

Potential for biogas production from anaerobic digestion of animal manure: A systematic review

Abstract— Anaerobic digestion of animal manure is a sustainable alternative for livestock waste management due to its capacity to mitigate greenhouse gas emissions and generate renewable energy. This systematic review analyzes 34 studies published between 2020 and 2025 to evaluate biogas production potential, the influence of the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio, the quality of the biogas obtained, and the yields achieved under different operating conditions. The results show that bovine and poultry manure exhibit high biogas and methane production values, while swine manure improves its performance through strategies such as co-digestion or thermal pretreatment. The C/N ratio, with optimal values between 20 and 30, is confirmed as a key parameter for maintaining microbial stability and preventing ammonia inhibition, especially in manures with high nitrogen content. Despite scientific progress in this field, methodological limitations persist among the analyzed studies, hindering direct comparisons and affecting the reproducibility of results. Furthermore, knowledge gaps have been identified regarding the utilization of generated carbon dioxide and the evaluation of digestate as an agricultural fertilizer. The available evidence confirms that the anaerobic digestion of animal manure represents a viable and strategic technology for promoting the circular economy and the energy transition in the agricultural sector.

Keywords— Biogas, renewable energy, manure, methane, anaerobic digestion

Potencial para la producción de biogás a partir de digestión anaeróbica de estiércol animal: Una revisión sistemática

Resumen– La digestión anaeróbica de estiércol animal constituye una alternativa sostenible para la gestión de residuos ganaderos, debido a su capacidad para mitigar emisiones de gases de efecto invernadero y generar energía renovable. Esta revisión sistemática analiza 34 estudios publicados entre 2020 y 2025 con el objetivo de evaluar el potencial de producción de biogás, la influencia de la relación carbono-nitrógeno (C/N), la calidad del biogás obtenido y los rendimientos alcanzados bajo diferentes condiciones operativas. Los resultados evidencian que el estiércol bovino y aviar presenta valores elevados de producción de biogás y metano, mientras que el estiércol porcino mejora su desempeño mediante estrategias como la co-digestión o el pretratamiento térmico. La relación C/N, con valores óptimos comprendidos entre 20 y 30, se confirma como un parámetro clave para mantener la estabilidad microbiana y prevenir la inhibición por amoníaco, especialmente en estiércoles con alto contenido de nitrógeno. A pesar del avance científico en este campo, persisten limitaciones metodológicas entre los estudios analizados que dificultan comparaciones directas y afectan la reproducibilidad de los resultados. Asimismo, se identifican vacíos de conocimiento relacionados con el aprovechamiento del dióxido de carbono generado y la evaluación del digestato como fertilizante agrícola.

La evidencia disponible confirma que la digestión anaeróbica de estiércol animal representa una tecnología viable y estratégica para promover la economía circular y la transición energética en el sector agrícola.

Palabras clave– Biogás, energía renovable, estiércol, metano, digestión anaeróbica.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido de la producción pecuaria a nivel mundial ha incrementado de manera significativa la generación de estiércol animal, lo que plantea importantes desafíos ambientales y energéticos. Cuando estos residuos no son gestionados adecuadamente, se convierten en fuentes relevantes de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente de metano y óxido nitroso, además de contribuir a la contaminación de suelos y cuerpos de agua por lixiviación de nutrientes y dispersión de patógenos [1]. En este contexto, resulta imprescindible adoptar estrategias que permitan mitigar dichos impactos y, simultáneamente, valorizar los residuos generados.

La digestión anaerobia se ha consolidado como una alternativa tecnológica viable para el tratamiento de estiércol animal, ya que permite reducir su carga contaminante y producir biogás como fuente de energía renovable [2]. Este proceso no solo contribuye a la sustitución parcial de combustibles fósiles, sino que también genera un digestato con potencial de uso como fertilizante orgánico, fortaleciendo los

principios de la economía circular en el sector agropecuario [3]. Diversos estudios han demostrado que la eficiencia del proceso depende de factores físico-químicos del sustrato, siendo la relación carbono/nitrógeno (C/N) uno de los parámetros más críticos para la estabilidad del sistema y la producción de metano [4].

A pesar del creciente interés científico, persisten vacíos en la literatura relacionados con la estandarización de criterios metodológicos, la variabilidad en la calidad del biogás obtenido y el aprovechamiento integral de sus componentes, particularmente del dióxido de carbono [5]. Asimismo, la mayoría de los estudios reporta resultados bajo condiciones experimentales heterogéneas, lo que dificulta la comparación y extrapolación de los datos [6].

En este sentido, el objetivo general del presente estudio es evaluar el alcance y las implicancias de la producción de biogás a partir del estiércol animal desde una perspectiva global. Como objetivos específicos se plantean: (i) analizar la influencia de la relación C/N en los diferentes tipos de estiércol, (ii) evaluar la calidad del biogás obtenido en función de su composición y potencial energético y (iii) determinar el rendimiento de producción de biogás considerando el tipo de estiércol y las condiciones operativas reportadas en la literatura.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló mediante una revisión sistemática de la literatura siguiendo los lineamientos del enfoque PRISMA, con la finalidad de asegurar la transparencia y validez científica del proceso de selección de información [7]. La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos Scopus, ScienceDirect y Web of Science, abarcando publicaciones correspondientes al periodo 2020–2025. De forma complementaria, se efectuó una búsqueda manual en Google Académico para identificar estudios adicionales relevantes.

Los términos de búsqueda empleados fueron “animal manure”, “production of biogas” y “anaerobic digestion”, combinados mediante el operador booleano AND. Asimismo, se incluyeron artículos originales publicados en inglés, español o portugués que reporten parámetros asociados a la producción y calidad del biogás, así como información sobre la relación C/N y otros factores físico-químicos del estiércol [8]. Se excluyeron estudios que abordaron residuos distintos al estiércol animal, publicaciones secundarias y trabajos que no reportan datos técnicos relevantes.

El proceso de selección permitió identificar inicialmente 669 registros, de los cuales, tras la eliminación de duplicados

y la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, se incluyeron finalmente 34 estudios para el análisis. El diagrama de flujo PRISMA en la figura 1 resume gráficamente el proceso de selección de los artículos.

Todos los datos utilizados fueron recopilados directamente de las fuentes bibliográficas seleccionadas, considerando que estos pueden haber sido obtenidos bajo distintas condiciones metodológicas y operativas.

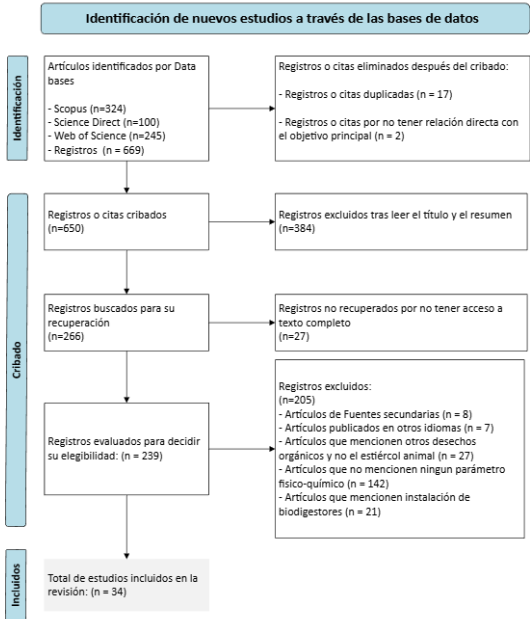


Fig. 1
Diagrama de flujo PRISMA en tres niveles para el presente estudio

III. RESULTADOS

A. Descripción geográfica

La revisión sistemática evidencia una distribución geográfica heterogénea de la producción científica sobre biogás a partir de estiércol animal entre 2020 y 2025, lo que refleja diferencias regionales en la disponibilidad de residuos ganaderos, el desarrollo del sector agropecuario y la implementación de políticas de energías renovables. Brasil y China concentran el mayor número de estudios, situación asociada al tamaño de sus sistemas productivos y a estrategias nacionales orientadas a la valorización energética de residuos orgánicos. Un segundo grupo de países, conformado por Nigeria, España y Alemania, muestra un interés sostenido en la digestión anaerobia como alternativa para la gestión ambiental y la generación de energía descentralizada. Asimismo, naciones como Ucrania, Egipto, Rumania, Arabia Saudita, Lituania y Portugal presentan una participación moderada, vinculada a procesos de modernización agrícola y diversificación de sus matrices energéticas. En contraste, la menor contribución de países como Marruecos, Canadá y Vietnam sugiere limitaciones en el financiamiento de la investigación o una priorización de otras fuentes de energía renovable. Esta distribución geográfica pone de manifiesto

que el conocimiento disponible se concentra en regiones específicas, lo que puede influir en la variabilidad de condiciones operativas y tipos de estiércol analizados. En consecuencia, los resultados de la presente revisión deben interpretarse considerando estos sesgos regionales, así como la necesidad de ampliar la investigación en contextos productivos aún poco representados.

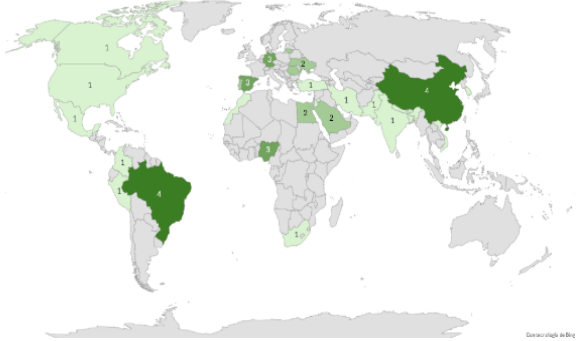


Fig. 2 Número de artículos según año de publicación basada en las fuentes de: Scopus, Science Direct y Web of Science (2020 - 2025)

B. Evolución temporal de las investigaciones

El análisis temporal de las publicaciones incluidas en la revisión muestra una tendencia creciente en la investigación sobre la producción de biogás a partir de estiércol animal durante el período 2020–2025 (Figura 3), lo que refleja un interés sostenido en la digestión anaerobia como alternativa para la gestión de residuos ganaderos y la generación de energía renovable.

Las bases de datos Scopus, ScienceDirect y Web of Science presentan comportamientos consistentes, evidenciando la consolidación progresiva del tema como línea de investigación relevante. Esta evolución confirma que el biogás obtenido a partir de estiércol animal constituye un campo en expansión, impulsado por la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles y la valorización de residuos orgánicos.

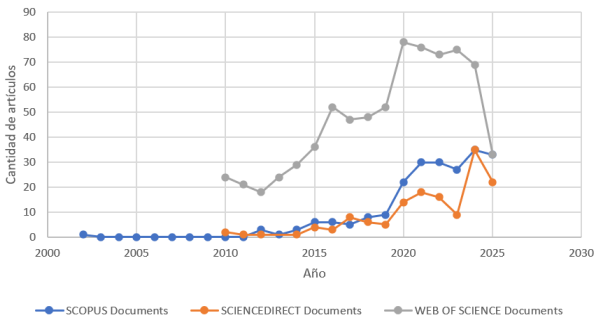


Fig. 3 Temporalidad de los artículos de investigación según las bases de datos Scopus, ScienceDirect y Web of Science

C. Red de co-ocurrencia de palabras claves

El análisis bibliométrico de las palabras clave permite identificar la estructura conceptual que ha orientado la investigación sobre la producción de biogás a partir de estiércol animal durante el periodo analizado. De un total de 1887 términos identificados, 240 cumplieron el umbral mínimo de frecuencia y fueron utilizados para la construcción del mapa bibliométrico mediante VOSviewer, dando lugar a 197 ítems organizados en nueve clústeres, interconectados por 5202 enlaces y con una fuerza total de enlace de 14 005. Esta elevada densidad de interconexiones evidencia un campo de investigación consolidado y en expansión, caracterizado por una fuerte interrelación conceptual [9].

La proximidad y agrupación de los nodos reflejan afinidades temáticas y permiten identificar núcleos de investigación predominantes [10]. El clúster rojo, el de mayor tamaño, agrupa los estudios centrados en la producción de biogás y la digestión anaerobia, destacándose términos como *biogas*, *anaerobic digestion*, *manure*, *biomass* y *renewable energy*. El clúster azul reúne investigaciones orientadas a los aspectos microbiológicos, químicos y operativos del proceso, con palabras clave como *microorganisms*, *methane production*, *process optimization* y *chemistry*. El clúster verde se enfoca en la co-digestión anaerobia y la optimización del rendimiento energético, integrando términos como *anaerobic co-digestion*, *organic waste* y *methane yield*. Finalmente, el clúster amarillo, el de menor tamaño, concentra estudios relacionados con el aprovechamiento del digestato, la recuperación de nutrientes y los impactos ambientales, destacándose palabras clave como *fertilizer*, *soil* y *nutrient management*, tal como se presenta en la Figura 4.

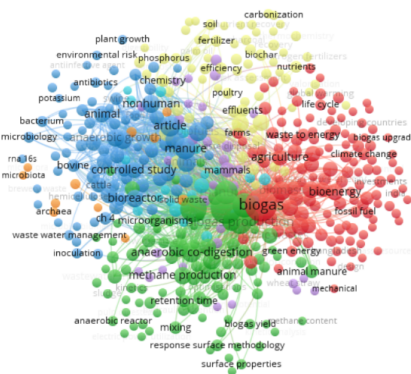


Fig. 4 Red de co-ocurrencia de palabras claves de Scopus

D. Red de co-autores de la base de datos de Scopus

El análisis de la colaboración científica permite caracterizar la dinámica de coautoría en los estudios sobre biogás producido a partir de estiércol animal. A partir de los registros de Scopus se identificaron 1575 autores, aunque la actividad colaborativa se concentra en un núcleo central de 30

investigadores que conforman el grupo más interconectado del campo. La red de coautoría presenta cuatro clústeres y 127 vínculos, lo que evidencia un nivel relevante de cooperación científica y una comunidad académica en proceso de consolidación [11].

La organización de los clústeres refleja la existencia de grupos de investigación con líneas temáticas complementarias, conectados mediante relaciones de coautoría que favorecen el desarrollo interdisciplinario. Como se observa en la Figura 5, el primer clúster (rojo), liderado por Faissal Aziz y M. Imran Khan, se orienta a la optimización de la producción de biogás. El segundo clúster (verde), con Joanna Majtacz y Tonni Agustiono Kurniawan, se centra en la valorización energética de residuos, mientras que los clústeres azul y amarillo abordan la comparación de sustratos y la modelización de procesos biotecnológicos. En conjunto, la red evidencia una comunidad diversa e interconectada que favorece la circulación del conocimiento y el desarrollo de soluciones sostenibles [9], [10].

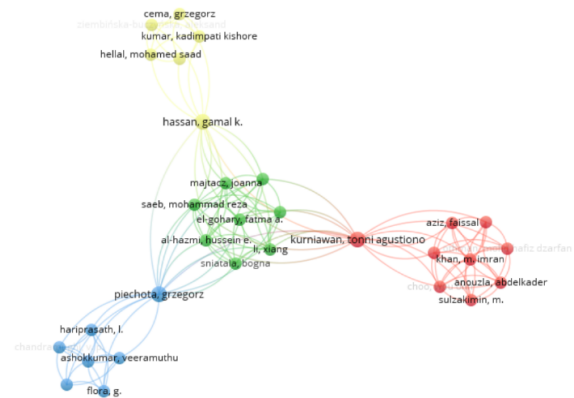


Fig. 5 Red de co-autores de la base de datos Scopus

E. Factores fisicoquímicos del estiércol animal determinantes en la generación de biogás

Las características fisicoquímicas del estiércol animal influyen de manera directa en la eficiencia del proceso de digestión anaerobia, al condicionar la actividad microbiana, la estabilidad del sistema y la disponibilidad de materia orgánica biodegradable. En este contexto, el contenido de humedad, la fracción de sólidos y la composición mineral del sustrato determinan el comportamiento del proceso y el potencial de generación de biogás [4], [8].

Con base en la evidencia disponible, el estiércol caprino exhibe una mayor densidad (1050 kg/m^3) y un menor contenido de humedad (79 %), lo que se traduce en una mayor concentración de sólidos totales y, consecuentemente, en un potencial energético superior. No obstante, estas características requieren un control adecuado de la carga orgánica para evitar efectos inhibitorios durante el proceso de digestión anaerobia [12].

Las diferencias en las propiedades fisicoquímicas también se manifiestan en los parámetros energéticos y minerales de los distintos tipos de estiércol. El estiércol bovino se distingue por presentar elevados valores de energía de combustión y energía de desvolatilización ($15.1 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ y $93.7 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, respectivamente), indicativos de una fracción orgánica altamente disponible para la metanogénesis [13], [14]. Por su parte, el estiércol porcino presenta una biodegradabilidad favorable y una composición relativamente equilibrada de macronutrientes, lo que favorece su desempeño como sustrato

en procesos anaerobios [15]. En contraste, el estiércol aviar, pese a su elevado contenido de potasio, calcio y fósforo, presenta mayores concentraciones de nitrógeno, lo que puede favorecer procesos de inhibición por amoníaco si no se gestiona adecuadamente [16]. Desde un enfoque integrado, estas diferencias fisicoquímicas y energéticas, resumidas en la Tabla I, confirman que los estiércoles bovino, porcino y aviar, particularmente bajo esquemas de co-digestión, permiten optimizar la relación C/N y mejorar la estabilidad y eficiencia del proceso metanogénico [17], [18].

TABLA I
CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL ESTIÉRCOL ANIMAL

TIPO DE ESTIÉRCOL	<i>H</i> (%)	<i>D</i> (kg/m ³)	<i>E c</i> (kJ mol ⁻¹)	<i>E d</i> (kJ mol ⁻¹)	<i>K</i> (%)	<i>Na</i> (%)	<i>Mg</i> (%)	<i>Ca</i> (%)	<i>P</i> (%)	REFERENCIAS
BOVINO	75	1020	15	23.5	0.85	0.28	0.31	1.25	0.42	[4]
	68.1	980	15.1	93.7	1.58	0.24	0.35	1.22	0.47	[8]
	68.7	970	15	92.8	1.45	0.25	0.31	1.18	0.48	[16]
PORCINO	78	1010	13.8	21.9	0.7	0.27	0.2	1.05	0.38	[4]
	82	980	-	-	0.85	0.17	0.24	1.11	0.98	[15]
	70.2	975	15.4	94.5	1.49	0.28	0.32	1.16	0.5	[19]
	72.4	950	14.8	92.3	1.42	0.27	0.31	1.1	0.42	[8]
AVIAR	70	980	16.2	24.8	0.95	0.25	0.4	1.4	0.55	[4]
	63.5	970	14.2	89.6	1.63	0.29	0.4	1.35	0.56	[8]
	61.2	965	14.1	88.9	1.69	0.3	0.38	1.3	0.58	[16]
	77.5	-	-	-	1.15	0.32	0.41	1.26	1.13	[14]
VACUNO	-	-	14.9	21.5	0.91	0.44	0.5	2.82	0.25	[18]
	75	960	14.5	91.2	1.38	0.26	0.34	1.11	0.45	[12]
CAPRINO	79.4	1050	14.2	22.3	0.78	0.32	0.24	1.1	0.45	[13]

H % [porcentaje de humedad], *D* kg/m³ [densidad], *E c* kJ mol⁻¹ [Energía de combustión], *E d* kJ mol⁻¹ [Energía desvolatilización]

E. Relación carbono nitrógeno (C/N)

La relación carbono/nitrógeno (C/N) constituye uno de los parámetros más determinantes para la estabilidad y eficiencia del proceso de digestión anaerobia, al reflejar la influencia directa de la composición elemental del estiércol sobre la actividad microbiana. En los estudios revisados, el contenido de carbono se situó mayoritariamente entre 35 % y 45 %, mientras que el nitrógeno osciló entre 1 % y 4 %, dando lugar a relaciones C/N comprendidas entre 15 y 30, intervalo considerado óptimo para favorecer la actividad metanogénica.

Valores fuera de este rango, inferiores a 10 o superiores a 35, se asociaron a inestabilidades del proceso, ya sea por acumulación de amoníaco inhibitorio en condiciones de exceso de nitrógeno o por limitaciones nutricionales cuando este resulta deficitario [8]. Adicionalmente, se reportaron contenidos de cenizas entre 10 % y 30 % y concentraciones de sólidos totales comprendidas entre 150 y 300 g/kg [27], lo que evidencia una variabilidad composicional vinculada a condiciones de manejo y diferencias geográficas entre regiones productivas.

Desde esta perspectiva, la Figura 6 permite visualizar

comparativamente la relación C/N promedio de los estiércoles según la categoría animal. El estiércol equino presenta la relación C/N más elevada (25.45), ubicándose ligeramente por encima del rango óptimo y sugiriendo una mayor proporción de carbono disponible [8], aunque con menor aporte de nitrógeno. En contraste, los estiércoles porcino y aviar muestran relaciones C/N inferiores a 15, lo que indica un mayor contenido de nitrógeno y un riesgo potencial de inhibición por amonio si se emplean sin ajustes operativos adecuados [20], [21]. Los estiércoles bovino y caprino se sitúan en valores intermedios (16–22), próximos al rango ideal, favoreciendo un proceso más equilibrado.

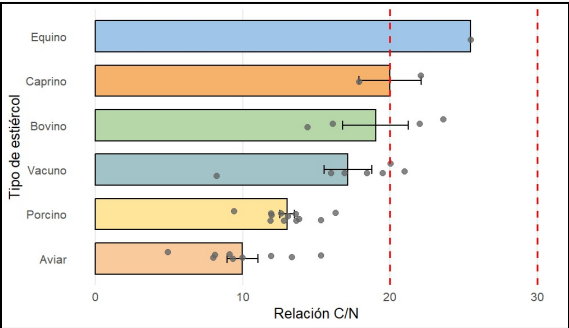


Fig. 6 Relación carbono / nitrógeno por tipo de estiércol

F. Calidad del biogás derivado del estiércol animal

Los resultados de la Tabla 2 muestran una amplia producción de biogás a partir de estiércol animal, presenta variaciones significativas en función del tipo de sustrato y de sus características fisicoquímicas, lo que se traduce en

diferencias tanto en el volumen generado como en su aprovechamiento energético.

En los estudios analizados, los rendimientos de biogás y de metano mostraron una amplia variabilidad asociada a la composición orgánica del estiércol y a las condiciones operativas del proceso. Los estiércoles aviar y caprino se posicionan entre los sustratos con mayor capacidad de generación de biogás, alcanzando producciones de metano elevadas (0.49 m³ / kg Vs y 0.51 m³ / kg Vs), y concentraciones de CH₄ comúnmente situadas entre 41% y 79.46%, lo que se refleja en potenciales energéticos del orden de 4.7 a 6.5 kWh/m³ [17], [30].

En este contexto, la Tabla 3 muestra que el estiércol aviar presenta una mayor dispersión en los valores de producción, con concentraciones de metano que oscilan entre 41% y 70%, asociadas a su elevado contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable [30]. No obstante, su alto contenido de nitrógeno puede limitar la cantidad efectiva de biogás producido debido a fenómenos de inhibición amoniacal si no se aplican estrategias de control. Adicionalmente, la presencia de gases traza como H₂S y NH₃ influye indirectamente en el aprovechamiento del biogás generado, ya que concentraciones elevadas requieren procesos de purificación que pueden afectar la eficiencia global del sistema [23]. En términos energéticos, los sistemas que alcanzan concentraciones de CH₄ superiores al 65% logran valores de 5.5 a 7.9 kWh/m³, mientras que aquellos con menores concentraciones presentan rendimientos inferiores a 4 kWh/m³ [24]. Los resultados confirman que la co-digestión de estiércoles bovino, porcino y aviar permite incrementar la cantidad de biogás y metano producido, al optimizar la relación C/N y reducir los efectos inhibitorios, consolidándose como una estrategia clave para maximizar el rendimiento energético del proceso [25].

Tabla II
Calidad del biogás obtenido a partir del estiércol animal

TIPO DE ESTIÉRCOL	COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS			PRODUCCIÓN DE CH4 (m³ / kg VS)	POTENCIAL ENERGÉTICO(kWh/m³)	REFERENCIAS
	CH4 (%)	CO2 (%)	Otros gases (%)			
BOVINO	60	35	H2S <1%	0.28	4.7	[4]
	68 - 70	30 -32	H2S < 0.5%	0.31	4.8	[26]
	60 -75	35 - 40	H2S < 1%	0.29	4.7	[20]
	62.1	36.7	(H2S, N2, O2) 1.2	0.26	6.3	[8]
	55.5	44	0.5	0.14	6	[21]
	76.9	23.1	H2S < 0.5%, NH3 < 1%	0.22	-	[27]
	55-60	35 - 40	-	0.12	-	[22]
	55	40	H2S ≈ 0.5%	0.26	4.7	[4]
	55 - 60	35 - 41	H2S ≈ 1%	0.27	4.7	[20]

PORCINO	60.4	38.5	1.1	0.28	6.5	[21]
	65	35	-	0.23	-	[18]
	63.9	32	4	0.37	7	[6]
	55.2	44.8	-	0.22	5.49	[17]
	65.95	32.91	H ₂ = 0.12	0.27	6.6	[2]
	68	32	H ₂ S = 0.02	0.29	1.2	[15]
	41.74	-	-	0.24	1.2	[28]
	75.6	24.4	H ₂ S = 0.1	0.23	1	[29]
AVIAR	65	30	H ₂ S = 0.0	0.31	4.8	[4]
	70	30	H ₂ S < 0.5	0.31	4.8	[20]
	54.8	43.9	1.3	0.21	5.5	[21]
	61.5	38	0.5	0.31	-	[30]
	55	44	1	0.36	-	[5]
	79.46	19.16	H ₂ = 1.36	0.27	7.9	[2]
	41	59	H ₂ S = 0.02	0.16	4.07	[17]
	65	35	-	0.51	6.5	[30]
	61	39	-	0.33	1	[14]
VACUNO	59.84	29.8	H ₂ = 7.35	0.11	-	[19]
	55	40	5	0.30	6	[6]
	56.6	43.4	-	0.22	5.62	[17]
	54	45.03	H ₂ = 0.94	0.23	5.4	[2]
	57.3	42.7	-	0.18	5.7	[24]
	58.2	41.8	-	0.17	-	[31]
EQUINO	35.9	64.1	-	0.14	3.57	[13]
CAPRINO	58.53	41.47	-	0.49	4.7	[17]
VACUNO + PORCINO + AVIAR	62	35	-	0.28	0.9	[32]
	79.46	-	-	0.31	1.3	[2]
	65	35	-	0.30	1	[3]
AVIAR + VACUNO	37	-	-	0.34	1.1	[33]
BOVINO + CAPRINO	53.7	46.3	-	0.17	5.8	[27]

G. Rendimiento del biogás

El rendimiento del biogás es un indicador clave de la eficiencia de la digestión anaerobia, ya que depende tanto del tipo de estiércol como de las condiciones de operación. En general, los estiércoles bovino y porcino presentan rendimientos entre 0.17 y 0.907 m³/kg, valores acordes con su elevada biodegradabilidad y una composición orgánica relativamente equilibrada. Estos rendimientos se asocian a relaciones C/N adecuadas y a una alta fracción de sólidos volátiles, lo que favorece la conversión anaerobia en condiciones mesofílicas y termofílicas [27], [34].

Asimismo el estiércol aviar muestra también una variabilidad, con rendimientos que oscilan entre 0.002 y 0.33 m³/kg, reflejando tanto su alto potencial energético como su susceptibilidad a la inhibición por amoníaco cuando la carga de nitrógeno no se controla. El estiércol caprino presenta los rendimientos más bajos, generalmente entre 0.05 y 0.14 m³/kg SV, lo que se atribuye a su mayor contenido fibroso y a concentraciones elevadas de sólidos totales. Asimismo, las condiciones operativas influyen de forma directa en el rendimiento, destacando temperaturas de 30–40 °C, el uso de digestores tipo CSTR o en lote, y la co-digestión, que permite alcanzar valores de 0.40 a 0.90 m³/kg SV al combinar distintos tipos de estiércol [28], [35], [36].

TABLA III
RENDIMIENTO DE BIOGÁS SEGÚN TIPO DE ESTIÉRCOL

TIPO DE ESTIÉRCOL	VOLUMEN BIOGÁS PRODUCIDO (m ³ /kg)	RENDIMIENTO DE METANO (m ³ /kg)	REFERENCIAS
BOVINO	0.32	0.18	[4]
	0.32	0.18	[4]
	0.35	0.22	[26]
	0.33	0.18	[20]
PORCINO	0.28	0.2	[4]
	0.31	0.17	[20]
	0.0546	0.37	[6]
	0.46	0.3	[2]
	0.29	0.2	[15]
	0.0764	0.0445	[28]
	1.2	0.907	[29]
AVIAR	0.593	0.002	[37]
	0.42	0.29	[4]

	0.42	0.29	[20]
	0.41	0.32	[2]
	0.33	0.2	[14]
	0.506	0.33	[30]
VACUNO	0.26	0.15	[31]
	0.0443	0.3	[6]
	0.25	0.14	[2]
PORCINO + AVIAR	0.435	0.008	[37]
	0.445	0.015	[37]
	0.355	0.023	[37]
	0.4	0.041	[37]
PORCINO + VACUNO	0.38	0.25	[26]
	0.04	0.024	[42]
VACUNO + PORCINO + AVIAR	0.28	0.17	[32]
	0.31	0.2	[2]
	0.3	0.195	[3]

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de la presente revisión sugieren que la relación C/N del estiércol animal suele situarse fuera del rango óptimo cuando se emplea como sustrato único, lo que compromete la estabilidad del proceso de digestión anaerobia y favorece fenómenos de inhibición por amoníaco, particularmente en estiércoles con elevado contenido de nitrógeno [38]. En este contexto, la co-digestión con materiales ricos en carbono se consolida como una estrategia eficaz para mejorar el equilibrio estequiométrico del sistema y optimizar la producción de metano, en concordancia con lo reportado por diversos autores [33], [39], [40]. En relación con la calidad del biogás, los valores de metano reportados se alinean con los rangos descritos en la literatura, lo que confirma la viabilidad energética del proceso [26], [31]. No obstante, la escasa atención al aprovechamiento del dióxido de carbono generado evidencia un vacío tecnológico relevante y una oportunidad para futuras investigaciones orientadas a esquemas de bioeconomía circular [41], [42].

La variabilidad observada en los rendimientos de producción de biogás pone de manifiesto la falta de estandarización metodológica entre los estudios analizados. Las diferencias en los parámetros operativos, así como en

los criterios de reporte, dificultan la comparación de resultados y limitan su potencial de escalabilidad, tal como ha sido señalado en evaluaciones comparativas previas [29]. En este sentido, se evidencia la conveniencia de avanzar hacia el desarrollo de protocolos técnicos comunes que contribuyan a fortalecer la comparabilidad de los estudios y faciliten la transferencia de los resultados a distintos contextos productivos.

Asimismo, es fundamental considerar el papel de las comunidades microbianas en la digestión anaerobia, especialmente en estiércol animal, que contiene una alta diversidad de microorganismos. Estos consorcios participan en la degradación de la materia orgánica y la producción de metano, y su actividad depende de factores como la relación C/N, el pH, la temperatura y la carga orgánica, lo que explica la variabilidad en los rendimientos de biogás. Además, el estiércol actúa como inóculo microbiano, aunque desequilibrios operativos pueden afectar la eficiencia del proceso [17], [18].

VI. CONCLUSIONES

A partir de la revisión sistemática realizada, se concluye que la producción de biogás a partir del estiércol animal representa una alternativa tecnológica viable desde una perspectiva global, con implicancias relevantes en la gestión ambiental de residuos, la valorización energética y la transición hacia modelos de economía circular en el sector agropecuario. No obstante, la ausencia de criterios metodológicos estandarizados limita la comparabilidad y escalabilidad de los procesos reportados, evidenciando la necesidad de enfoques más homogéneos en futuras investigaciones.

En relación con la influencia de la relación carbono/nitrógeno (C/N), se evidenció que los estiércoles animales utilizados como sustrato único tienden a presentar valores fuera del rango óptimo, especialmente en estiércoles aviar y porcino debido a su elevado contenido de nitrógeno. Esta condición incrementa el riesgo de inhibición por amoníaco y compromete la estabilidad del proceso, confirmando la co-digestión como una estrategia clave para optimizar el equilibrio nutricional y la eficiencia metanogénica.

Respecto a la calidad del biogás, los estudios analizados reportan fracciones de metano acordes con los rangos típicos para estiércoles animales, lo que confirma un adecuado desempeño microbiológico del proceso. Sin embargo, la elevada proporción de dióxido de carbono y la presencia de gases traza ponen de manifiesto la necesidad de incorporar etapas de depuración y de profundizar en el aprovechamiento del CO₂, aspecto aún escasamente abordado en la literatura.

Finalmente, en cuanto al rendimiento de producción de biogás, los estiércoles bovino y porcino presentan valores

consistentes y competitivos, mientras que el estiércol aviar muestra una mayor variabilidad asociada a su alta carga nitrogenada. Estos resultados confirman que tanto el tipo de estiércol como las condiciones operativas influyen de manera determinante en la eficiencia del proceso, reforzando la relevancia de estrategias de co-digestión para maximizar el rendimiento energético.

REFERENCIAS

- [1] J. Hickmann, C. Watson, and Y. Zhang, "Impact of lowering nitrogen content in pig manure through low crude protein diets on anaerobic digestion process stability, biogas yields, and digestate composition," *Science of the Total Environment*, vol. 953, p. 175957, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175957.
- [2] M. Fernandes, T. Pereira, and L. Sousa, "Biogas and biomethane production potential via anaerobic digestion of manure: A case study of Portugal," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, p. 113846, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113846.
- [3] A. Mitroi, L. Popescu, and I. Toma, "Zootechnical waste as raw material for biogas production and as fertilizer for agriculture," *Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering*, vol. XIII, 2024. [Online]. Available: <https://landreclamationjournal.usamv.ro/index.php/scientific-papers/22/articles-2024/670-zootechnical-waste-as-raw-material-for-biogas-production-and-as-fertilizer-for-agriculture>
- [4] I. Bondar, N. Dmychuk, and S. Kravets, "Influence of the type of livestock by-products on biogas yield and composition," *Animal Science and Food Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 55–73, 2025, doi: 10.31548/animal.1.2025.55.
- [5] U. Kreidenweis, T. Schmidt, and J. Beier, "Greenhouse gas emissions from broiler manure treatment options are lowest in well-managed biogas production," *Journal of Cleaner Production*, vol. 280, pt. 2, p. 124969, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124969.
- [6] J. Jo, D. Lee, and S. Kim, "Enhanced anaerobic co-digestion of cattle manure with food waste and pig manure: Statistical optimization of pretreatment condition and substrate mixture ratio," *Waste Management*, vol. 183, pp. 32–41, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2024.04.043.
- [7] Genderson, "Análisis de PRISMA como metodología para revisión sistemática: Una aproximación general," *Revista*, vol. 8, suppl. 1, pp. 339–360, 2022, doi: 10.18310/2446-4813.2022v8nsup1p339-360.
- [8] M. Muñoz, D. García, and C. Ruiz, "Determining biomethane potential from animal-source industry wastes by anaerobic digestion: A case study from La Rioja, Spain," *Renewable Energy*, vol. 235, p. 121175, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.121175.
- [9] M. Chen, N. El Gharbi, and R. Bouhlila, "Energy balance assessment on chicken manure for biogas production in Rabat-Sale-Zemmour-Zair of Morocco," *Journal of Environmental Management*, vol. 299, p. 113656, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113656.
- [10] G. Paolone, A. Piazza, F. Pilotti, R. Paesani, J. Camplone, and P. Di Felice, "A map of the research about lighting systems in the 1995–2024 time frame," *Computers*, vol. 14, no. 8, p. 313, 2025, doi: 10.3390/computers14080313.
- [11] M. Aria and C. Cuccurullo, "Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis," *Journal of Informetrics*, vol. 11, no. 4, pp. 959–975, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007.
- [12] M. Alkhirsat, "The impact of organic loading on the anaerobic digestion of cow manure: Methane production and kinetic analysis," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, p. 100589, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.csee.2023.100589.
- [13] O. Amos, A. Adeoye, and M. Abiola, "Effect of hydraulic retention time and substrate-to-inoculum ratio on batch anaerobic digestion of goat manure and response surface methodology optimization,"

- European Journal of Sustainable Development Research*, vol. 9, no. 3, p. em0295, 2025, doi: 10.29333/ejosdr/16337.
- [14] M. Jasinska, J. Gómez, and P. Fernández, "Energy recovery from poultry manure in the process of semi-continuous anaerobic co-digestion with sewage sludge," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 3969–3981, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.09.047.
 - [15] C. Pineiro, A. Silva, and P. Oliveira, "Energy efficiency of a micro-generation unit of electricity from biogas of swine manure," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.083.
 - [16] A. Afifi, H. El-Sayed, and A. Mahmoud, "Optimization of the biofuel production by idealized fermentation of the animal manure, chicken wastes, and sewage sludge," *Polish Journal of Chemical Technology*, vol. 26, no. 2, pp. 48–56, 2024, doi: 10.2478/pjct-2024-0018.
 - [17] A. Mutungwazi, B. Moyo, and N. Ndlovu, "Comparative functional microbiome profiling of various animal manures during their anaerobic digestion in biogas production processes," *Biomass and Bioenergy*, vol. 170, p. 106728, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.biombioe.2023.106728.
 - [18] C. Liu, H. Zhang, and S. Li, "Effects of continuous low-speed biogas agitation on anaerobic digestion of high-solids pig manure: Performance and microbial community," *Journal of Environmental Management*, vol. 354, p. 120355, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120355.
 - [19] J. Marin-Batista, A. González, and S. Lira, "Energy valorization of cow manure by hydrothermal carbonization and anaerobic digestion," *Renewable Energy*, vol. 160, pp. 623–632, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.07.003.
 - [20] N. Dmychuk, S. Kravets, and I. Bondar, "Bioconversion of livestock by-products into biogas: Experimental study of optimal fermentation conditions," *Scientific Horizons*, vol. 28, no. 3, pp. 80–89, 2025, doi: 10.48077/scihor3.2025.80.
 - [21] Z. Dong, L. Xu, and C. Li, "Biogas and nutrient recovery potential: A spatially explicit analysis of China's county-level livestock and poultry manure," *Waste Management*, vol. 204, p. 114906, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.wasman.2025.114906.
 - [22] R. Gosgot, D. Medina, and V. Rojas, "Influence of molasses and *Caesalpinia spinosa* meal inoculums on biogas production from cattle manure," *Fermentation*, vol. 10, no. 9, p. 452, 2024, doi: 10.3390/fermentation10090452.
 - [23] E. Oguz and Y. Oguz, "Determining the biogas potential from animal manure in Canakkale and creating an electricity generation capacity map," 2025.
 - [24] K. Rani, N. Sharma, and P. Singh, "Co-digestion of wheat straw and animal manure pretreated with calcium hydroxide for biomethane production: Kinetic study," *Research Square*, 2022, doi: 10.21203/rs.3.rs-1333768/v1.
 - [25] F. Castro, R. Santos, and L. Oliveira, "Energy conversion of biogas from livestock manure to electricity energy using a Stirling engine," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 15, p. 100224, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100224.
 - [26] A. Alkathami, F. Alharbi, and R. Alzahrani, "Development and performance analysis of a biogas reactor using livestock manure," *Sci. Tech. Energ. Transition*, vol. 80, p. 47, 2025, doi: 10.2516/stet/2025027.
 - [27] L. Brito, J. Pineda, and D. Martínez, "Evaluación de la codigestión de excretas bovinas y caprinas para la generación de biogás mediante un biodigestor tubular en Valledupar, Cesar," *Results in Engineering*, vol. 27, p. 106588, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.106588.
 - [28] A. Ejigboye, A. Olayemi, and A. Oseni, "Anaerobic digestion of *Gliricidia sepium* inoculated with pig dung using a portable bio-digester for process optimization," *Results in Engineering*, vol. 25, p. 103550, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103550.
 - [29] E. Ramirez-Islas, M. López, and C. Vázquez, "Environmental assessment of energy production from anaerobic digestion of pig manure at medium-scale using life cycle assessment," *Waste Management*, vol. 102, pp. 85–96, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2019.10.012.
 - [30] M. Jurgutis, R. Paulauskas, and K. Venslauskas, "Biogas production from chicken manure at different organic loading rates in a mesophilic full scale anaerobic digestion plant," *Biomass and Bioenergy*, vol. 141, p. 105693, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105693.
 - [31] M. Allah, X. Chen, and Y. Liu, "Methane production enhancement of a family-scale biogas digester using cattle manure and corn stover under cold climates," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 45, p. 101163, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101163.
 - [32] X. Wang, Y. Zhang, and J. Chen, "Biogas energy generated from livestock manure in China: Current situation and future trends," *Journal of Environmental Management*, vol. 297, p. 113324, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113324.
 - [33] A. Bist, R. Bhattarai, and R. Aryal, "Poultry slaughterhouse waste management through anaerobic digestion with varying proportions of chicken litter," *Environmental Challenges*, vol. 17, p. 101035, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.envc.2024.101035.
 - [34] P. de M. Lima, M. Edström, H. Aronsson, Å. Nordberg, and E. Sindhøj, "Comparative analysis of manure treatment scenarios on climate change and eutrophication in the Baltic Sea," *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 212, p. 108017, 2025, doi: 10.1016/j.resconrec.2024.108017.
 - [35] H. Cu, D. Tran, and V. Le, "Biogas production from Vietnamese animal manure, plant residues and organic waste: Influence of biomass composition on methane yield," *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, vol. 28, no. 2, pp. 280–289, 2015, doi: 10.5713/ajas.14.0312.
 - [36] A. Ameen, M. Alkhulaifi, and A. Alotaibi, "Co-digestion of microbial biomass with animal manure in three-stage anaerobic digestion," *Fuel*, vol. 306, p. 121746, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121746.
 - [37] F. Somer, P. Rodrigues, and G. Santos, "Assessment of co-digestion of poultry litter and swine wastewater: The effect of enriched inoculum on biogas production," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 100, no. 9, pp. 1863–1872, 2025, doi: 10.1002/jctb.7921.
 - [38] C. Halmaciu, A. Duma, and A. Ciobanu, "Novel specifications regarding biogas production from agriengineering activities in Romania," *AgriEngineering*, vol. 6, no. 4, pp. 3602–3617, 2024, doi: 10.3390/agriengineering6040205.
 - [39] M. Khaliq, H. Younas, M. Sharif, S. Hussain, U. Younas, M. Sajid, Qudratullah, M. F. Khan, M. Usman, and Q. Ullah, "Comparative analysis of biogas production efficiency from anaerobic digestion of cow dung and mixed dung substrates," *Sarhad Journal of Agriculture*, vol. 41, no. 2, pp. 881–893, 2025, doi: 10.17582/journal.sja/2025/41.2.881.893.
 - [40] M. Mohammadianroshanfekr, M. Pazoki, M. B. Pejman, R. Ghasemzadeh, and A. Pazoki, "Kinetic modeling and optimization of biogas production from food waste and cow manure co-digestion," *Results in Engineering*, vol. 24, p. 103477, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103477.
 - [41] J. Prado, E. López, and L. Martínez, "Pig slurry valorization by ammonia recovery, biogas upgrading and microbial protein production," *Bioresource Technology*, vol. 434, p. 132710, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.biortech.2025.132710.
 - [42] R. Pinto, J. Souza, and G. Menezes, "STUDY OF THE ANAEROBIC CO-DIGESTION OF BOVINE AND SWINE MANURE: TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY ANALYSIS," *CLEANER WASTE SYSTEMS*, vol. 5, p. 100097, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.clwas.2023.100097.