



**REVISIÓN DE ESTRATEGIAS NUTRICIONALES, TECNOLÓGICAS Y
DE MANEJO PARA MITIGAR LAS EMISIONES DE METANO EN
RUMIANTES**

*Review of Nutritional, Technological, and Management Strategies
to Mitigate Methane Emissions in Ruminants*

REVISIÓN DE ESTRATEGIAS NUTRICIONALES, TECNOLÓGICAS Y DE MANEJO PARA MITIGAR LAS EMISIONES DE METANO EN RUMIANTES

Review of Nutritional, Technological, and Management Strategies to Mitigate Methane Emissions in Ruminants

González-Puetate Iván Roberto
Moya-Palacios Katherine Alejandra
Cedeño-Reyes Pedro Pablo
Benítez-Abarca Gloria María

¹ Universidad de Guayaquil, Ecuador, ivan.gonzalezp@ug.edu.ec

² Instituto Superior Tecnológico Carlos Cisneros, Ecuador, katherine.moya@istcarloscisneros.edu.ec

³ Universidad de Guayaquil, Ecuador, pedro.cedenor@ug.edu.ec

⁴ Instituto Superior Tecnológico Carlos Cisneros, Ecuador, gloria.benitez@istcarloscisneros.edu.ec

RESUMEN

La mitigación de las emisiones de metano entérico en rumiantes representa un desafío crucial para la sostenibilidad ambiental y productiva de la ganadería. Este estudio tuvo como objetivo revisar estrategias nutricionales, tecnológicas y de manejo con potencial para reducir dichas emisiones sin comprometer el rendimiento animal. La investigación se desarrolló mediante una revisión bibliográfica exhaustiva de literatura científica actualizada, enfocándose en alternativas como el uso de compuestos bioactivos en especies forrajeras, aditivos dietéticos, tecnologías de precisión y prácticas de manejo sostenible. Los resultados evidencian que especies como *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* contienen taninos y saponinas que modulan la fermentación ruminal y reducen la producción de metano. Asimismo, el uso de probióticos, bacterias homoacetogénicas y el manejo eficiente de residuos agroindustriales emergen como herramientas prometedoras. La implementación de sistemas silvopastoriles y tecnologías digitales permite mejorar la productividad y disminuir el impacto ambiental. Se concluye que la adopción de estrategias integrales y multidisciplinarias, articuladas con políticas públicas y formación técnica, es clave para avanzar hacia una ganadería más resiliente y climáticamente responsable.

Palabras clave: metano entérico, rumiantes, Metanogénesis, fermentación entérica, sistemas silvopastoriles, bioaumentación, biotecnología ruminal, ganadería de precisión.



ABSTRACT

*The mitigation of enteric methane emissions in ruminants represents a critical challenge for the environmental and productive sustainability of livestock farming. This study aimed to review nutritional, technological, and management strategies with the potential to reduce these emissions without compromising animal performance. The research was conducted through an exhaustive bibliographic review of updated scientific literature, focusing on alternatives such as the use of bioactive compounds in forage species, dietary additives, precision technologies, and sustainable management practices. The results show that species such as *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, and *Guazuma ulmifolia* contain tannins and saponins that modulate ruminal fermentation and reduce methane production. Additionally, the use of probiotics, homoacetogenic bacteria, and the efficient management of agro-industrial residues emerge as promising tools. The implementation of silvopastoral systems and digital technologies helps improve productivity and reduce environmental impact. It is concluded that the adoption of integral and multidisciplinary strategies, articulated with public policies and technical training, is key to advancing toward a more resilient and climate-responsible livestock sector.*

Keywords: *Enteric methane, Ruminants, Methanogenesis, Enteric fermentation, Silvopastoral systems, Bioaugmentation, Rumen biotechnology, Precision livestock farming.*

Recibido: Agosto 2025
Received: August 2025

Aceptado: Diciembre 2025
Accepted: December 2025



1. INTRODUCCIÓN

La producción de metano (CH_4) en rumiantes, particularmente en bovinos, es un proceso biológico natural generado en el rumen como resultado de la fermentación entérica, llevada a cabo por microorganismos metanogénicos que degradan los carbohidratos de la dieta. Aunque forma parte del ciclo biogeoquímico del carbono, este proceso representa un desafío doble: por un lado, implica una pérdida energética para el animal entre el 2 % y el 12 % de la energía bruta consumida se pierde como CH_4 y, por otro, representa un importante contribuyente al cambio climático, ya que el metano posee un potencial de calentamiento global muy superior al del dióxido de carbono [1].

A escala global, la ganadería es responsable de aproximadamente el 37 % de las emisiones antropogénicas de metano, siendo la fermentación entérica la principal fuente [2]. En este contexto, la reducción de estas emisiones se ha convertido en una prioridad para la sostenibilidad del sector. Una alternativa prometedora radica en el aprovechamiento de residuos agrícolas, los cuales presentan un alto potencial para ser utilizados en alimentación animal, producción de biocombustibles, compostaje y elaboración de bioproductos de alto valor [3]. En países en desarrollo, donde la agricultura y la agroindustria son pilares económicos, la generación de residuos agroindustriales es inevitable. No obstante, su adecuada gestión permite integrarlos en modelos de economía circular y sostenibilidad productiva [4].

La inadecuada disposición de estos residuos suele provocar su acumulación en sitios no autorizados, generando lixiviados y emisiones de gases de efecto invernadero [5]. En India, por ejemplo, se ha reportado que los residuos agrícolas pueden generar hasta 583 toneladas métricas de material particulado (PM_{10}), con efectos nocivos sobre la salud humana y el ambiente [6]. A pesar de su potencial, la falta de conocimiento, políticas adecuadas y tecnología limita su aprovechamiento eficiente, incrementando el impacto ambiental [7].

Desde el punto de vista nutricional, se ha demostrado que la calidad de los forrajes incide directamente en la producción de metano. En bovinos, esta puede representar entre el 5.5 % y el 6.5 % de la energía ingerida, llegando hasta un 18 % cuando la dieta se basa en forrajes de baja

calidad; sin embargo, estas pérdidas podrían reducirse hasta un 7 % mediante ajustes nutricionales [8]. Los ácidos grasos volátiles (AGV), como el acetato, propionato y butirato, productos principales de la fermentación ruminal, influyen directamente en la metanogénesis [9]. Dietas ricas en forrajes promueven la producción de acetato asociado a mayores emisiones, mientras que las dietas con concentrados incrementan el propionato, favoreciendo una menor generación de CH_4 [10].

Recientes investigaciones han explorado el uso de compuestos bioactivos presentes en las algas marinas, como flavonoides y polifenoles, los cuales modifican la microbiota ruminal y disminuyen la producción de metano [11]. Asimismo, la inclusión de concentrados incrementa la tasa de pasaje y reduce el pH ruminal, generando cambios microbianos que disminuyen la proporción de protozoarios y modifican la relación acetato: propionato. Estas alteraciones promueven una menor producción entérica de metano y una mejor eficiencia digestiva, especialmente cuando se suministran partículas finas de alimento [12].

De forma complementaria, la implementación de tecnologías digitales ha cobrado importancia en la ganadería moderna. Los sistemas de producción de precisión permiten monitorear el comportamiento, salud y consumo del ganado, facilitando decisiones basadas en datos. Estos sistemas han demostrado mejorar la productividad en un 15 %, reducir el consumo energético en un 35 %, disminuir el desperdicio de alimento en un 75 % y reducir el potencial de calentamiento global hasta en un 5,83 % [13].

Además, estrategias basadas en el uso de extractos vegetales con compuestos fenólicos han mostrado efectos positivos al interferir con enzimas involucradas en la digestión de fibra y metabolismo de aminoácidos, reduciendo significativamente la producción de CH_4 [14]. A estas medidas se suman prácticas de manejo como el tratamiento del estiércol, la mejora de la conversión alimenticia y el aprovechamiento de subproductos agroindustriales, todas dirigidas a minimizar la huella ambiental de la ganadería.

La implementación de medidas de mitigación de la metanogénesis se vuelve urgente, dado el impacto acelerado que generan estos gases tanto en el clima global como en la eficiencia productiva del sistema ganadero [15]. En este contexto, el presente trabajo



tiene como objetivo revisar la literatura científica disponible sobre estrategias actuales para la reducción de emisiones de metano en rumiantes. Se analizarán intervenciones nutricionales, aplicaciones tecnológicas y prácticas de manejo innovadoras, evaluando su eficacia desde una perspectiva dual: el incremento de la productividad y la sostenibilidad ambiental. Frente al reto global de garantizar la seguridad alimentaria y enfrentar el cambio climático, estas estrategias representan oportunidades clave para transformar la ganadería en un modelo más resiliente y responsable.

2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

Enfoque de investigación:

Este estudio adoptó un enfoque cualitativo, basado en una revisión de la literatura científica, con el propósito de diagnosticar y analizar las estrategias más efectivas para reducir las emisiones de metano en la ganadería tropical, con un énfasis particular en los sistemas silvopastoriles. Se buscó comprender cómo diversas prácticas relacionadas con la alimentación animal, el manejo de pastos y forrajes, así como el uso de aditivos nutricionales (como extractos vegetales, aceites esenciales y probióticos), impactan la fermentación ruminal y la generación de metano.

Asimismo, se integró el análisis de estrategias emergentes como la alimentación de precisión, la cual permite ajustar la calidad y cantidad de la dieta en función de las necesidades específicas del animal, mejorando la eficiencia alimentaria y reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero. Esta perspectiva permitió abordar de manera integral las interacciones entre nutrición, microbiota ruminal y producción de metano, considerando la complejidad de los sistemas productivos tropicales.

Diseño de estudio

El diseño del estudio se fundamentó en una revisión documental de tipo integrativo, orientada a la recolección, selección crítica y análisis comparativo de información científica publicada en los últimos cinco años. Se incluyeron artículos revisados por pares, informes técnicos, documentos institucionales y reportes de organismos nacionales e internacionales, con el fin de construir una visión amplia y actualizada sobre las prácticas de mitigación del metano entérico.

Además del enfoque en alimentación y sistemas silvopastoriles, se consideró el papel de los subproductos agroindustriales y residuos de cosecha en la nutrición animal y su potencial como herramientas sostenibles para reducir emisiones. En este sentido, se evaluaron experiencias en el aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía, fertilización de suelos y como insumos alternativos en la dieta de rumiantes.

Fuentes de información y criterios de selección

La búsqueda de información se realizó utilizando bases de datos científicas reconocidas como Scopus, Web of Science, Google Scholar, SciELO y PubMed, empleando palabras clave como: metano entérico, rumiantes, silvopastoreo, nutrición animal, fermentación ruminal, aditivos naturales, alimentación de precisión, y mitigación de gases de efecto invernadero.

Los criterios de inclusión para los documentos seleccionados fueron: publicaciones entre 2018 y 2024, relevancia temática en el contexto de la ganadería tropical, rigor metodológico y aplicabilidad de las estrategias propuestas. Se excluyeron estudios que no contaran con revisión por pares o cuya información no estuviera alineada con el objetivo del presente análisis.

3. RESULTADOS

El sector agropecuario enfrenta múltiples desafíos en el contexto actual, influenciado por factores económicos, ambientales y sociales. Según Lara Haro et al. [16], la crisis sanitaria del COVID-19 impactó significativamente este sector en Ecuador, afectando las ventas debido a restricciones en el transporte, reducción de la demanda y contracción del comercio internacional. En este sentido, la implementación de estrategias sostenibles, como los sistemas silvopastoriles, cobra especial relevancia para mitigar tanto los impactos ambientales como económicos. A largo plazo, el crecimiento del PIB agropecuario está influenciado por variables como el PIB nacional, las exportaciones y el financiamiento; sin embargo, en el corto plazo, el comercio internacional puede ejercer una influencia negativa [17].

Dentro de las alternativas sostenibles, la incorporación de especies arbóreas forrajeras como *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* en la alimentación de rumiantes



ha demostrado un efecto positivo para reducir las emisiones de metano. Estas especies contienen taninos y saponinas, metabolitos secundarios que modulan la fermentación ruminal, reduciendo la actividad de las arqueas metanogénicas y redirigiendo el hidrógeno hacia la producción de ácido propiónico. Además, su aporte de proteína de sobrepaso mejora el aprovechamiento del nitrógeno, incrementando la eficiencia productiva y fomentando sistemas ganaderos más sostenibles [18].

El crecimiento exponencial de la población mundial ha incrementado la demanda alimentaria, lo que ha derivado en una mayor generación de residuos de cosecha y subproductos agroindustriales. En 2022, la producción mundial de carne alcanzó los 274,274 miles de toneladas, de las cuales aproximadamente el 95 % se destinó al consumo, representando cerca del 8 % del total de la masa alimentaria global [19]. En este contexto, la mitigación de emisiones de metano en el sector agropecuario es fundamental, promoviendo prácticas como el manejo eficiente del ganado, el uso de sistemas silvopastoriles, la optimización de la alimentación animal y el tratamiento adecuado de residuos orgánicos. Estas acciones contribuyen a la lucha contra el cambio climático y fortalecen la competitividad del sector en mercados globales.

Por otro lado, el cambio climático y las actividades humanas adversas afectan la fertilidad del suelo, provocando escasez de alimentos y pérdida de biodiversidad. Shehzad y Khan [20] destacan que la financiación para la conservación de la biodiversidad puede fortalecer el sector agrícola y contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 15 (vida terrestre), ODS 2 (hambre cero) y ODS 13 (acción por el clima).

Para reducir las emisiones de metano en la ganadería, se han desarrollado múltiples estrategias. Vargas-Ortiz et al. [21] evidencian que la inclusión de *Acacia mearnsii* en las dietas de rumiantes, en niveles del 20 % y 40 %, especialmente en este último, disminuye la producción de metano al limitar la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos metanogénicos gracias a los taninos presentes. Sin embargo, niveles elevados pueden afectar la digestibilidad de la materia seca y orgánica, disminuyendo la eficiencia digestiva y la producción animal.

Complementariamente, se han explorado prácticas como el uso de aceites esenciales, taninos y

probióticos. Króliczewska et al. [22] indican que los probióticos modulan la microbiota ruminal para favorecer la producción de ácido propiónico en lugar de metano, reduciendo significativamente las emisiones de CH₄. De manera similar, un estudio reciente con ovinos criollos alimentados con un 20 % de *Acacia mearnsii* mostró una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero y una mejora en la digestibilidad in vivo de la materia seca y orgánica, favoreciendo así una ganadería más sostenible [23].

La bioaumentación con bacterias homoacetogénicas surge como una estrategia innovadora para mitigar la producción de metano. Karekar y Ahring [24] demostraron que cepas como *Acetobacterium woodii* y un consorcio bacteriano aislado de heces de crías de canguro compiten con los metanógenos por el hidrógeno, desviando el flujo hacia la acetogénesis y reduciendo la generación de CH₄. Esta técnica aumentó la fermentación y la producción de ácidos grasos volátiles, especialmente acetato, sin comprometer la digestión ruminal.

Finalmente, la adopción de sistemas de ganadería de precisión facilita el monitoreo y análisis del comportamiento, consumo y salud del ganado, permitiendo decisiones informadas que mejoran la productividad y disminuyen las emisiones de metano. Papadopoulos et al. [13] reportan incrementos en productividad del 15 %, reducciones en el consumo energético del 35 % y disminución del desperdicio de alimentos en un 75 %, traducándose en una reducción del potencial de calentamiento global hasta en un 5,83 %.

En conclusión, la reducción de las emisiones de metano del ganado es esencial para mitigar el impacto ambiental del sector. El estudio sobre accesibilidad vial de sistemas silvopastoriles en Manabí revela que, si bien el 45% de las áreas se concentra cerca de las carreteras, la sostenibilidad ganadera requiere combinar mejoras en conectividad con tecnologías adaptativas. Esta integración es crucial para reducir las emisiones de metano y desarrollar una producción ganadera resiliente al cambio climático. [25].

Tabla 1. Principales estrategias para la reducción de metano en sistemas agropecuarios.



Estrategia	Características Principales	Método	Autor
Sistemas silvopastoriles	Integración de árboles forrajeros para reducir emisiones de metano y mejorar eficiencia productiva.	Incorporación de especies arbóreas en sistemas ganaderos.	Narváez J.P.. (2018) [18].
Inclusión de Acacia mearnsii (AM) en la dieta	Disminución de metano por efecto de los taninos sobre la microbiota ruminal.	Suplementación con AM en dietas de rumiantes (20-40%).	Córdova F. S. et al. (2025) [23].
Uso de probióticos	Modulación de microbiota ruminal para reducir metano y mejorar digestibilidad.	Inclusión de probióticos en la alimentación animal.	Króliczewska et al. (2023) [22].
Bioaugmentación con bacterias homoacetogénicas	Competencia con metanógenos para reducir metano en rumiantes.	Introducción de <i>Acetobacterium woodii</i> y consorcios bacterianos.	Karekar y Ahring (2023) [24].
Sistemas de precisión en ganadería	Optimización del manejo del ganado mediante monitoreo y análisis de datos.	Uso de sensores y análisis de datos para mejorar eficiencia.	Papadopoulos et al. (2025) [13].

La Tabla 1 presenta diversas estrategias para mitigar las emisiones de metano en la ganadería, incluyendo sistemas silvopastoriles, manejo eficiente del ganado, incorporación de pastos y forrajes de calidad, así como la implementación de sistemas de precisión. Estas prácticas no solo

mejoran la eficiencia productiva, sino que también contribuyen significativamente a reducir el impacto ambiental del sector.

4. DISCUSIÓN (O ANÁLISIS DE RESULTADOS)

Los resultados de esta revisión evidencian que la mitigación del metano entérico en la ganadería requiere un enfoque integral que aborde simultáneamente los desafíos ambientales, económicos y sociales del sector. En contextos como el ecuatoriano, donde la vulnerabilidad del sector agropecuario se vio acentuada por la crisis sanitaria del COVID-19, se vuelve imperativo fortalecer sistemas resilientes que aseguren la sostenibilidad productiva. En este sentido, los sistemas silvopastoriles emergen como una estrategia eficaz, no solo para reducir emisiones de metano, sino también para diversificar la producción, mejorar el bienestar animal y contribuir a la estabilidad económica de los productores.

La incorporación de especies forrajeras con compuestos bioactivos, como taninos y saponinas, en la dieta de rumiantes, ha demostrado ser una herramienta prometedora para la modulación de la fermentación ruminal. Plantas como *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* han mostrado efectos positivos en la reducción de metano sin comprometer significativamente la productividad animal. Sin embargo, como lo demuestran estudios con *Acacia mearnsii*, es necesario encontrar un equilibrio adecuado en la inclusión de estas especies para evitar efectos adversos en la digestibilidad de la fibra y la eficiencia energética de la dieta.

Asimismo, el aumento en la demanda mundial de carne y la generación de subproductos agroindustriales ofrecen oportunidades para integrar residuos orgánicos como insumos nutricionales. Este enfoque no solo disminuye el desperdicio, sino que también puede contribuir a mitigar las emisiones de metano si se implementan estrategias adecuadas de formulación y manejo.

Desde la perspectiva biotecnológica, la suplementación con probióticos, levaduras y bacterias homoacetogénicas representa un avance en la manipulación de la microbiota ruminal. Estas prácticas permiten redirigir los flujos de hidrógeno hacia rutas no metanogénicas, manteniendo una fermentación eficiente y estable. Su integración con prácticas tradicionales de manejo alimenticio



representa una vía prometedora hacia sistemas más sostenibles.

Por otro lado, las tecnologías de precisión están revolucionando el monitoreo y la gestión del ganado. El uso de sensores y plataformas digitales permite la recolección y análisis en tiempo real de parámetros clave, optimizando decisiones nutricionales y sanitarias. Estas herramientas contribuyen a reducir la huella ambiental de la ganadería al mejorar la eficiencia del sistema productivo, y al mismo tiempo, permiten individualizar estrategias de mitigación.

En conjunto, los hallazgos subrayan la necesidad de articular la nutrición, la biotecnología y la digitalización en la implementación de estrategias de mitigación. No obstante, la efectividad de estas acciones dependerá en gran medida de su aceptación por parte de los productores, la disponibilidad de incentivos y políticas públicas que promuevan su adopción, y la capacitación técnica que asegure su correcta implementación. En este sentido, es crucial que futuras investigaciones y programas de extensión incluyan componentes socioeconómicos y de transferencia tecnológica que garanticen la escalabilidad y sostenibilidad de estas prácticas en diferentes contextos ganaderos.

5. CONCLUSIÓN

La ganadería enfrenta el desafío urgente de reducir sus emisiones de metano sin comprometer la productividad animal. Esta revisión evidencia que la mitigación efectiva requiere un enfoque integral que combine estrategias nutricionales, tecnológicas y de manejo.

Desde el punto de vista nutricional, la inclusión de especies forrajeras con compuestos bioactivos como taninos y saponinas demuestra un alto potencial para modular la fermentación ruminal y reducir la generación de metano. Sin embargo, su aplicación debe considerar cuidadosamente el equilibrio entre la eficiencia digestiva y la reducción de emisiones. De igual forma, la suplementación con concentrados, el uso de aditivos como probióticos y la manipulación del tamaño de partícula de los alimentos ofrecen alternativas viables para mejorar la eficiencia alimentaria y disminuir las pérdidas energéticas por metano.

A nivel tecnológico, la implementación de herramientas de ganadería de precisión permite monitorear parámetros productivos y ambientales en

tiempo real, facilitando la toma de decisiones informadas y sostenibles. Esta innovación resulta esencial para optimizar el rendimiento y reducir el impacto ecológico del sector.

Por su parte, los sistemas silvopastoriles destacan como una estrategia integral al combinar beneficios ecológicos, económicos y sociales. Estos sistemas no solo favorecen la captura de carbono y la biodiversidad, sino que también fortalecen la resiliencia de los sistemas productivos ante escenarios adversos como los evidenciados durante la pandemia de COVID-19.

Finalmente, se concluye que la integración de prácticas sostenibles debe ir acompañada de políticas públicas inclusivas, incentivos económicos, y programas de capacitación técnica para los productores. Solo a través de una acción coordinada entre ciencia, tecnología y gestión del conocimiento será posible avanzar hacia una ganadería climáticamente inteligente, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al equipo de investigadores por su valiosa contribución en el desarrollo de este trabajo, así como por el compromiso demostrado durante el proceso de revisión y análisis. Asimismo, se reconoce el respaldo institucional brindado a través de la alianza estratégica entre la Universidad de Guayaquil y el Instituto Superior Tecnológico Carlos Cisneros, la cual ha sido fundamental para el fortalecimiento de la investigación y la generación de conocimiento aplicado en beneficio del sector agropecuario.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Ku-Vera, O. A. Castelán-Ortega, F. A. Galindo-Maldonado, J. Arango, N. Chirinda, R. Jiménez-Ocampo, S. S. Valencia-Salazar, E. J. Flores-Santiago, M. D. Montoya-Flores, I. C. Molina-Botero, A. T. Piñeiro-Vázquez, J. I. Arceo-Castillo, C. F. Aguilar-Pérez, L. Ramírez-Avilés, and F. J. Solorio-Sánchez, "Review: Strategies for enteric methane mitigation in cattle fed tropical forages," *Animal*, vol. 14, Suppl. 3, pp. s453–s463, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731120001780>
- [2] K. P. Tigmasa Paredes, "Contribución de las emisiones de gas metano producidas por el ganado



bovino al cambio climático”, *Rías*, vol. 5, p. e215, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.46380/rias.vol5.e215>

[3] A. Georganas, P. Kyriakaki, E. Giamouri, A. Mavrommatis, E. Tsiplakou, and A. C. Pappas, “Mediterranean agro-industrial by-products and food waste in pig and chicken diets: Which way forward?,” *Livest. Sci.*, vol. 289, p. 105584, 2024, ISSN: 1871-1413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2024.105584>

[4] F. Miranda, “Gestión sostenible de residuos agroindustriales y economía circular en países en desarrollo,” *Revista Latinoamericana de Economía Circular*, vol. 5, no. 1, pp. 45-59, 2022. DOI: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2477-90752022000100001

[5] K. Sokal and M. Kachel, “Impacto de la agricultura en las emisiones de gases de efecto invernadero: una revisión,” *Energies*, vol. 18, no. 9, p. 2272, 2025. [Online]. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092272>

[6] B. K. Thirunagari, R. Kumar, and S. H. Kota, “Assessing and mitigating India’s agricultural emissions: A regional and temporal perspective on crop residue, tillage, and livestock contributions,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 488, p. 137407, 2025, ISSN: 0304-3894. [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137407>

[7] E. D. C. Cavalcanti, E. C. G. Aguiéiras, M. F. S. Mota, P. R. da Silva, R. Fernandez-Lafuente, A. M. de Castro, and D. M. G. Freire, “Use of *Rhizomucor miehei* fermented babassu cake (an agro-product residue) as efficient biocatalyst for macaúba acid oil deacidification in solvent-free medium: Transforming a non-edible crop product in a favourable biodiesel feedstock,” *Process Biochem.*, vol. 148, pp. 176–182, 2025, ISSN: 1359-5113. [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.11.018>

[8] J. C. Carmona, D. M. Bolívar, and L. A. Giraldo, “El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo,” *Rev. Colomb. Cienc. Pecu.*, vol. 18, no. 1, pp. 49–63, 2005. DOI: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-06902005000100006

[9] J. L. Lerma-Lasso, P. P. Bacca-Acosta, B. G. Obando-Enríquez, E. Castro-Rincón, and J. L. Cardona-Iglesias, “Sistemas silvopastoriles: una opción para la sostenibilidad de los sistemas ganaderos de alta montaña,” *Pastos y Forrajes*, vol. 46, pp. 1–9, 2023. DOI: <https://www.redalyc.org/journal/2691/269176991015/>

[10] J.A. Alayón, “Estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en la ganadería,” *Agro Productividad*, vol. 11, no. 2, 2018. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i2.112>

[11] Y. Choi, S. J. Lee, H. S. Kim, J. S. Eom, S. U. Jo, L. L. Guan, T. Park, J. Seo, Y. Lee, D. Bae, and S. S. Lee, “Red seaweed extracts reduce methane production by altering rumen fermentation and microbial composition in vitro,” *Front. Vet. Sci.*, vol. 9, Art. no. 985824, 2022. [Online]. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.985824>

[12] Ramos J.O. Condiciones de alimentación en ganado bovino para disminuir las emisiones de Metano en el contexto nariñense. [online]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/25168>.

[13] G. Papadopoulos, M.-Z. Papantonatou, H. Uyar, O. Kriezi, A. Mavrommatis, V. Psiroukis, A. Kasimati, E. Tsiplakou, and S. Fountas, “Economic and environmental benefits of digital agricultural technological solutions in livestock farming: A review,” *Smart Agricultural Technology*, vol. 10, p. 100783, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100783>

[14] E. Giamouri, F. Zisis, C. Mitsiopolou, C. Christodoulou, A. C. Pappas, P. E. Simitzis, C. Kamilaris, F. Galliou, T. Manios, A. Mavrommatis, and E. Tsiplakou, “Estrategias sostenibles para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la cría de pequeños rumiantes,” *Sustainability*, vol. 15, no. 5, p. 4118, 2023, DOI: <https://doi.org/10.3390/su15054118>

[15] D. J. Bonilla-Sandí, L. Noboa-Jiménez, V. Portuguese-Molina, F. Quinto-Ureña, and J. J. Rojas-Gutiérrez, “Metanogénesis microbiana en animales poligástricos,” *Rev. Nat.*, vol. 14, no. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v14i1.42578>

[16] D. M. Lara Haro, L. A. . Argothy Almeida, J. P. . Martínez Mesías, y M. A. Mejía Chávez, “El impacto



de las crisis en el desempeño del sector agropecuario del Ecuador”, *Finanz. polit. econ*, vol. 14, n.º 1, feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.v14.n1.2022.7>

[17] AF . Núñez-Naranjo, DML . Haro, JPM . Mesías, y MJS . Sarzosa, “Tamaño y crecimiento de las empresas en el sector comercial de Ecuador: Un análisis desde una perspectiva de economía industrial”, *JoE* , vol. 3, n.º 6, págs. 2051–2064, sep. 2024. DOI: <https://doi.org/10.62754/joe.v3i6.4159>

[18] Narváez J. P. Especies forrajeras, arbóreas y arbustivas con efectos potenciales sobre la disminución de las emisiones de metano en bovinos. [online]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13219>.

[19] K. P. G. Hernández, O. F. P. Rebolledo, and A. C. G. Casillas, "Producción y comercio de la carne en el mundo y en México," *Sociedades Rurales*, Producción y Medio Ambiente, vol. 23, no. 46, pp. 135–156, 2023.

[20] A. Shehzad and K. I. Khan, “Time traveling through research: Bibliometric analysis of biodiversity finance in agricultural sector for SDGs,” *J. Agric. Food Res.*, vol. 18, Art. no. 101485, 2024. DOI: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122436/records/675c0be1d569cb0574844f20>

[21] L. Vargas-Ortiz, V. Andrade-Yucailla, M. A. Barros-Rodríguez, R. Lima-Orozco, E. Macías-Rodríguez, K. Contreras-Barros, C. Guishca-Cunuhay, and A. Z. M. Salem, “Rumen function and in vitro gas production of diets influenced by two levels of tannin-rich forage,” *Fermentation*, vol. 8, no. 11, art. 607, 2022, DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation8110607>

[22] B. Króliczewska, E. Pecka-Kielb, and J. Bujok, "Estrategias para reducir las emisiones de metano de los rumiantes: Controversias y problemas," *Agriculture*, vol. 13, no. 3, p. 602, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030602>

[23] F. S. Córdova Frías, L. M. Vargas Ortiz, M. S. Carrera Romo, y L. E. Pavón Ramirez, “Evaluación de la Digestibilidad in Vivo de Dietas con Follaje de Acacia Mearnsii en Ovinos Criollos”, *Ciencia Latina*,

vol. 8, n.º 6, pp. 8487-8500, ene. 2025. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15550

[24] S. C. Karekar and B. K. Ahring, “Reducing methane production from rumen cultures by bioaugmentation with homoacetogenic bacteria,” *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 47, art. no. 102526, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102526>

[25] González-Puetate, M. Morocho-Rodríguez, C. Álvarez-Guillén, y E. Cervantes-Cevallos, “Sostenibilidad productiva y accesibilidad vial en sistemas silvopastoriles con pastos cultivados en Manabí”, *Pentaciencias*, vol. 7, n.º 4, pp. 458–466, ago. 2025., DOI: <https://doi.org/10.59169/pentaciencias.v7i4.1604>

