microbial analysis of anaerobic digester reveals prevalence of manure microbiota». *Journal of Water Process Engineering*, 60(105162), 105162. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105162>
- González, R., Peña, D. C. y Gómez, X. (2022). «Anaerobic Co-Digestion of Wastes: Reviewing Current Status and Approaches for Enhancing Biogas Production». *Applied Sciences*, 12, 8884. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app12178884>
- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T. y Oleskowicz-Popiel, P. (2009). «The future of anaerobic digestion and biogas utilization». *Bioresource Technology*, 100(22), pp. 5478-5484. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>
- Jasińska, A., Grosser, A., Meers, E. y Aguilar, A. R. (2024a). «Energy recovery from poultry manure in the process of semi-continuous anaerobic co-digestion with sewage sludge». *Energy Reports*, 12, pp. 3969-3981. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.09.047>
- Jasińska, A., Grosser, A., Meers, E. y Piłyp, D. (2024b). «Stimulating methane production from poultry manure digest with sewage sludge and organic waste by thermal pretreatment and adding iron or sodium hydroxide». *Energies*, 17(11), 2679. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en17112679>
- Julio Guerrero, I. C., Peláez Jaramillo, C. A. y Molina Pérez, F. J. (2016). «Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos». *Revista ION*, 29(1), pp. 63-70. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016005>
- Lavergne, C., Bovio-Winkler, P., Etchebehere, C. y García-Gen, S. (2020). «Towards centralized biogas plants: Co-digestion of sewage sludge and pig manure maintains process performance and active microbiome diversity». *Bioresource Technology*, 297, 122442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122442>
- Lee, C., Kim, S., Park, M. H., Lee, Y. S., Lee, C., Lee, S., Yang, J. y Kim, J. Y. (2022). «Valorization of petroleum refinery oil sludges via anaerobic co-digestion with food waste and swine manure». *Journal of Environmental Management*, 307, 114562. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114562>
- Li, P., Zhao, H., Cheng, C., Hou, T., Shen, D. y Jiao, Y. (2024). «A review on anaerobic co-digestion of sewage sludge with other organic wastes for methane production: Mechanism, process, improvement and industrial application». *Biomass & Bioenergy*, 185, 107241. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107241>
- Lorenzo Acosta, Y. y Obaya Abreu, M. C. (2005). «La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I». *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), pp. 35-48. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- Lucia, C., Badalucco, L., Corsino, S. F., Galati, A., Iovino, M., Muscarella, S. M., Paliaga, S., Torregrossa, M. y Laudicina, V. A. (2025). «Management and valorisation of sewage sludge to foster the circular economy in the agricultural sector». *Discover Soil*, 2(1). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00105-9>



- Ma, G., Ndegwa, P., Harrison, J. H. y Chen, Y. (2020).** «Methane yields during anaerobic co-digestion of animal manure with other feedstocks: A meta-analysis». *The Science of the Total Environment*, 728,138224. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138224>
- Ma, W., Han, R., Zhu, L. y Chen, L. (2023).** «Effects of biochar addition on anaerobic co-digestion of sewage sludge and swine manure: copper immobilization and digestion performance». *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 98(9), pp. 2247-2256. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jctb.7449>
- Mahmoud, I., Hassan, M., Mostafa Aboelenin, S., Mohamed Soliman, M., Fouad Attia, H., Metwally, K. A., Salem, H. M., El-Tahan, A. M., El-Saadony, M. T. y Khalaphallah, R. (2022).** «Biogas manufacture from co-digestion of untreated primary sludge with raw chicken manure under anaerobic mesophilic environmental conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(4), pp. 2969-2977. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.01.016>
- Molinos-Senante, M., Hernandez-Sancho, F. y Sala-Garrido, R. (2013).** «Cost modeling for sludge and waste management from wastewater treatment plants: an empirical approach for Spain». *Desalination and Water Treatment*, 51(28-30), pp. 5414-5420. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.770486>
- Mosquera, J., Rangel, C., Thomas, J., Santis, A., Acevedo, P. y Cabeza, I. (2021).** «Biogas production by pilot-scale anaerobic co-digestion and life cycle assessment using a real scale scenario: Independent parameters and co-substrates influence». *Processes*, 9(11), 1875. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr9111875>
- Mudzanani, K., Iyuke, S. E. y Daramola, M. O. (2022).** «Co-digestion of wastewater treatment sewage sludge with various biowastes: A comparative study for the enhancement of biogas production». *Materials Today: Proceedings*, 65, pp. 2172-2183. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.539>
- Naji, A., Rechdaoui, S. G., Jabagi, E., Lacroix, C., Azimi, S. y Rocher, V. (2023).** «Pilot-scale anaerobic co-digestion of wastewater sludge with lignocellulosic waste: A study of performance and limits». *Energies*, 16(18), p. 6595. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en16186595>
- Nava, N., Hernández-Aguilar, E., Alvarado-Lassman, A. y Méndez-Contreras, J. M. (2023).** «Effect of acid pretreatment on the anaerobic codigestion of sewage sludge, chicken litter, and sugarcane waste (SCW) for biogas production». *Bioenergy Research*, 16, pp. 1889-1901. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10533-y>
- Nikiema, M., Barsan, N., Maiga, Y., Somda, M. K., Mosnegutu, E., Ouattara, C. A. T., Dianou, D., Traore, A. S., Nedeff, V. y Ouattara, A. S. (2022).** «Optimization of biogas production from sewage sludge: Impact of combination with bovine dung and leachate from municipal organic waste». *Sustainability*, 14(8), p. 4380. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su14084380>
- Nuhu, S. K., Gyang, J. A. y Kwarbak, J. J. (2021).** «Production and optimization of biomethane from chicken, food, and sewage wastes: The domestic pilot biodigester performance». *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100298. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100298>
- Przydatek, G. y Wota, A. K. (2020).** «Análisis de la gestión integral de lodos de depuradora en Polonia». *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, pp. 80-88. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00937-y>
- Qrenawi, L. I. y Rabah, F. K. J. (2020).** «Sludge management in water treatment plants: literature review». *International Journal of Environment and Waste Management*, 27(1), pp. 93-125. Disponible en: <https://doi.org/10.1504/ijewm.2021.111909>
- Rani, P., Bansal, M., Pathak, V. V. y Ahmad, S. (2022).** «Experimental and kinetic studies on co-digestion of agrifood and sewage sludge for biogas production». *Journal of Taibah University for Science*, 16(1), pp. 147-154. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/16583655.2022.2035928>
- Sarabia Méndez, M. A., Laines Canepa, J. R., Sosa Olivier, J. A. y Escalante Espinosa, E. (2017).** «Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales». *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), pp. 109-116. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.10>
- Siddique, M. N. I. y Wahid, Z. A. (2018).** «Logros y perspectivas de la codigestión anaeróbica: Una revisión». *Journal of Cleaner Production*, 194, pp. 359-371. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.155>
- Sillero, L., Solera, R. y Perez, M. (2022).** «Improvement of the anaerobic digestion of sewage sludge by co-digestion with wine vinasse and poultry manure: Effect of different hydraulic retention times». *Fuel*, 321,124104. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124104>
- Sillero, L., Perez, M. y Solera, R. (2023a).** «Temperature-phased enhanced the single-stage anaerobic co-digestion of sewage sludge, wine vinasse and poultry manure: Perspectives for the circular economy». *Fuel*, 331,125761. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125761>
- Sillero, L., Perez, M. y Solera, R. (2023b).** «Effect of temperature on biohydrogen and biomethane production using a biochemical potential test with different mixtures of sewage sludge, vinasse and poultry manure». *Journal of Cleaner Production*, 382, 135237. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135237>
- Sillero, L., Solera, R. y Pérez, M. (2023c).** «Thermophilic-mesophilic temperature phase anaerobic co-digestion of sewage sludge, wine vinasse and poultry manure: Effect of hydraulic retention time on mesophilic-methanogenic stage». *Chemical Engineering Journal*, 451, 138478. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138478>
- Sillero, L., Solera, R. y Perez, M. (2024).** «Optimisation of anaerobic co-digestion in two-stage systems for hydrogen, methane and biofertiliser production». *Fuel*, 365, 131186. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131186>
- Solarte Toro, J. C., Mariscal Moreno, J. P. y Aristizábal Zuluaga, B. H. (2017).** «Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio». *Revista ION*, 30(1), pp. 105-116. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017008>
- Song, Y.-J., Oh, K.-S., Lee, B., Pak, D.-W., Cha, J.-H., and Park, J.-G. (2021).** «Characteristics of Biogas Production from Organic Wastes Mixed at Optimal Ratios in an Anaerobic Co-Digestion Reactor». *Energies*, 14(20), 6812. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en14206812>
- Stres, B., Hatzikioseyan, A., Kousi, P., Remoundaki, E., Deutsch, L., Vogel Mikuš, K., Rak, G. y Kolbl Repinc, S. (2024).** «Case specific: Addressing co-digestion of wastewater sludge, cheese whey and cow manure: Kinetic modeling». *Heliyon*, 10(19), e38773. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38773>
- Ulukardesler, A. H. (2023).** «Anaerobic co-digestion of grass and cow manure: kinetic and GHG calculations». *Scientific Reports*, 13(1), p. 6320. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33169-0>
- Wang, P., Peng, H., Adhikari, S., Higgins, B., Roy, P., Dai, W. y Shi, X. (2020).** «Enhancement of biogas production from wastewater sludge via anaerobic digestion assisted with biochar amendment». *Bioresour Technol*, 309, 123368. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123368>

Wang, T., Xing, Z., Zeng, L., Peng, C., Shi, H., Cheng, J. J. y Zhang, Q. (2022). «Anaerobic codigestion of excess sludge with chicken manure with a focus on methane yield and digestate dewaterability». *Bioresource Technology Reports*, 19(101127), 101127. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101127>

Xu, S., Duan, Y., Zou, S., Liu, H., Luo, L. y Wong, J. W. C. (2022). «Evaluations of biochar amendment on anaerobic co-digestion of pig manure and sewage sludge: waste-to-methane conversion, microbial community, and antibiotic resistance genes». *Bioresource Technology*, 346, 126400. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126400>

Zhang, Q., Zeng, L., Fu, X., Pan, F., Shi, X. y Wang, T. (2021). «Comparison of anaerobic co-digestion of pig manure and sludge at different mixing ratios at thermophilic and mesophilic temperatures». *Bioresource Technology*, 337, 125425. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125425>

Zhou, Y., Hu, W., Sheng, J., Peng, C. y Wang, T. (2023). «Comparison of anaerobic co-digestion of buffalo manure and excess sludge with different mixing ratios under thermophilic and mesophilic conditions». *Sustainability*, 15(8), 6690. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su15086690>

