

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

<https://doi.org/10.35381/a.g.v8i15.5266>

Uso de tecnologías sostenibles en la producción bovina: perspectiva ambiental y de economía circular

Use of sustainable technologies in beef production: an environmental and circular economy perspective

Magdiel de Jesús Salas-Barleta

magdielsalasbarletta@gmail.com

Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Cesar
Colombia

<https://orcid.org/0009-0005-3986-9277>

Camilo Andrés García-Pérez

camiloagarcia2391@gmail.com

Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Cesar
Colombia

<https://orcid.org/0009-0004-1365-473X>

Jinette Gabriela Labrador-Fernández

jinettelabrador@gmail.com

Universidad del Zulia, Maracaibo, Zulia
Venezuela

<https://orcid.org/0000-0002-9475-6524>

Josía Jeseff Isea-Argüelles

ui.josiaia82@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ibarra, Imbabura
Ecuador

<https://orcid.org/0000-0001-8921-6446>

Recepción: 15 de junio 2026

Revisado: 26 de agosto 2026

Aprobación: 15 de septiembre 2026

Publicado: 05 de octubre 2026

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

RESUMEN

La producción bovina enfrenta cuestionamientos por su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero y a la generación de residuos. El objetivo fue analizar los avances del período 2021-2025 sobre el uso de tecnologías sostenibles en la producción bovina, desde una perspectiva que vincule la reducción de gases contaminantes y la economía circular. Se realizó una revisión descriptiva en fuentes académicas y técnicas, de la que se seleccionaron veintiocho artículos organizados en cuatro ejes: tecnologías sostenibles, economía circular, perspectiva ambiental y factores de adopción. Los biodigestores, el compostaje, los sistemas silvopastoriles y las dietas específicas contribuyen simultáneamente a mitigar emisiones y aprovechar residuos. Las divergencias radican en el énfasis en nutrición animal o gestión del estiércol. Se concluye que la economía circular en la ganadería bovina es viable, aunque requiere estudios longitudinales y de costo-beneficio, políticas públicas coherentes y mecanismos de adopción para pequeños productores.

Descriptor: Ganado bovino; economía circular; gases de efecto invernadero; cambio climático; biogás. (Tesauro AGROVOC).

ABSTRACT

Beef production faces criticism for its contribution to greenhouse gas emissions and waste generation. The objective was to analyze advances from 2021 to 2025 in the use of sustainable technologies in beef production, from a perspective that links the reduction of polluting gases and the circular economy. A descriptive review of academic and technical sources was carried out, from which twenty-eight articles were selected and organized into four axes: sustainable technologies, circular economy, environmental perspective, and adoption factors. Biodigesters, composting, silvopastoral systems, and specific diets simultaneously contribute to mitigating emissions and utilizing waste. Divergences lie in the emphasis on animal nutrition or manure management. It is concluded that the circular economy in cattle farming is viable, although it requires longitudinal and cost-benefit studies, coherent public policies, and adoption mechanisms for small producers.

Descriptors: Cattle; circular economy; greenhouse gases; climate change; biogas. (AGROVOC Thesaurus).

INTRODUCCIÓN

La producción bovina constituye uno de los sectores más relevantes dentro de la agropecuaria, no solo por su papel en la seguridad alimentaria y en la economía rural, sino también por los desafíos ambientales que plantea. Diversos estudios han documentado que la ganadería es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O), lo cual contribuye de manera significativa al cambio climático global (Nugrahaeningtyas et al., 2024). A esta problemática se suman los altos volúmenes de residuos orgánicos derivados de la actividad bovina, cuyo manejo inadecuado genera impactos negativos sobre el suelo, el agua y la salud humana (Ordoñez et al., 2023).

Ante este panorama, el uso de tecnologías sostenibles ha cobrado creciente importancia en la búsqueda de alternativas que permitan reducir las emisiones y, a la vez, aprovechar los subproductos de la actividad ganadera. Estrategias como los biodigestores, los sistemas silvopastoriles, la suplementación alimentaria y el compostaje del estiércol, han mostrado potencial para disminuir la huella ambiental de la ganadería y fomentar la reutilización de recursos en el marco de una economía circular (Congio et al., 2021; Del Angel-Lozano et al., 2023). De este modo, la producción bovina se posiciona como un escenario clave para integrar innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y eficiencia productiva.

A nivel internacional, la sostenibilidad de la ganadería bovina se ha vuelto prioritaria en las agendas climáticas y en las vinculadas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible: para cumplir la meta de limitar el calentamiento a $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, el metano de origen agropecuario debería reducirse entre 11 % y 30 % hacia 2030 respecto de 2010, lo que exige impulsar modelos productivos más responsables (Arndt et al., 2022). En países de América Latina, donde la ganadería representa un sector estratégico, se han efectuado iniciativas de sistemas silvopastoriles, biodigestores y prácticas de manejo de estiércol con resultados

alentadores, aunque aún persisten limitaciones en escalabilidad y adopción tecnológica (Villarroel-Schneider et al., 2022; Chamorro-Vargas et al., 2025).

En el contexto colombiano, estudios recientes han evidenciado que, pese a los avances en investigación y a las experiencias piloto, el reto sigue siendo articular estas tecnologías con políticas públicas, financiamiento y procesos de capacitación que permitan su ejecución masiva (Moreno Lerma et al., 2022; Chamorro-Vargas et al., 2025).

En este contexto, resulta pertinente realizar una revisión de la literatura reciente que permita identificar los avances alcanzados en torno al uso de tecnologías sostenibles en la producción bovina. La pregunta que orienta esta revisión es: ¿Cuáles son los avances recientes del período 2021 al 2025 en el uso de tecnologías sostenibles en la producción bovina, desde una perspectiva integral que articula la reducción de gases contaminantes y la economía circular? En correspondencia con este planteamiento, el objetivo de la revisión es analizar los avances recientes del período 2021 al 2025 sobre el uso de tecnologías sostenibles en la producción bovina, desde una perspectiva integral que articule la reducción de gases contaminantes y la economía circular.

MÉTODO

Este estudio corresponde a una revisión descriptiva de la literatura, de acuerdo con la clasificación de Vera Carrasco (2009), quien señala que este tipo de artículo tiene como finalidad organizar, analizar y resumir de manera crítica la información disponible sobre un tema, en este caso es sobre tecnologías sostenibles y producción bovina, sin pretender explicar relaciones causales sino ofrecer una visión general y sintética del estado del conocimiento.

La revisión se centró en publicaciones realizadas durante los últimos cinco años: 2021–2025, con el fin de garantizar la actualidad de los hallazgos. Este rango temporal permite captar tendencias recientes y delimitar de forma clara el corpus documental a analizar.

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

La estrategia de búsqueda se llevó a cabo en las bases de datos Scopus, Web of Science y SciELO. Se utilizaron palabras clave en español e inglés: “producción bovina” (cattle production), “tecnologías sostenibles” (sustainable technologies), “emisiones de gases de efecto invernadero” (greenhouse gases) y “economía circular” (circular economy), combinadas mediante operadores booleanos (AND, OR).

Los criterios de inclusión y exclusión fueron los siguientes:

Inclusión: artículos publicados entre 2021 y 2025 en revistas indexadas en Scopus (cuartiles Q1 y Q2), Web of Science o SciELO; estudios centrados en la producción bovina o en la economía circular de los sistemas agropecuarios y agroindustriales que la integran; investigaciones que analicen tecnologías sostenibles vinculadas a la reducción de gases de efecto invernadero o a procesos de economía circular.

Exclusión: publicaciones anteriores a 2021; tesis, informes técnicos, documentos de repositorio y publicaciones sin revisión por pares; estudios exclusivamente sobre otras especies animales; documentos sin relación directa con sostenibilidad, emisiones o economía circular.

Para el tratamiento de la información se empleó la técnica de meta-análisis narrativo (Vera Carrasco, 2009), entendida como la integración comparativa de resultados provenientes de diferentes investigaciones. Esta técnica permite, según Grant y Booth (2009), identificar patrones comunes, divergencias y vacíos en los estudios revisados, ofreciendo una síntesis crítica más allá de la simple enumeración de antecedentes.

En la práctica, se construyeron cuadros comparativos con las siguientes variables: autor, año, país, tecnología sostenible evaluada, resultados ambientales (reducción de metano, óxido nitroso o dióxido de carbono), resultados relacionados con la economía circular (aprovechamiento de estiércol, biogás, compostaje, biofertilizantes) y limitaciones reportadas. Posteriormente, se realizó una discusión integradora organizada en dos ejes: (1) la contribución de las tecnologías sostenibles a la mitigación ambiental; y (2) su papel en el fortalecimiento de un modelo de economía circular en la producción bovina.

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

Este procedimiento responde a lo planteado por Snyder (2019), quien sostiene que las revisiones de literatura mediante el meta-análisis narrativo permiten no solo describir la evidencia disponible, sino también elaborar nuevas perspectivas a partir de la síntesis crítica.

RESULTADOS

Tecnologías sostenibles en la producción bovina

Las tecnologías sostenibles se definen como innovaciones que recurren a recursos renovables o que reducen el consumo de recursos naturales, buscando minimizar los impactos negativos al medio ambiente y promover una producción más eficiente y responsable (Neves et al., 2022). En esta misma línea, Del Angel-Lozano et al. (2023) plantean que la transición hacia una ganadería bovina sostenible se sustenta en prácticas de base agroecológica que permiten que las actividades productivas se desarrollen en armonía con los ecosistemas y aseguren su permanencia en el tiempo, articulando innovación tecnológica con conservación ambiental.

Diversos autores destacan que estas tecnologías persiguen al menos tres finalidades centrales. En primer lugar, optimizar el uso de agua, energía y nutrientes, disminuyendo la generación de residuos y emisiones contaminantes para reforzar la resiliencia de los sistemas productivos (Del Angel-Lozano et al., 2023). En segundo lugar, integrar prácticas productivas con acciones ecológicas que favorezcan la biodiversidad, la fertilidad de los suelos y la productividad simultáneamente (Carvalho et al., 2024). Finalmente, garantizar que dichas tecnologías sean económicamente viables y culturalmente aceptadas, de modo que su adopción sea amplia y sostenida en el tiempo. En el caso de la producción bovina, si bien esta actividad representa un aporte significativo a la economía y a la seguridad alimentaria, también es señalada como fuente importante de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), principalmente por la fermentación entérica y la inadecuada gestión de excretas (Nugrahaeningtyas et al., 2024; Ordoñez

Vargas et al., 2023). Frente a esta problemática, las tecnologías sostenibles surgen como una alternativa para mitigar los impactos y reorientar el sistema hacia prácticas más responsables.

El uso de estas tecnologías no implica renunciar a la calidad de los productos ni a la rentabilidad del sector, sino que busca compatibilizar la eficiencia económica con la sostenibilidad ambiental. Dentro de las alternativas más reconocidas se encuentran los biodigestores, los sistemas silvopastoriles, el compostaje, la suplementación alimentaria y los biofertilizantes (Congio et al., 2021; Del Angel-Lozano et al., 2023; Carvalho et al., 2024). Cada una cumple un propósito particular, como el cierre de ciclos de nutrientes, la captura de carbono, la reducción de emisiones de metano entérico o la mejora de la fertilidad del suelo (Del Angel-Lozano et al., 2023).

En este sentido, los biodigestores permiten transformar el estiércol en biogás y fertilizantes orgánicos, aportando a un manejo más eficiente de los desechos (Castillo Alvarez et al., 2025). De manera complementaria, los sistemas silvopastoriles combinan árboles, pasturas y animales en una misma unidad productiva, ofreciendo beneficios como la diversificación de la dieta animal, sombra y regulación térmica (Carvalho et al., 2024). Los biofertilizantes, como el biol obtenido de la biodigestión del estiércol bovino, aportan nitrógeno, fósforo y potasio al suelo sin necesidad de insumos químicos agresivos (Gil Ramírez et al., 2023), mientras que el compostaje aprovecha los residuos sólidos para mejorar pasturas y cultivos. Finalmente, la suplementación alimentaria y el uso de aditivos han demostrado disminuir el metano entérico en rumiantes, lo cual contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero (Hristov, 2024). En conjunto, estas tecnologías refuerzan la sostenibilidad social y económica del sector bovino al mismo tiempo que mitigan su huella ambiental (Del Angel-Lozano et al., 2023).

Por su parte, Luna-delRisco et al. (2025) analizan los factores socioeconómicos que condicionan la adopción de biodigestores en hogares rurales de Colombia, entre ellos la percepción de la tecnología, la capacitación, la inversión inicial, los costos de operación,

el ahorro energético y los ingresos por subproductos. Los autores identifican como barreras las deficiencias de formación, los problemas regulatorios y la sostenibilidad de los sistemas, y concluyen que el apoyo gubernamental es esencial, lo cual refuerza la importancia de políticas públicas e incentivos que promuevan la transición hacia sistemas sostenibles.

El impacto ambiental de las tecnologías sostenibles en la producción bovina se refleja en los avances recientes que confirman que diversas tecnologías pueden contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción bovina. Tal es el caso de la suplementación alimentaria con aditivos como el 3-nitrooxipropanol, lo cual ha demostrado reducciones consistentes del metano entérico en bovinos de carne y leche (Hristov, 2024; Orzuna-Orzuna et al., 2024). En paralelo, los sistemas silvopastoriles favorecen la captura de carbono en biomasa y suelos, con reservas totales de carbono entre 26,5 % y 45,3 % superiores a las de las pasturas abiertas (Aryal et al., 2022), además de aportar otros servicios ecosistémicos como la fijación de nitrógeno y la regulación del microclima (Carvalho et al., 2024).

En cuanto al manejo de estiércol, los biodigestores y el compostaje representan alternativas que no solo evitan la liberación directa de metano y óxido nitroso, sino que generan biogás y fertilizantes orgánicos. Experimentos recientes demuestran que el tratamiento del estiércol con tecnología de plasma, que lo enriquece con nitrógeno, puede eliminar la formación de metano durante su almacenamiento (Nyvold y Dörsch, 2024), mientras que la aplicación de biocarbón al suelo contribuye a mitigar las emisiones de N_2O (Ren et al., 2025). Asimismo, el aprovechamiento del digestato como insumo agrícola refuerza la lógica de la economía circular al cerrar ciclos de nutrientes y sustituir parcialmente a los fertilizantes minerales (Kovačić et al., 2022).

Dichas tecnologías comparten la finalidad de reducir la huella ambiental del sector bovino sin comprometer la productividad. Sin embargo, difieren en sus enfoques: mientras los aditivos y la suplementación actúan directamente sobre el metabolismo animal, los

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

sistemas silvopastoriles y el compostaje operan a nivel de manejo de ecosistemas y residuos. A pesar de los resultados prometedores, persisten vacíos relacionados con la escalabilidad de estas prácticas en sistemas de producción de pequeña escala, así como con la necesidad de evaluar de manera integrada la reducción simultánea de CH_4 , CO_2 y N_2O .

En conjunto, estas tecnologías muestran que la sostenibilidad en la producción bovina no se limita a una mejora técnica puntual, sino que implica la construcción de sistemas productivos integrales. Cada innovación aporta de manera diferenciada a la mitigación ambiental: los biodigestores disminuyen las emisiones de metano al transformar el estiércol en biogás y fertilizante; los sistemas silvopastoriles favorecen la captura de carbono y mejoran la biodiversidad; el compostaje y los biofertilizantes reducen la dependencia de insumos químicos; y la suplementación dietaria permite disminuir la fermentación entérica en los rumiantes. Aunque estos aportes se relacionan tanto con la reducción de gases contaminantes como con la lógica de la economía circular, será en los apartados siguientes donde se examinen en detalle estas perspectivas, así como los factores que condicionan su adopción en contextos reales.

Perspectiva ambiental

La producción bovina enfrenta cuestionamientos ambientales por su alta contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O). Estas emisiones derivan, en gran medida, de la fermentación entérica y del manejo inadecuado de las excretas, constituyéndose en una de las principales presiones sobre el cambio climático global (Nugrahaeningtyas et al., 2024; Ordoñez Vargas et al., 2023).

Desde esta perspectiva, las tecnologías sostenibles adquieren un papel central al ofrecer alternativas que permiten mitigar la huella ambiental de la ganadería. La suplementación dietaria con aditivos como el 3-nitrooxipropanol, por ejemplo, ha mostrado reducciones

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

consistentes en la producción de metano entérico en bovinos de carne y leche (Hristov, 2024; Orzuna-Orzuna et al., 2024). Asimismo, los sistemas silvopastoriles destacan por su capacidad de captura de carbono en biomasa y suelos, con reservas de carbono entre 26,5 % y 45,3 % superiores a las de las pasturas abiertas (Aryal et al., 2022).

En cuanto al manejo de residuos, el uso de biodigestores y procesos de compostaje permite transformar el estiércol en biogás y fertilizantes orgánicos, reduciendo la liberación directa de metano y óxido nitroso. Investigaciones recientes evidencian que el tratamiento del estiércol con plasma puede eliminar la formación de metano durante su almacenamiento (Nyvold y Dörsch, 2024), mientras que el biocarbón aplicado al suelo reduce las emisiones de N_2O (Ren et al., 2025).

En síntesis, estas prácticas muestran que la sostenibilidad ambiental en la ganadería bovina no se limita a ajustes puntuales, sino que requiere sistemas productivos integrales donde cada innovación contribuya de manera diferenciada a la reducción de gases contaminantes. De este modo, la adopción de tecnologías sostenibles se proyecta como una vía esencial para armonizar la producción pecuaria con los compromisos ambientales globales y las metas de mitigación climática.

Perspectiva de economía circular

La economía circular (EC) ha emergido en la última década como un modelo alternativo frente al paradigma lineal de producción y consumo. Velasco-Muñoz et al. (2021) señalan que, aplicada al sector agrícola, su propósito consiste en preservar el medioambiente sin sacrificar la productividad, mediante estrategias de reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de recursos. En el ámbito ganadero, este principio se traduce en el aprovechamiento de estiércoles, purines y otros subproductos pecuarios que, bajo procesos tecnológicos adecuados, pueden transformarse en biogás, biofertilizantes o incluso insumos alimenticios para el ganado (Ramírez et al., 2021). Más allá de reducir la

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

presión ambiental, estas prácticas abren espacios de innovación y diversificación económica que, en muchos países, siguen siendo todavía incipientes.

El caso colombiano ilustra este carácter incipiente. Parodi et al. (2022) evaluaron la circularidad de las iniciativas de transformación sostenible del sector ganadero de Colombia y encontraron que estas priorizan la conservación, la deforestación cero y los sistemas silvopastoriles, mientras que la circularidad aparece solo de forma parcial, mediante abonos orgánicos y el uso del estiércol como fertilizante o fuente de bioenergía. Los autores advierten, además, que la recolección de estiércol en sistemas de pastoreo extensivo es poco viable, lo que limita su aporte y revela que la transición no es automática.

En un sentido similar, Lorenzo Kómová, Palacios Hidalgo y Souza Viamontes (2023) destacan la relevancia del estiércol bovino como insumo para la generación de biogás y compost, sustituyendo combustibles fósiles y fertilizantes sintéticos. No obstante, el alcance de estas transformaciones depende de la capacidad institucional para cerrar efectivamente los ciclos de nutrientes. Es decir, la EC ofrece la posibilidad de eficiencia productiva, pero su concreción requiere superar barreras de gestión y financiamiento.

Por su parte, Hamam et al. (2022) amplían la mirada al mostrar, con datos de empresas agroalimentarias de la Unión Europea, que las ecoinnovaciones de producto y de proceso son las que más influyen en la percepción de beneficios derivados de la economía circular, aunque el 57,4 % de las empresas no reportó ninguna innovación. Estos hallazgos evidencian que la circularidad no se limita a la dimensión ganadera, sino que constituye un paradigma transversal del sistema agroalimentario. Lo mismo plantean Gómez-García et al. (2021), quienes muestran que los subproductos agroindustriales, tradicionalmente destinados a vertederos, conservan valor nutricional y compuestos bioactivos recuperables para generar nuevos ingredientes y productos con valor agregado.

Desde una perspectiva más conceptual, Velasco-Muñoz et al. (2021) proponen una definición de economía circular específica para el sector agrícola, junto con estrategias de implementación y un conjunto de 41 indicadores para medir la circularidad. Este planteamiento es clave porque rompe con la idea de que la EC es únicamente una estrategia técnica: su implementación exige también cambios institucionales y regulatorios que acompañen la transición desde la lógica lineal de “producir, consumir y desechar”.

En esta misma línea, Ramirez et al. (2021) sostienen que las industrias ganaderas deben transitar hacia la economía circular para mantenerse resilientes frente a consumidores cambiantes, costos crecientes y presión ambiental, y advierten que la valorización actual de los residuos genera poco valor; proponen la digestión anaerobia para obtener biogás y digestato fertilizante, así como procesos microbianos para producir piensos. En México, Molina-Morejón et al. (2025) describen el caso de establos lecheros de la Comarca Lagunera, donde el estiércol se biodigiere para generar energía eléctrica y térmica y composta, y el agua tratada se reutiliza para riego. Esto plantea la necesidad de articular la ganadería con enfoques silvopastoriles, estrategias de recarbonización de suelos y esquemas de gestión eficiente del agua, configurando sistemas integrados capaces de producir sin deteriorar los servicios ecosistémicos.

La investigación de Castillo Alvarez et al. (2025) aporta un matiz tecnológico al mostrar cómo las mejoras de diseño y operación de un biodigestor rural en el valle del Chillón (Perú), alimentado con 70 % de estiércol bovino, permitieron alcanzar 63,75 L de CH₄ por kilogramo de materia orgánica, además de producir biofertilizante. Este tipo de innovación refleja que la circularidad en la ganadería no solo depende de buenas prácticas, sino también de la capacidad de incorporar desarrollos tecnológicos que aumenten la eficiencia y garanticen escalabilidad.

Villarroel-Schneider et al. (2022), en un estudio aplicado a fincas lecheras de América Latina, plantean que la implementación masiva de biodigestores alimentados con

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

estiércol permitiría cubrir las necesidades de gas, electricidad, refrigeración y agua caliente de la mayoría de los establos, con un costo del biogás de 1,7 a 3,7 centavos de dólar por kWh. Estiman, además, una reducción de 32,8 Mt CO₂eq al año, a la que se sumarían 17 Mt si se generaliza el uso del fertilizante orgánico obtenido.

En conjunto, los trabajos revisados coinciden en que la economía circular aplicada a la producción bovina es una vía para reducir emisiones y cerrar ciclos de nutrientes y energía. Sin embargo, persiste un vacío en la evaluación integral de sus beneficios económicos, sociales y ambientales a gran escala. La literatura revisada aporta experiencias dispersas, tanto conceptuales como aplicadas, pero aún no se cuenta con análisis comparativos que permitan medir la eficacia real del modelo. En consecuencia, el desafío no es únicamente avanzar en proyectos piloto o en discursos de sostenibilidad, sino consolidar un marco de evaluación y políticas que garanticen que la economía circular en la ganadería bovina sea una alternativa viable y transformadora.

Factores de adopción

La adopción de prácticas de economía circular en la producción bovina no depende únicamente de la existencia de tecnologías o de discursos de sostenibilidad, sino de un entramado de factores técnicos, institucionales y sociales que condicionan su viabilidad. Los estudios revisados coinciden en que los obstáculos y facilitadores interactúan, generando realidades contrastantes según el contexto productivo.

Factores técnicos

La disponibilidad tecnológica y la capacidad de gestión de los productores constituyen un punto de partida fundamental. Castillo Alvarez et al. (2025) muestran que las mejoras de diseño elevan la eficiencia de los biodigestores pequeños, aunque su desempeño depende de prácticas adecuadas de operación, como la agitación, el control del tiempo de retención y la reducción de pérdidas térmicas. De manera convergente, Hamam et al. (2022) evidencian que las empresas agroalimentarias que incorporan innovaciones de

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

producto y de proceso perciben mayores beneficios de la circularidad, mientras que más de la mitad de las empresas analizadas no reportó innovación alguna. Este hallazgo revela una brecha tecnológica que, de no atenderse, puede profundizar las desigualdades productivas en el sector bovino.

De forma complementaria, Hetherington et al. (2024), a partir de 43 entrevistas en el sector quesero australiano, identifican barreras a la economía circular comunes a todos los modelos de negocio para valorizar el lactosuero, como las economías de escala y los costos operativos, y otras específicas de cada modelo. Los autores encontraron que la disposición a adoptar prácticas circulares pasó del 33 % al 79 % cuando se consideraron varios modelos de negocio, lo que indica que ampliar las opciones disponibles favorece la adopción.

Factores institucionales

El marco normativo y la presencia de políticas públicas coherentes resultan determinantes en la consolidación de la circularidad. Velasco-Muñoz et al. (2021) enfatizan que la transición hacia un modelo circular en la agricultura requiere cambios institucionales y regulatorios, así como indicadores que permitan medir el avance. De igual modo, Molina-Morejón et al. (2025) subrayan que la consolidación de la bioeconomía circular en los establos enfrenta retos de adopción y depende de contar con cadenas eficientes de recolección y gestión de residuos.

En esta línea, Moreno Lerma et al. (2022), al comparar las políticas públicas para una ganadería sostenible en Colombia, Argentina y Costa Rica entre 2010 y 2020, destacan que Costa Rica muestra la mayor continuidad, con la NAMA Ganadería y la Estrategia Nacional de Ganadería Baja en Carbono 2015-2034, aunque carece de una plataforma multisectorial de ganadería sostenible. Los autores identifican como factores decisivos la voluntad política, la coordinación entre actores y la continuidad de los programas, mientras que, del lado de los productores, pesan la aversión al riesgo, la inversión inicial y la falta de capacitación. Esto confirma que la sostenibilidad no puede alcanzarse

únicamente con innovaciones tecnológicas, sino que requiere un entorno institucional sólido y articulado.

En síntesis, sin un entramado normativo y financiero sólido, las iniciativas corren el riesgo de permanecer como proyectos aislados y no como estrategias estructurales.

Factores sociales

La dimensión social también ejerce un peso relevante. Lorenzo Kómová, Palacios Hidalgo y Souza Viamontes (2023) señalan que la resistencia al cambio y la falta de cultura ambiental en los productores limitan la adopción de compostaje y biogás. Chamorro-Vargas et al. (2025), en un análisis de 2926 fincas del proyecto Ganadería Colombiana Sostenible, encontraron que el pago por servicios ambientales fue el principal facilitador de la adopción de prácticas silvopastoriles, mientras que la demanda hídrica la redujo. A su vez, Villarroel-Molina et al. (2021) llaman la atención sobre condicionantes propios de los sistemas bovinos de doble propósito en México, donde la adopción media de tecnologías reproductivas fue de apenas 27,04 % y la pertenencia a grupos de productores y la posición en las redes sociales influyeron significativamente en la adopción, lo que refleja la necesidad de fortalecer la organización de los productores y acompañarla de políticas de apoyo.

En conjunto, la literatura revela que la adopción de prácticas circulares en la ganadería bovina se encuentra mediada por tres planos de análisis. En el nivel micro, los condicionantes tecnológicos y de gestión generan diferencias marcadas entre productores, particularmente entre quienes tienen acceso a innovación y quienes operan con recursos limitados. En el nivel meso, la cultura organizativa y la aceptación social determinan la disposición a modificar rutinas productivas y a valorar los beneficios comunitarios de la circularidad. Finalmente, en el nivel macro, el diseño de políticas públicas, los incentivos económicos y el respaldo institucional emergen como factores decisivos para garantizar la permanencia de estas prácticas en el tiempo. El vacío más evidente es la ausencia de estudios longitudinales y comparativos que permitan evaluar

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

la sostenibilidad real de las iniciativas, tanto en términos ambientales como sociales y económicos. Sin este análisis a gran escala, el potencial de la economía circular en la ganadería bovina seguirá siendo más un horizonte deseable que una transformación consolidada.

Síntesis comparativa

Con el propósito de sistematizar los hallazgos de los 28 documentos revisados, se construyó un cuadro comparativo de síntesis (meta-análisis narrativo). Este cuadro organiza los aportes con las siguientes variables: autor, año, país, tecnología sostenible evaluada, resultados ambientales (reducción de metano, óxido nitroso o dióxido de carbono), resultados relacionados con la economía circular (aprovechamiento de estiércol, biogás, compostaje, biofertilizantes) y limitaciones reportadas, tal como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1.
Cuadro comparativo según variables metodológicas.

Autor(es) / Año	País / Contexto	Tecnología sostenible	Resultados ambientales (reducción GEI)	Resultados en economía circular	Limitaciones reportadas
Congio et al., 2021	América Latina y el Caribe	Estrategias de alimentación	Mitigación del CH ₄ entérico	—	—
Gómez-García et al., 2021	Global	Valorización de subproductos agroindustriales	Menor disposición en vertederos	Nuevos ingredientes y productos	—
Ramírez et al., 2021	Australia	Valorización de residuos ganaderos	—	Biogás, digestato y piensos	Baja valorización actual de los residuos
Velasco-Muñoz et al., 2021	Global	Economía circular en la agricultura	—	Definición, estrategias y 41 indicadores	Requiere cambios institucionales y regulatorios
Villarroel-Molina et al., 2021	México	Tecnologías reproductivas en doble propósito	—	—	Adopción media de 27,04 %
Arndt et al., 2022	Global	Estrategias de mitigación de CH ₄ en rumiantes	Permitiría cumplir la meta de 1,5 °C a 2030	—	Insuficiente hacia 2050

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

Autor(es) / Año	País / Contexto	Tecnología sostenible	Resultados ambientales (reducción GEI)	Resultados en economía circular	Limitaciones reportadas
Aryal et al., 2022	México	Sistemas silvopastoriles	26,5–45,3 % más carbono que pasturas abiertas	Servicios ecosistémicos	—
Hamam et al., 2022	Unión Europea	Ecoinnovación agroalimentaria	—	Beneficios circulares asociados a la innovación	57,4 % de empresas sin innovación
Kovačić et al., 2022	Europa	Manejo y procesamiento del digestato	—	Sustitución de fertilizantes minerales	—
Moreno Lerma et al., 2022	Colombia, Argentina y Costa Rica	Políticas de ganadería sostenible	—	—	Coordinación y continuidad de programas
Neves et al., 2022	Global	Adopción de tecnologías sostenibles	—	—	—
Parodi et al., 2022	Colombia	Transformación sostenible del sector ganadero	—	Circularidad parcial: abonos y bioenergía	Recolección de estiércol inviable en pastoreo extensivo
Villarroel-Schneider et al., 2022	América Latina	Biogás en fincas lecheras	Reducción de 32,8 Mt CO ₂ eq/año	Energía y fertilizante orgánico	—
Del Angel-Lozano et al., 2023	México y Brasil	Prácticas agroecológicas	Balance de -2,73 Mg CO ₂ e/ha en silvopastoreo	Uso de estiércol, humus y biogás	—
Gil Ramírez et al., 2023	Perú	Biodigestor con estiércol bovino	—	Biol con N, P y K	—
Lorenzo Kómová et al., 2023	Cuba	Residuos pecuarios	Reducción de GEI	Transformación en biogás y compost	Alta inversión inicial
Ordoñez Vargas et al., 2023	Colombia	Manejo de excretas	Reducción de CH ₄ y N ₂ O	Aprovechamiento de subproductos	Capacitación insuficiente
Carvalho et al., 2024	Trópico (revisión)	Sistemas silvopastoriles	Captura de carbono	Fijación de N y fertilidad del suelo	La sombra intensa reduce el forraje
Hetherington et al., 2024	Australia	Valorización del lactosuero	—	Modelos de negocio circulares	Economías de escala y costos operativos
Hristov, 2024	Global	Suplementación alimentaria	Reducción consistente de CH ₄	Eficiencia productiva	Acceso desigual a suplementos
Nugrahaeningtyas et al., 2024	Global	Manejo entérico y del estiércol	Fuentes de CH ₄ y N ₂ O y opciones de mitigación	—	—
Nyvold y Dörsch, 2024	Europa	Estiércol tratado con plasma	Eliminación del CH ₄ en almacenamiento	Estiércol enriquecido en N	Limitaciones técnicas
Orzuna-Orzuna et al., 2024	Global (metaanálisis)	Aditivos en la dieta bovina	Disminución del metano entérico	Mejora en productividad	Costos de aditivos

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

Autor(es) / Año	País / Contexto	Tecnología sostenible	Resultados ambientales (reducción GEI)	Resultados en economía circular	Limitaciones reportadas
Castillo Alvarez et al., 2025	Perú	Biodigestor rural mejorado	63,75 L CH ₄ /kg de materia orgánica	Biogás y biofertilizante	Requiere prácticas adecuadas de operación
Chamorro-Vargas et al., 2025	Colombia	Sistemas silvopastoriles	—	—	Demanda hídrica y costos
Luna-delRisco et al., 2025	Colombia	Biodigestores domésticos	—	Ahorro energético e ingresos por subproductos	Inversión inicial, formación y regulación
Molina-Morejón et al., 2025	México	Bioeconomía circular en establos	—	Energía, composta y reúso de agua	Cadenas de recolección de residuos
Ren et al., 2025	China	Biocarbón	Mitigación de N ₂ O	Reciclaje de nutrientes	Adopción incipiente

Elaboración: Los autores.

A partir de la información organizada en el cuadro comparativo inicial, se procedió a elaborar un segundo cuadro de síntesis temática (Tabla 2). Este instrumento permite identificar patrones comunes, contrastes y vacíos en la literatura revisada, lo cual constituye el fundamento para la discusión crítica posterior. De este modo, la revisión trasciende el nivel descriptivo de los aportes individuales y avanza hacia un análisis integrador que responde a los dos ejes planteados: la contribución de las tecnologías sostenibles a la mitigación ambiental y su papel en el fortalecimiento de un modelo de economía circular en la producción bovina.

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

Tabla 2.
 Cuadro temático: coincidencias, divergencias y vacíos.

Categoría / Tema	Coincidencias	Divergencias	Vacíos identificados	Autores
Tecnologías sostenibles	Biodigestores y compostaje reducen emisiones y aprovechan residuos. La nutrición animal y los aditivos reducen el metano entérico. Los sistemas silvopastoriles contribuyen a la productividad y la conservación.	Hristov (2024) y Orzuna-Orzuna et al. (2024) enfatizan la dieta; Castillo Alvarez et al. (2025) y Nyvold y Dörsch (2024), la gestión del estiércol; Aryal et al. (2022) y Carvalho et al. (2024), los sistemas silvopastoriles.	Faltan estudios de costo-beneficio a largo plazo y que integren varias tecnologías en sistemas completos.	Congio et al. (2021); Neves et al. (2022); Aryal et al. (2022); Del Angel-Lozano et al. (2023); Gil Ramírez et al. (2023); Hristov (2024); Orzuna-Orzuna et al. (2024); Carvalho et al. (2024); Nyvold y Dörsch (2024); Castillo Alvarez et al. (2025); Ren et al. (2025).
Economía circular	Valorización de estiércoles y subproductos como insumo para biogás, compost o bioproductos. Necesidad de indicadores de circularidad.	Algunos trabajos son conceptuales (Velasco-Muñoz et al., 2021; Ramirez et al., 2021), otros aplicados (Villarroel-Schneider et al., 2022; Molina-Morejón et al., 2025). Diferencias en el tipo de residuos: pecuarios frente a agroindustriales.	Escasez de evaluaciones comparativas entre países y de impactos sociales y económicos a gran escala.	Gómez-García et al. (2021); Ramirez et al. (2021); Velasco-Muñoz et al. (2021); Hamam et al. (2022); Kovačić et al. (2022); Parodi et al. (2022); Villarroel-Schneider et al. (2022); Lorenzo Kómová et al. (2023); Molina-Morejón et al. (2025).
Perspectiva ambiental	La ganadería contribuye a las emisiones de GEI y requiere mitigación. Los biodigestores reducen metano, recuperan nutrientes y mejoran el agua y el aire.	Arndt et al. (2022) y Nugrahaeningtyas et al. (2024) hacen análisis globales; Ordoñez Vargas et al. (2023) y Villarroel-Schneider et al. (2022) aportan casos latinoamericanos.	Faltan estudios longitudinales sobre reducción sostenida de emisiones y en pequeña producción ganadera.	Arndt et al. (2022); Villarroel-Schneider et al. (2022); Ordoñez Vargas et al. (2023); Nugrahaeningtyas et al. (2024).
Factores de adopción	La adopción depende de apoyo institucional, capacitación y financiamiento.	Moreno Lerma et al. (2022) enfatizan las políticas públicas; Hetherington et al. (2024) distinguen barreras comunes y específicas por modelo de negocio; Villarroel-Molina et al. (2021) resaltan las redes de productores; Chamorro-Vargas et al. (2025), los incentivos económicos.	Faltan estudios sobre la permanencia de prácticas circulares en comunidades rurales a largo plazo.	Villarroel-Molina et al. (2021); Moreno Lerma et al. (2022); Hetherington et al. (2024); Chamorro-Vargas et al. (2025); Luna-delRisco et al. (2025).

Elaboración: Los autores.

DISCUSIÓN

A partir del cuadro comparativo y temático, se observa que existe un consenso generalizado en torno a la relevancia de tecnologías como los biodigestores, el compostaje y los sistemas silvopastoriles para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia productiva. Sin embargo, los enfoques difieren en cuanto a los elementos centrales de intervención: mientras algunos autores privilegian la dieta animal como estrategia prioritaria de reducción de metano, otros destacan la gestión de estiércol y purines como el eje fundamental de la circularidad.

En cuanto a la economía circular, la coincidencia radica en que la valorización de residuos constituye un punto de partida esencial, pero los estudios discrepan en el tipo de residuos priorizados (pecuarios frente a agroindustriales) y en el nivel de análisis (conceptual frente a aplicado). Lo mismo ocurre con los factores de adopción: todos reconocen la necesidad de apoyo institucional y capacitación, aunque difieren en el peso otorgado a los arreglos institucionales, las limitaciones internas de los productores o la aceptación social.

Los vacíos identificados son particularmente reveladores. Destaca la ausencia de estudios longitudinales que evalúen la permanencia de las prácticas circulares en el tiempo, así como la escasez de análisis comparativos entre regiones o países que permitan dimensionar los beneficios reales más allá del ámbito local. Asimismo, faltan evaluaciones integrales de costo-beneficio en contextos de pequeños productores, donde la inversión inicial y la falta de incentivos constituyen barreras críticas.

En consecuencia, se plantea que la agenda de investigación futura debería orientarse a: (1) diseñar estudios de seguimiento a largo plazo que permitan medir la sostenibilidad real de las prácticas circulares, (2) comparar experiencias internacionales para identificar modelos transferibles, (3) incorporar indicadores sociales y económicos junto con los ambientales, y (4) evaluar estrategias de financiamiento e incentivos que faciliten la

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

adopción en sistemas de pequeña escala. Solo con este tipo de investigaciones será posible avanzar hacia una transición ganadera verdaderamente circular y sostenible.

En este punto del análisis, en relación con la pregunta que orienta esta revisión, los avances registrados en el período 2021–2025 muestran que el uso de tecnologías sostenibles en la producción bovina ha logrado articular, aunque de manera incipiente, la reducción de gases contaminantes con los principios de la economía circular. La generalización de biodigestores, compostaje y sistemas silvopastoriles constituye un consenso en la literatura por su doble aporte: mitigar emisiones de metano y óxido nítrico, y valorizar subproductos pecuarios como biofertilizantes o bioenergía. No obstante, persisten divergencias respecto a los enfoques prioritarios —nutrición animal versus gestión de estiércol— y vacíos en estudios longitudinales, comparativos e integrales que permitan dimensionar la sostenibilidad real de estas prácticas.

CONCLUSIONES

En relación con la pregunta planteada, los hallazgos de la revisión evidencian que, entre 2021 y 2025, los principales avances en el uso de tecnologías sostenibles en la producción bovina se concentran en tres frentes: la generalización de biodigestores y compostaje como prácticas de manejo de estiércol y purines; la incorporación de dietas y suplementos orientados a reducir el metano entérico; y la integración de sistemas silvopastoriles que combinan productividad con conservación ambiental. Estos desarrollos muestran que la economía circular y la reducción de gases contaminantes no son estrategias aisladas, sino procesos complementarios que, aplicados conjuntamente, fortalecen la sostenibilidad del sector.

El objetivo de la revisión se cumplió al analizar, desde una perspectiva integral, los aportes de veintiocho documentos en torno a tecnologías, economía circular, dimensión ambiental y factores de adopción. La síntesis comparativa permitió identificar coincidencias —como la valorización de residuos y la necesidad de apoyo institucional—

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

, divergencias —en los enfoques tecnológicos y en los niveles de análisis— y vacíos — particularmente la ausencia de estudios longitudinales, comparativos y de costo-beneficio en pequeños productores.

En consecuencia, se concluye que la economía circular en la ganadería bovina avanza como un horizonte viable, pero su consolidación exige mayor investigación aplicada, políticas públicas coherentes y mecanismos de adopción que integren lo ambiental, lo social y lo económico. Solo a partir de este esfuerzo articulado será posible transformar la producción bovina en un modelo resiliente, circular y sostenible a largo plazo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés en la publicación de este artículo.

FINANCIAMIENTO

No monetario.

AGRADECIMIENTO

A la Dra. Marta Laura González y a la Dra. Yamelys Navarro por la invitación a compartir y socializar el conocimiento.

REFERENCIAS CONSULTADAS

Arndt, C., Hristov, A. N., Price, W. J., McClelland, S. C., Pelaez, A. M., Cueva, S. F., Oh, J., Dijkstra, J., Bannink, A., Bayat, A. R., Crompton, L. A., Eugène, M. A., Enahoro, D., Kebreab, E., Kreuzer, M., McGee, M., Martin, C., Newbold, C. J., Reynolds, C. K., . . . Yu, Z. (2022). Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 °C target by 2030 but not 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(20), e2111294119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111294119>

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

- Aryal, D. R., Morales-Ruiz, D. E., López-Cruz, S., Tondopó-Marroquín, C. N., Lara-Nucamendi, A., Jiménez-Trujillo, J. A., Pérez-Sánchez, E., Betanzos-Simon, J. E., Casasola-Coto, F., Martínez-Salinas, A., Sepúlveda-López, C. J., Ramírez-Díaz, R., La O Arias, M. A., Guevara-Hernández, F., Pinto-Ruiz, R., & Ibrahim, M. (2022). Silvopastoral systems and remnant forests enhance carbon storage in livestock-dominated landscapes in Mexico. *Scientific Reports*, 12, 16769. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21089-4>
- Carvalho, C. B. M., Mello, A. C. L., Cunha, M. V., Apolinário, V. X. O., Dubeux Júnior, J. C. B., Silva, V. J., Medeiros, A. S., Izidro, J. L. P. S., & Bretas, I. L. (2024). Ecosystem services provided by silvopastoral systems: A review. *The Journal of Agricultural Science*, 162(5), 417-432. <https://doi.org/10.1017/S0021859624000595>
- Castillo Alvarez, Y., Jiménez Borges, R., Patiño Vidal, C. D., Carhuancho Leon, F. M., Pinares Buendia, J. S., & Samaniego Nolasco, J. A. (2025). Design improvements and best practices in small-scale biodigesters for sustainable biogas production: A case study in the Chillon Valley, Perú. *Energies*, 18(2), 338. <https://doi.org/10.3390/en18020338>
- Chamorro-Vargas, C. T., Morgan, S., Pantevéz, H., Gomez, M., Kennedy, C. M., & Kremen, C. (2025). Enablers and barriers to adoption of sustainable silvopastoral practices for livestock production in Colombia. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1600091. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1600091>
- Congio, G. F. S., Bannink, A., Mayorga Mogollón, O. L., Jaurena, G., Gonda, H., Gere, J. I., Cerón-Cucchi, M. E., Ortiz-Chura, A., Tieri, M. P., Hernández, O., Ricci, P., Juliarena, M. P., Lombardi, B., Abdalla, A. L., Abdalla-Filho, A. L., Berndt, A., Oliveira, P. P. A., Henrique, F. L., Monteiro, A. L. G., . . . Hristov, A. N. (2021). Enteric methane mitigation strategies for ruminant livestock systems in the Latin America and Caribbean region: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127693. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127693>
- Del Angel-Lozano, G., Escalona-Aguilar, M. Á., Baca del Moral, J., & Cuevas-Reyes, V. (2023). Principios y prácticas agroecológicas para la transición hacia una ganadería bovina sostenible. Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 14(3), 696-724. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v14i3.6287>
- Gil Ramírez, L. A., Leiva Cabrera, F. A., Lezama Escobedo, M. K., Bardales Vásquez, C. B., & León Torres, C. A. (2023). Biofertilizante “biol”: caracterización física, química y microbiológica. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 7(20), 336-345. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i20.219>

- Gómez-García, R., Campos, D. A., Aguilar, C. N., Madureira, A. R., & Pintado, M. (2021). Valorisation of food agro-industrial by-products: From the past to the present and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 299, 113571. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113571>
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91-108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Hamam, M., D'Amico, M., Zarbà, C., Chinnici, G., & Tóth, J. (2022). Eco-innovations transition of agri-food enterprises into a circular economy. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 845420. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.845420>
- Hetherington, J. B., Loch, A. J., Juliano, P., & Umberger, W. J. (2024). Barriers to circular economy adoption are diverse and some are business-model specific: Evidence from the Australian cheese manufacturing sector. *Journal of Cleaner Production*, 477, 143879. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143879>
- Hristov, A. N. (2024). Invited review: Advances in nutrition and feed additives to mitigate enteric methane emissions. *Journal of Dairy Science*, 107(7), 4129-4146. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24440>
- Kovačić, Đ., Lončarić, Z., Jović, J., Samac, D., Popović, B., & Tišma, M. (2022). Digestate management and processing practices: A review. *Applied Sciences*, 12(18), 9216. <https://doi.org/10.3390/app12189216>
- Lorenzo Kómová, E., Palacios Hidalgo, Á., & Souza Viamontes, C. M. (2023). La economía circular en la gestión de residuos ganaderos. *Economía y Desarrollo*, 167(2), e8. <https://tinyurl.com/23terjjs>
- Luna-delRisco, M., Arrieta González, C., Mendoza-Hernández, S., Vanegas-Trujillo, E., da Rocha Meneses, L., Sierra-Del Rio, J., Castillo-Meza, L. E., Santos-Ballardo, D. U., & Gómez Montoya, J. P. (2025). Evaluating the socio-economic drivers of household adoption of biodigester systems for domestic energy in rural Colombia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 73, 104146. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104146>
- Molina-Morejón, V. M., Espinoza-Arellano, J. J., Contreras-Martínez, J. G., & Díaz-Gurrola, E. R. (2025). Gestión de residuos agroindustriales: un enfoque de bioeconomía circular. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(6), e3792. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i6.3792>

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

- Moreno Lerma, L., Díaz Baca, M. F., & Burkart, S. (2022). Public policies for the development of a sustainable cattle sector in Colombia, Argentina, and Costa Rica: A comparative analysis (2010–2020). *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 722522. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.722522>
- Neves, C., Oliveira, T., & Santini, F. (2022). Sustainable technologies adoption research: A weight and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112627>
- Nugrahaeningtyas, E., Lee, J.-S., & Park, K.-H. (2024). Greenhouse gas emissions from livestock: Sources, estimation, and mitigation. *Journal of Animal Science and Technology*, 66(6), 1083-1098. <https://doi.org/10.5187/jast.2024.e86>
- Nyvold, M., & Dörsch, P. (2024). Complete elimination of methane formation in stored livestock manure using plasma technology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1370542. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1370542>
- Ordoñez Vargas, W. F., Posada Ochoa, S. L., & Rosero Noguera, R. (2023). Emisiones de gases de efecto invernadero por aplicación de excrementos bovinos al suelo. *Información Tecnológica*, 34(1), 101-116. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642023000100101>
- Orzuna-Orzuna, J. F., Godina-Rodríguez, J. E., Garay-Martínez, J. R., Granados-Rivera, L. D., Maldonado-Jáquez, J. A., & Lara-Bueno, A. (2024). A meta-analysis of 3-nitrooxypropanol dietary supplementation on growth performance, ruminal fermentation, and enteric methane emissions of beef cattle. *Fermentation*, 10(6), 273. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060273>
- Parodi, A., Valencia-Salazar, S., Loboguerrero, A. M., Martínez-Barón, D., Murgueitio, E., & Vázquez-Rowe, I. (2022). The sustainable transformation of the Colombian cattle sector: Assessing its circularity. *PLOS Climate*, 1(10), e0000074. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000074>
- Ramirez, J., McCabe, B., Jensen, P. D., Speight, R., Harrison, M., van den Berg, L., & O'Hara, I. (2021). Wastes to profit: A circular economy approach to value-addition in livestock industries. *Animal Production Science*, 61(6), 541-550. <https://doi.org/10.1071/AN20400>

Magdiel de Jesús Salas-Barleta; Camilo Andrés García-Pérez; Jinette Gabriela Labrador-Fernández; Josía Jeseff Isea-Argüelles

- Ren, J., Wang, Y., Luo, M., Zhuang, Y., Wang, J., Chai, S., Liu, J., Zhang, Z., Li, Y., Chen, P., & Wei, Q. (2025). Mitigating nitrous oxide emissions from agricultural soils with biochar: A scientometric and visual analysis. *Agronomy*, 15(5), 1115. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051115>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Velasco-Muñoz, J. F., Mendoza, J. M. F., Aznar-Sánchez, J. A., & Gallego-Schmid, A. (2021). Circular economy implementation in the agricultural sector: Definition, strategies and indicators. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105618. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105618>
- Vera Carrasco, O. (2009). Cómo escribir artículos de revisión. *Revista Médica La Paz*, 15(1), 63-69. <https://tinyurl.com/2xzn6qao>
- Villarroel-Molina, O., De-Pablos-Heredero, C., Barba, C., Rangel, J., & García, A. (2021). The importance of network position in the diffusion of agricultural innovations in smallholders of dual-purpose cattle in Mexico. *Land*, 10(4), 401. <https://doi.org/10.3390/land10040401>
- Villarroel-Schneider, J., Höglund-Isaksson, L., Mainali, B., Martí-Herrero, J., Cardozo, E., Malmquist, A., & Martin, A. (2022). Energy self-sufficiency and greenhouse gas emission reductions in Latin American dairy farms through massive implementation of biogas-based solutions. *Energy Conversion and Management*, 261, 115670. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115670>