



# Huella de carbono en sistemas de producción lechera de la Amazonía ecuatoriana y sostenibilidad ganadera

*Carbon footprint in dairy production systems of the Ecuadorian Amazon and livestock sustainability*

**Natali Silvana Casigña Guaman** 

Universidad Estatal Amazónica, Ecuador  
[ns.casignaguaman@uea.edu.ec](mailto:ns.casignaguaman@uea.edu.ec)

**Bryan Rafael Chicaiza Morales** 

Universidad Estatal Amazónica, Ecuador  
[br.chicaizam@uea.edu.ec](mailto:br.chicaizam@uea.edu.ec)

**Edgar Rubén Chicaiza Reisancho** 

Universidad Estatal Amazónica, Ecuador  
[echicaiza@uea.edu.ec](mailto:echicaiza@uea.edu.ec)

**Pablo Ernesto Arias** 

Universidad Estatal Amazónica, Ecuador  
[parias@uea.edu.ec](mailto:parias@uea.edu.ec)

## Resumen

La presente investigación analiza la contribución de la producción lechera tropical y amazónica a las emisiones de gases de efecto invernadero y su relación con la huella de carbono, con especial énfasis en la Amazonía ecuatoriana. Mediante una revisión bibliográfica sistemática, se integraron evidencias de estudios basados en análisis de ciclo de vida (LCA), inventarios de emisiones y modelos de mitigación aplicados a contextos tropicales. Los resultados demuestran que el metano entérico derivado de la fermentación ruminal y el manejo de estiércol constituyen las principales fuentes de emisiones directas, mientras que las fases de procesamiento, transporte y energía indirecta incrementan significativamente la huella final del producto. Asimismo, se identificaron prácticas ganaderas sostenibles —como la mejora de la eficiencia alimentaria, el manejo de pasturas, la digestión anaerobia y el uso de aditivos naturales— con alto potencial de reducción de emisiones sin comprometer la productividad. Se concluye que la sostenibilidad del sector lechero en la Amazonía requiere metodologías regionalizadas, calibración de factores de emisión, y políticas que integren innovación tecnológica, gobernanza ambiental y participación comunitaria.

**Palabras clave:** huella de carbono, producción lechera, Amazonía ecuatoriana, gases de efecto invernadero, sostenibilidad, análisis de ciclo de vida.

Recibido: 29-09-2025

Aceptado: 5-10-2025

Publicado: 12-10-2025



## Abstract

This research examines the contribution of tropical and Amazonian dairy production to greenhouse gas emissions and its relationship with the carbon footprint, with a specific focus on the Ecuadorian Amazon. Through a systematic literature review, evidence from studies employing life cycle assessment (LCA), emission inventories, and mitigation models adapted to tropical contexts was integrated. The findings reveal that enteric methane from ruminal fermentation and manure management are the main sources of direct emissions, while processing, transport, and indirect energy use substantially increase the product's total carbon footprint. Moreover, sustainable livestock practices—such as improving feed efficiency, pasture management, anaerobic digestion, and the use of natural additives—show high potential to reduce emissions without compromising productivity. It is concluded that the sustainability of the dairy sector in the Amazon depends on regionally adapted methodologies, calibrated emission factors, and policies that combine technological innovation, environmental governance, and community participation.

**Key Words:** carbon footprint, dairy production, Ecuadorian Amazon, greenhouse gases, sustainability, life cycle assessment.

## Introducción

La producción lechera constituye una de las principales actividades agropecuarias a nivel mundial y representa una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente de metano (CH<sub>4</sub>), derivado tanto de la fermentación entérica de los rumiantes como de la gestión del estiércol. Diversos estudios (Franca et al., 2024; Ibidhi et al., 2021; Donadia et al., 2023) coinciden en que las emisiones asociadas a la producción y procesamiento de leche contribuyen de manera importante a la huella de carbono global del sector agropecuario. La magnitud de estas emisiones depende en gran medida de la eficiencia productiva, las prácticas de manejo, la composición de la dieta del ganado y las características de la cadena de suministro.

La literatura reciente enfatiza que las emisiones por litro de leche o por unidad de producto no sólo provienen de fuentes directas —como el metano entérico y las emisiones por gestión de estiércol—, sino también de fuentes indirectas relacionadas



con la producción de alimentos para el ganado, el transporte y el procesamiento de productos lácteos (Liu et al., 2021; McCabe et al., 2023). En este contexto, la huella de carbono se consolida como un indicador clave para evaluar el impacto ambiental de la ganadería, al integrar todas las etapas del ciclo de vida del producto (Kebreab et al., 2021; Baruselli et al., 2023).

Los esfuerzos de mitigación han mostrado que es posible reducir la intensidad de GEI por litro de leche sin comprometer la productividad, mediante mejoras en la eficiencia alimentaria, la incorporación de aditivos que modulan la fermentación ruminal y un manejo más sostenible de las pasturas (Tynan et al., 2023; Vijn et al., 2020). Asimismo, el desarrollo de metodologías más precisas para calcular las emisiones, como los análisis de ciclo de vida (LCA) o los factores de emisión específicos por país, permite estimaciones más realistas y comparables a nivel regional (Donadia et al., 2023; Bi & Neethirajan, 2024).

En el caso de la Amazonía ecuatoriana, el estudio de la huella de carbono asociada a la producción lechera adquiere particular relevancia por las condiciones ecológicas y productivas únicas de la región. Este territorio alberga ecosistemas de alta biodiversidad que cumplen funciones críticas de captura de carbono y regulación climática (Bueno et al., 2021; Casagrande et al., 2023). Sin embargo, la expansión ganadera ha sido identificada como uno de los principales motores de deforestación, lo que intensifica las emisiones y compromete la sostenibilidad ambiental (Fearnside, 2005; Ziccardi et al., 2024).

A pesar de estas presiones, la Amazonía ecuatoriana también presenta oportunidades para la transición hacia una ganadería más sostenible. La incorporación de sistemas silvopastoriles, el uso de forrajes mejorados y la adopción de prácticas agroforestales han demostrado potencial para aumentar la productividad y reducir la intensidad de emisiones por unidad de leche (Enciso et al., 2021; Facchinelli et al., 2019). Estas estrategias, combinadas con una gobernanza ambiental que promueva acuerdos de cero deforestaciones y una mayor integración entre sectores público y privado, resultan esenciales para conciliar los objetivos de desarrollo productivo y conservación de ecosistemas (Santos & Costa, 2018; Finer & Orta-Martínez, 2010).

En este marco, la evaluación de la huella de carbono en la producción lechera amazónica ecuatoriana se presenta como un paso clave para comprender los impactos ambientales



del sector y orientar la adopción de prácticas sostenibles. Analizar la relación entre productividad, emisiones y sostenibilidad permitirá generar evidencia científica que contribuya a diseñar estrategias de mitigación adecuadas al contexto ecológico y socioeconómico de la región.

### Figura 1.

Ganadería lechera en paisajes amazónicos



**Fuente:** Encircle Photos, *Cattle Grazing in Amazon Rainforest, Manaus*, (disponible en: <https://encirclephotos.com>).

### Metodología

El análisis se basó en la identificación, comparación y síntesis de metodologías empleadas en la literatura científica para estimar la huella de carbono en sistemas de producción lechera, con énfasis en contextos tropicales y amazónicos. Se revisaron fuentes académicas indexadas en bases de datos internacionales (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Scite.ai) y documentos técnicos de organismos especializados, priorizando estudios publicados entre 2010 y 2024. Los criterios de selección consideraron investigaciones que aplicaran enfoques cuantitativos de estimación de gases de efecto invernadero (GEI) y que abordaran la relación entre productividad ganadera y sostenibilidad ambiental en zonas tropicales o amazónicas.

El enfoque metodológico predominante identificado en la literatura es el Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés), reconocido como la herramienta estándar



para cuantificar la huella de carbono de los productos lácteos. Este método permite estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente a lo largo de todas las etapas del sistema, desde la producción primaria hasta el procesamiento y distribución del producto (Bava et al., 2014; Romano et al., 2021; Milani et al., 2011). Los estudios revisados destacan que las fronteras del sistema (por ejemplo, *cradle-to-farm gate* o *cradle-to-product*) y la definición de la unidad funcional (kg CO<sub>2</sub>e por kg o litro de leche) son determinantes para la interpretación de los resultados.

En contextos tropicales, los LCAs incorporan factores específicos como la variabilidad climática, la composición de los forrajes locales y la estacionalidad de la producción, lo que exige adaptar los modelos de inventario y los factores de emisión a condiciones regionales (Hernández-Castellano et al., 2019; Rotz, 2018). Además de las emisiones directas por fermentación entérica y manejo de estiércol, se incluyen las emisiones indirectas derivadas de la producción de alimentos para el ganado, el uso de energía en el procesamiento y el transporte, lo que permite una visión integral del impacto ambiental del sistema lechero (Romano et al., 2021; González-Quintero et al., 2024).

Para complementar el enfoque LCA, algunos estudios aplican modelos de simulación y herramientas parciales de evaluación de emisiones, útiles para explorar escenarios de mitigación y analizar la influencia de la eficiencia alimentaria y el manejo de estiércol sobre la intensidad de GEI (Rotz et al., 2010; Triky & Kissinger, 2022). Asimismo, la literatura resalta la importancia de usar datos locales y regionales para reducir la incertidumbre en los inventarios y reflejar con mayor precisión las prácticas agropecuarias propias de los ecosistemas tropicales.

Finalmente, se consideraron los principios metodológicos sugeridos por los estudios revisados para la evaluación práctica de la huella de carbono:

1. Definir el alcance y la frontera del sistema según las condiciones del contexto amazónico.
2. Establecer la unidad funcional apropiada y los métodos de asignación cuando existan coproductos.
3. Incorporar datos empíricos de eficiencia alimentaria, manejo de estiércol y uso de forrajes tropicales.



4. Considerar métricas alternativas de calentamiento global (como GWP\*), especialmente relevantes para el metano.
5. Evaluar escenarios de mitigación y reportar la incertidumbre asociada a los resultados.

En conjunto, las metodologías empleadas evidencian la necesidad de adaptar los enfoques de estimación de la huella de carbono a las condiciones productivas, ecológicas y sociales de la Amazonía ecuatoriana, con el fin de generar resultados robustos que orienten políticas de sostenibilidad y estrategias de mitigación específicas para el sector lechero tropical (Bava et al., 2014; Romano et al., 2021; Hernández-Castellano et al., 2019; Milani et al., 2011).

## Resultados del análisis

**Tabla 1.**

Métricas de metano entérico en bovinos lecheros (Niu et al., 2018)

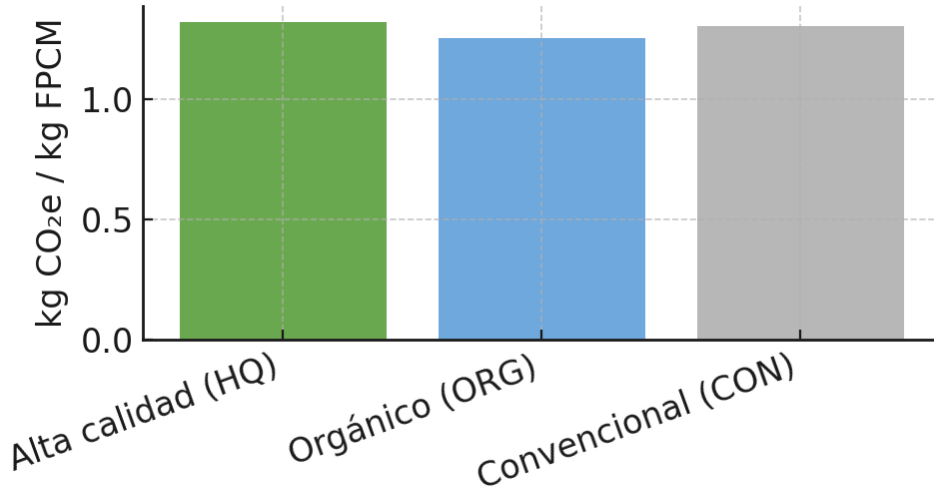
Región/Dataset	CH <sub>4</sub> producción (g/día)	CH <sub>4</sub> /DMI (g/kg)	CH <sub>4</sub> /ECM (g/kg)	Y <sub>m</sub> (%)
Intercontinental	369.0	20.1	13.5	6.0
Europa (UE)	392.7	19.6	13.4	5.8
Estados Unidos	382.0	22.5	14.2	6.1

La tabla presenta las métricas de producción y eficiencia de metano entérico en bovinos lecheros. Incluye valores promedio por región, expresados en gramos por día, gramos por kilogramo de materia seca ingerida (DMI), gramos por kilogramo de leche corregida por energía (ECM) y porcentaje de Y<sub>m</sub>, que representa la fracción de energía bruta convertida en metano. Los datos comparan tres contextos productivos (intercontinental, europeo y estadounidense) para ilustrar variaciones en la intensidad de emisiones según el tipo de dieta y manejo.



**Figura 2.**

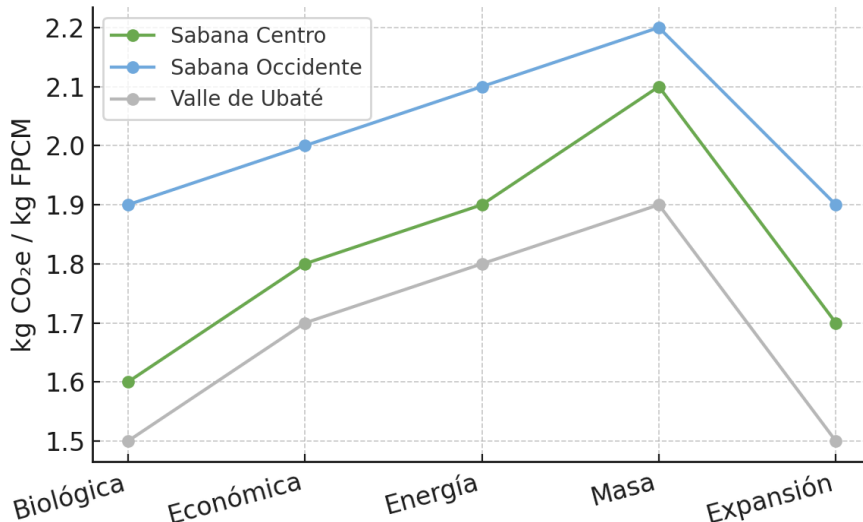
Huella de carbono por sistema productivo (Romano et al., 2021)



La figura muestra la huella de carbono promedio (expresada como kg de CO<sub>2</sub> equivalente por kg de leche corregida por grasa y proteína – FPCM) para tres tipos de sistemas productivos: alta calidad (HQ), orgánico (ORG) y convencional (CON). Los valores reflejan las diferencias en eficiencia energética y manejo de recursos entre modalidades productivas, observándose valores similares en los tres sistemas con ligeras variaciones atribuibles a prácticas de manejo específicas.

**Figura 3.**

Huella de carbono por método de asignación y región (González-Quintero et al., 2024)





El gráfico compara la huella de carbono promedio (kg CO<sub>2</sub>e/kg FPCM) obtenida mediante distintos métodos de asignación (biológica, económica, energética, por masa y por expansión del sistema) en tres regiones productoras: Sabana Centro, Sabana Occidente y Valle de Ubaté. Cada línea representa el comportamiento de los valores en una región, permitiendo visualizar las variaciones metodológicas y geográficas en la estimación de la huella.

**Tabla 2.**

Mitigación de CH<sub>4</sub> con *Asparagopsis taxiformis* (Roque et al., 2021)

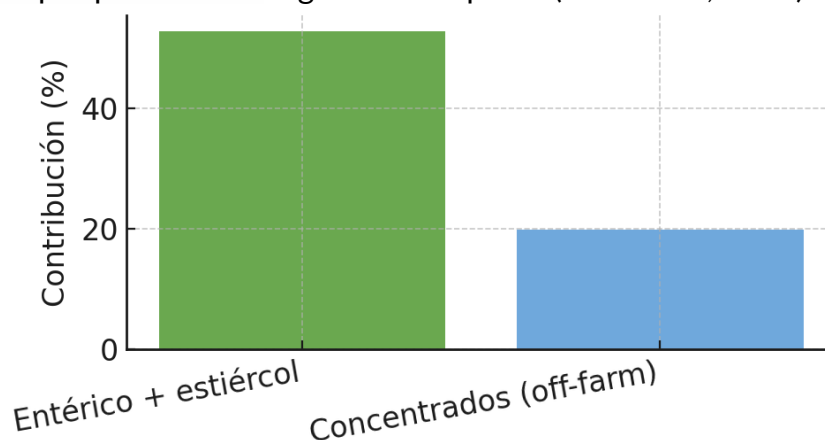
Tratamiento/Dieta	Reducción CH <sub>4</sub> (%)	Cambio DMI (%)	Cambio FCE (%)
Baja inclusión (LOW)	45.0	-8.0	7.0
Alta inclusión (HIGH)	68.0	-14.0	14.0
LOW - TMR bajo forraje	69.8	nan	nan
HIGH - TMR alto forraje	80.0	nan	nan

La tabla resume los resultados de los ensayos experimentales sobre la reducción de metano (CH<sub>4</sub>) en bovinos lecheros alimentados con diferentes niveles de inclusión de la macroalga *Asparagopsis taxiformis*. Se indican los porcentajes de reducción de CH<sub>4</sub>, así como los cambios en el consumo de materia seca (DMI) y en la eficiencia alimenticia (FCE). Los tratamientos de alta inclusión muestran reducciones más marcadas en CH<sub>4</sub>, con variaciones en los indicadores de eficiencia.



**Figura 4.**

Contribuciones por proceso a categorías de impacto (Bava et al., 2014)



La figura ilustra la proporción de contribución de los principales procesos productivos a la categoría de impacto de potencial de calentamiento global (GWP). Se destaca la alta participación de las emisiones entéricas y del manejo de estiércol, seguidas por los aportes de los concentrados producidos fuera de la finca (off-farm). Estos valores reflejan la estructura típica de las fuentes de emisión dentro de los sistemas lecheros evaluados mediante análisis de ciclo de vida.

## Discusión

La Tabla, Métricas de metano entérico en bovinos lecheros (Niu et al., 2018) evidencia que la intensidad de  $\text{CH}_4$  por leche ( $\text{g CH}_4/\text{kg ECM}$ ) varía entre conjuntos regionales próximos, y que los indicadores ligados a la ingesta y a la eficiencia ( $\text{CH}_4/\text{DMI}$  y  $Y_m$ ) explican buena parte de esas diferencias. Este patrón respalda la tesis de que, en climas tropicales, la calidad y estacionalidad del forraje y la digestibilidad de la ración son determinantes directos de la intensidad de emisiones por unidad de producto (Niu et al., 2018; Kú-Vera et al., 2020). Para la Amazonía ecuatoriana, donde la base forrajera es muy heterogénea, extrapolar factores genéricos introduce sesgos; de allí la necesidad de calibrar factores regionales para fermentación entérica y manejo de estiércol (Robertson et al., 2015; Henriksson et al., 2011).



La Figura, Huella de carbono por sistema productivo (Romano et al., 2021) muestra valores cercanos entre granjas de “alta calidad”, “orgánicas” y “convencionales”. Esta proximidad sugiere que el rótulo del sistema, por sí solo, no garantiza diferencias significativas si no se armonizan fronteras del sistema y reglas de asignación en el Análisis de Ciclo de Vida (LCA). Estudios comparativos han documentado que cambios modestos en la delimitación —por ejemplo, pasar de cradle-to-farm gate a cradle-to-product— o en la asignación entre coproductos pueden reordenar los resultados (Milani et al., 2011; Romano et al., 2021). En la Amazonía, donde el procesamiento y la logística pueden tener mayor intensidad energética, incorporar fases posgranja es clave para lecturas comparables (Flysjö et al., 2011).

La Figura, Huella de carbono según método de asignación y región (González-Quintero et al., 2024) confirma la sensibilidad metodológica: la elección de asignación (biológica, económica, por energía, por masa o por expansión del sistema) modifica la magnitud y la jerarquía entre regiones. Este hallazgo coincide con evaluaciones que advierten que, en cadenas lácteas con múltiples productos, la regla de asignación puede explicar una fracción relevante de la variabilidad entre estudios (Naranjo et al., 2020; Romano et al., 2021). Para la Amazonía ecuatoriana, estandarizar unidad funcional (p. ej., kg CO<sub>2</sub>e/kg FPCM), fronteras y asignaciones es condición necesaria para establecer líneas base y benchmarking entre cuencas.

La Tabla, Mitigación de CH<sub>4</sub> con *Asparagopsis taxiformis* (Roque et al., 2021) reporta reducciones sustanciales del metano entérico bajo niveles de inclusión crecientes, acompañadas de cambios en consumo de materia seca (DMI) y en eficiencia alimenticia (FCE). El potencial técnico es claro y consistente con revisiones recientes sobre aditivos entéricos (Tynan et al., 2023; Naranjo et al., 2022). Sin embargo, su traslado a condiciones comerciales amazónicas enfrenta cuellos de botella en suministro, regulación, costos y validación de efectos a largo plazo; por tanto, la adopción razonable pasa por pilotos regionales que prueben desempeño con forrajes locales, balances de productividad y compatibilidad con prácticas de bienestar animal.

La Figura, Contribución media a GWP (Bava et al., 2014) muestra la preeminencia de las emisiones en finca (entérico + estiércol) sobre insumos fuera de finca (concentrados), patrón ampliamente descrito en lechería. No obstante, para contextos amazónicos conviene no subestimar la energía indirecta (fertilizantes, maquinaria, frío, procesamiento) y el transporte, cuya participación puede incrementar la huella total cuando las cadenas son geográficamente dispersas o dependen de matrices energéticas



intensivas (Todde et al., 2018; Rotz, 2018). En consecuencia, los inventarios deberían reportar resultados cradle-to-product junto a los cradle-to-farm gate para orientar intervenciones a escala de cadena de valor.

Más allá de las fuentes y procesos, una limitación transversal en la literatura específica de Amazonía es la débil integración del cambio de uso del suelo (ILUC) y de los balances de carbono del ecosistema en las estimaciones de la leche (Place & Mitloehner, 2010; Bauer et al., 2021). Dado el papel de la deforestación y la degradación en subregiones amazónicas, omitir estos componentes puede subestimar la huella real y sesgar comparaciones entre productores. Para Ecuador, integrar silvopastoreo, restauración de áreas degradadas y carbono orgánico del suelo (COS) en la contabilidad permitiría evaluar co-beneficios climáticos y de biodiversidad (Loayza et al., 2020; Morales et al., 2018).

La evidencia apunta a una agenda de trabajo concreta para la Amazonía ecuatoriana: (i) desarrollar LCAs regionalizados con unidades funcionales y fronteras estandarizadas; (ii) calibrar factores de emisión de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O con datos locales de dieta, manejo y clima; (iii) desagregar la huella por fases (granja, transporte, procesamiento) para ubicar puntos críticos; (iv) implementar pilotos en manejo de pasturas, agroforestería y biogás con seguimiento de productividad y emisiones; y (v) vincular estas acciones con instrumentos de gobernanza e incentivos (p. ej., financiamiento climático, certificaciones) ajustados al contexto amazónico (Flysjö et al., 2011; Todde et al., 2018; Guiral, 2023; Constante & Simón-Baile, 2018; Bonifacio et al., 2023).

## Conclusiones

La evidencia muestra que las emisiones asociadas al metano entérico y al manejo de estiércol representan la principal contribución al impacto climático del sector, pero también que existen márgenes claros de mejora mediante la eficiencia productiva, la gestión alimentaria y la integración de prácticas sostenibles. La Amazonía ecuatoriana, por su riqueza ecológica y su fragilidad ambiental, se posiciona como una región clave para demostrar que la ganadería puede coexistir con la conservación si se aplican modelos de manejo basados en conocimiento local, innovación tecnológica y gobernanza participativa.



La revisión comparativa de los métodos utilizados confirma que la falta de estandarización en las unidades funcionales, los límites del sistema y la inclusión de fases posgranja genera una alta variabilidad en los resultados. Esto subraya la urgencia de establecer metodologías adaptadas a las condiciones amazónicas, con datos regionales y factores de emisión calibrados, que permitan elaborar inventarios más precisos y comparables. La aplicación de análisis de ciclo de vida ajustados al contexto tropical no sólo mejoraría la exactitud de las estimaciones, sino que permitiría identificar puntos críticos de mitigación a lo largo de toda la cadena de valor.

Desde una perspectiva crítica, la sostenibilidad de la producción lechera amazónica no puede evaluarse únicamente en términos de eficiencia o productividad, sino también a partir de su relación con la deforestación, la degradación del suelo y la pérdida de servicios ecosistémicos. En este sentido, las estrategias de mitigación deben trascender el ámbito técnico e incorporar dimensiones sociales, culturales y territoriales, fortaleciendo las capacidades locales y los incentivos para la adopción de prácticas de bajo carbono. El futuro de la ganadería amazónica depende, en última instancia, de la capacidad de articular ciencia, política y acción comunitaria en torno a un mismo objetivo: reducir la huella de carbono sin comprometer la seguridad alimentaria ni la integridad ecológica de uno de los ecosistemas más valiosos del planeta.

## Agradecimientos

El autor expresa su profundo agradecimiento a la Universidad Estatal Amazónica (UEA) y al Centro de Investigación, Posgrado y Actualización (CEIPA) por el apoyo institucional brindado durante el desarrollo de esta revisión bibliográfica. Se reconoce el esfuerzo de los investigadores cuyos estudios revisados sirvieron de base para la comprensión integral de la huella de carbono en los sistemas lecheros tropicales y amazónicos.

## Declaraciones

### Contribución del autor

El autor participó en todas las fases del trabajo: concepción, búsqueda bibliográfica, análisis y redacción final del manuscrito.



## Financiación y conflicto de intereses

No se recibió financiación externa y no existen conflictos de intereses que puedan haber influido en el contenido de la investigación.

## Disponibilidad de datos

Toda la información utilizada proviene de fuentes académicas públicas y está debidamente citada.

## Uso de inteligencia artificial

Se emplearon herramientas de inteligencia artificial para apoyar la redacción, organización de referencias y diseño visual, sin intervenir en la interpretación de resultados ni en las conclusiones. El contenido final fue revisado y validado manualmente por el autor.

## Referencias

- Al-Azzawi, M., Bowtell, L., Hancock, K., & Preston, S. (2021). Addition of activated carbon into a cattle diet to mitigate ghg emissions and improve production. *Sustainability*, 13(15), 8254. <https://doi.org/10.3390/su13158254>
- Arima, E., Richards, P., Walker, R., & Caldas, M. (2011). Statistical confirmation of indirect land use change in the brazilian amazon. *Environmental Research Letters*, 6(2), 024010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/024010>
- Baruselli, P., Abreu, L., Paula, V., Carvalho, B., Gricio, E., Mori, F., ... & D'Occhio, M. (2023). Applying assisted reproductive technology and reproductive management to reduce co2-equivalent emission in dairy and beef cattle: a review. *Animal Reproduction*, 20(2). <https://doi.org/10.1590/1984-3143-ar2023-0060>
- Baruselli, P., Abreu, L., Paula, V., Carvalho, B., Gricio, E., Mori, F., ... & D'Occhio, M. (2023). Applying assisted reproductive technology and reproductive management to reduce co2-equivalent emission in dairy and beef cattle: a review. *Animal Reproduction*, 20(2). <https://doi.org/10.1590/1984-3143-ar2023-0060>
- Bava, L., Sandrucci, A., Zucali, M., Guerci, M., & Tamburini, A. (2014). How can farming intensification affect the environmental impact of milk production?. *Journal of Dairy Science*, 97(7), 4579-4593. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7530>



- Bi, H. and Neethirajan, S. (2024). Satellite data and machine learning for benchmarking methane concentrations in the canadian dairy industry. *Sustainability*, 16(23), 10400. <https://doi.org/10.3390/su162310400>
- Bueno, R., Marchetti, L., Coccoza, C., Marchetti, M., & Salbitano, F. (2021). Could cattle ranching and soybean cultivation be sustainable? a systematic review and a meta-analysis for the amazon. *Iforest - Biogeosciences and Forestry*, 14(3), 285-298. <https://doi.org/10.3832/ifer3779-014>
- Casagrande, Y., Wiśniewska, J., Paluszak, G., Mores, G., Moro, L., Malafaia, G., ... & Zhang, D. (2023). Emergent research themes on sustainability in the beef cattle industry in brazil: an integrative literature review. *Sustainability*, 15(5), 4670. <https://doi.org/10.3390/su15054670>
- Cerri, C., Melillo, J., Feigl, B., Píccolo, M., Neill, C., Steudler, P., ... & Bernoux, M. (2005). Recent history of the agriculture of the brazilian amazon basin. *Outlook on Agriculture*, 34(4), 215-223. <https://doi.org/10.5367/000000005775454670>
- Costa - Araújo, R., Silva, L., Melo, F., Rossi, R., Bottan, J., Silva, D., ... & Canale, G. (2022). Primate conservation in the arc of deforestation: a case study of vieira's titi monkey *plecturocebus vieirai*. *Oryx*, 56(6), 837-845. <https://doi.org/10.1017/s003060532100171x>
- Donadia, A., Torres, R., Silva, H., Soares, S., Hoshide, A., & Oliveira, A. (2023). Factors affecting enteric emission methane and predictive models for dairy cows. *Animals*, 13(11), 1857. <https://doi.org/10.3390/ani13111857>
- Enciso, K., Charry, A., Castillo, Á., & Burkart, S. (2021). Ex-ante evaluation of economic impacts of adopting improved forages in the colombian orinoquía. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.673481>
- Facchinelli, F., Pappalardo, S., Codato, D., Diantini, A., Fera, G., Crescini, E., ... & Marchi, M. (2019). Unburnable and unleakable carbon in western amazon: using viirs nightfire data to map gas flaring and policy compliance in the yasuní biosphere reserve. *Sustainability*, 12(1), 58. <https://doi.org/10.3390/su12010058>
- Fearnside, P. (2005). Deforestation in brazilian amazonia: history, rates, and consequences. *Conservation Biology*, 19(3), 680-688. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00697.x>
- Feng, X. and Kebreab, E. (2020). Net reductions in greenhouse gas emissions from feed additive use in california dairy cattle. *Plos One*, 15(9), e0234289. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234289>
- Finer, M. and Orta - Martínez, M. (2010). A second hydrocarbon boom threatens the peruvian amazon: trends, projections, and policy implications. *Environmental Research Letters*, 5(1), 014012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014012>
- Finer, M., Babbitt, B., Novoa, S., Ferrarese, F., Pappalardo, S., Marchi, M., ... & Kumar, A. (2015). Future of oil and gas development in the western amazon. *Environmental Research Letters*, 10(2), 024003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024003>
- Finer, M., Jenkins, C., Pimm, S., Keane, B., & Ross, C. (2008). Oil and gas projects in the western amazon: threats to wilderness, biodiversity, and indigenous peoples. *Plos One*, 3(8), e2932. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002932>



- Franca, A., Aguiar, A., Pessôa, M., Neto, J., & Pacca, S. (2024). Preparing for net zero greenhouse gas emissions in 2050: lifecycle emissions of dairy products in Brazil. *Brazilian Journal of Development*, 10(11), e74538. <https://doi.org/10.34117/bjdv10n11-020>
- Geough, E., Little, S., Janzen, H., McAllister, T., McGinn, S., & Beauchemin, K. (2012). Life-cycle assessment of greenhouse gas emissions from dairy production in eastern Canada: a case study. *Journal of Dairy Science*, 95(9), 5164-5175. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-5229>
- González-Quintero, R., Sierra-Alarcón, A., Benavides-Cruz, J., & Mogollón, O. (2024). The contribution of local shrubs to the carbon footprint reduction of traditional dairy systems in Cundinamarca, Colombia. *Agroforestry Systems*, 98(4), 873-890. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-00958-z>
- Habimana, V., Nguluma, A., Nziku, Z., Ekine-Dzivenu, C., Morota, G., Mrode, R., ... & Chenyambuga, S. (2023). Heat stress effects on milk yield traits and metabolites and mitigation strategies for dairy cattle breeds reared in tropical and sub-tropical countries. *Frontiers in Veterinary Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1121499>
- Hernández-Castellano, L., Nally, J., Lindahl, J., Wanapat, M., Alhidary, I., Fanguero, D., ... & Almeida, A. (2019). Dairy science and health in the tropics: challenges and opportunities for the next decades. *Tropical Animal Health and Production*, 51(5), 1009-1017. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-01866-6>
- Hirsch, A., Little, W., Houghton, R., Scott, N., & White, J. (2004). The net carbon flux due to deforestation and forest regrowth in the Brazilian Amazon: analysis using a process-based model. *Global Change Biology*, 10(5), 908-924. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00765.x>
- Ibidhi, R., Kim, T., Bharanidharan, R., Lee, H., Lee, Y., Kim, N., ... & Kim, K. (2021). Developing country-specific methane emission factors and carbon fluxes from enteric fermentation in South Korean dairy cattle production. *Sustainability*, 13(16), 9133. <https://doi.org/10.3390/su13169133>
- Ibidhi, R., Kim, T., Bharanidharan, R., Lee, H., Lee, Y., Kim, N., ... & Kim, K. (2021). Developing country-specific methane emission factors and carbon fluxes from enteric fermentation in South Korean dairy cattle production. *Sustainability*, 13(16), 9133. <https://doi.org/10.3390/su13169133>
- Islam, M., Kim, S., Son, A., Lee, S., & Lee, S. (2022). Breed and season-specific methane conversion factors influence methane emission factor for enteric methane of dairy steers. *Sustainability*, 14(12), 7030. <https://doi.org/10.3390/su14127030>
- Kamalanathan, S., Houlahan, K., Miglior, F., Chud, T., Seymour, D., Hailemariam, D., ... & Schenkel, F. (2023). Genetic analysis of methane emission traits in Holstein dairy cattle. *Animals*, 13(8), 1308. <https://doi.org/10.3390/ani13081308>
- Kebreab, E., Honan, M., Roque, B., & Tricárico, J. (2021). 245 greenhouse gas emissions mitigation strategies. *Journal of Animal Science*, 99(Supplement\_3), 195-196. <https://doi.org/10.1093/jas/skab235.353>
- Kú-Vera, J., Ortega, O., Galindo-Maldonado, F., Arango, J., Chirinda, N., Jiménez-Ocampo, R., ... & Solorio-Sánchez, F. (2020). Review: strategies for enteric methane mitigation in cattle fed tropical forages. *Animal*, 14, s453-s463. <https://doi.org/10.1017/s1751731120001780>



- Liu, S., Proudman, J., & Mitloehner, F. (2021). Rethinking methane from animal agriculture. *Cabi Agriculture and Bioscience*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s43170-021-00041-y>
- Lobo, F., Filho, P., Novo, E., Carlos, F., & Barbosa, C. (2018). Mapping mining areas in the brazilian amazon using msi/sentinel-2 imagery (2017). *Remote Sensing*, 10(8), 1178. <https://doi.org/10.3390/rs10081178>
- McCabe, C., El - Mashad, H., & Mitloehner, F. (2023). The path to climate neutrality for california dairies. *Cab Reviews Perspectives in Agriculture Veterinary Science Nutrition and Natural Resources*. <https://doi.org/10.1079/cabreviews.2023.0015>
- McKenna, P. and Banwart, S. (2024). Reassessing the warming impact of methane emissions from irish livestock using gwp\*: historical trends and sustainable futures. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 62(1). <https://doi.org/10.15212/ijafr-2023-0107>
- Mestanza-Ramón, C., Cuenca-Cumbicus, J., D'Orio, G., Flores-Toala, J., Segovia-Cáceres, S., Bonilla-Bonilla, A., ... & Straface, S. (2022). Gold mining in the amazon region of ecuador: history and a review of its socio-environmental impacts. *Land*, 11(2), 221. <https://doi.org/10.3390/land11020221>
- Milani, F., Nutter, D., & Thoma, G. (2011). Invited review: environmental impacts of dairy processing and products: a review. *Journal of Dairy Science*, 94(9), 4243-4254. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3955>
- Naranjo, A., Johnson, A., Rossow, H., & Kebreab, E. (2020). Greenhouse gas, water, and land footprint per unit of production of the california dairy industry over 50 years. *Journal of Dairy Science*, 103(4), 3760-3773. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16576>
- Naranjo, A., Sieverding, H., Clay, D., & Kebreab, E. (2022). Carbon footprint of south dakota dairy production system and assessment of mitigation options.. <https://doi.org/10.1101/2022.05.16.492173>
- Niu, M., Kebreab, E., Hristov, A., Oh, J., Arndt, C., Bannink, A., ... & Yu, Z. (2018). Prediction of enteric methane production, yield, and intensity in dairy cattle using an intercontinental database. *Global Change Biology*, 24(8), 3368-3389. <https://doi.org/10.1111/gcb.14094>
- Ogino, A., Hirooka, H., Ikeguchi, A., Tanaka, Y., Waki, M., Yokoyama, H., ... & Kawashima, T. (2007). Environmental impact evaluation of feeds prepared from food residues using life cycle assessment. *Journal of Environmental Quality*, 36(4), 1061-1068. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0326>
- Oldekop, J., Bebbington, A., Truelove, N., Holmes, G., Villamarín - Cortez, S., & Preziosi, R. (2012). Environmental impacts and scarcity perception influence local institutions in indigenous amazonian kichwa communities. *Human Ecology*, 40(1), 101-115. <https://doi.org/10.1007/s10745-011-9455-2>
- Pereira, R., Simmons, C., & Walker, R. (2016). Smallholders, agrarian reform, and globalization in the brazilian amazon: cattle versus the environment. *Land*, 5(3), 24. <https://doi.org/10.3390/land5030024>



- Romano, E., Roma, R., Tidona, F., Giraffa, G., & Bragaglio, A. (2021). Dairy farms and life cycle assessment (lca): the allocation criterion useful to estimate undesirable products. *Sustainability*, 13(8), 4354. <https://doi.org/10.3390/su13084354>
- Romero-Pérez, A., Okine, E., McGinn, S., Guan, L., Oba, M., Duval, S., ... & Beauchemin, K. (2015). Sustained reduction in methane production from long-term addition of 3-nitrooxypropanol to a beef cattle diet<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science*, 93(4), 1780-1791. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8726>
- Roque, B., Venegas, M., Kinley, R., Nys, R., Duarte, T., Yang, X., ... & Kebreab, E. (2021). Red seaweed (*asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *Plos One*, 16(3), e0247820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>
- Rotz, C. (2018). Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 101(7), 6675-6690. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13272>
- Rotz, C., Montes, F., & Chianese, D. (2010). The carbon footprint of dairy production systems through partial life cycle assessment. *Journal of Dairy Science*, 93(3), 1266-1282. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2162>
- Santos, A. and Costa, M. (2018). Do large slaughterhouses promote sustainable intensification of cattle ranching in amazonia and the cerrado?. *Sustainability*, 10(9), 3266. <https://doi.org/10.3390/su10093266>
- Tricárico, J., Haas, Y., Hristov, A., Kebreab, E., Kurt, T., Mitloehner, F., ... & Pitta, D. (2022). Symposium review: development of a funding program to support research on enteric methane mitigation from ruminants. *Journal of Dairy Science*, 105(10), 8535-8542. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21397>
- Triky, S. and Kissinger, M. (2022). An integrated analysis of dairy farming: direct and indirect environmental interactions in challenging bio-physical conditions. *Agriculture*, 12(4), 480. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040480>
- Tynan, M., Bryant, M., Welsh, R., & Greenwood, S. (2023). Preliminary findings of northeast organic and conventional dairy farmers' perception of benefits and challenges in feeding algae. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 38. <https://doi.org/10.1017/s1742170523000157>
- Tynan, M., Bryant, M., Welsh, R., & Greenwood, S. (2023). Preliminary findings of northeast organic and conventional dairy farmers' perception of benefits and challenges in feeding algae. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 38. <https://doi.org/10.1017/s1742170523000157>
- Vijn, S., Compart, D., Dutta, N., Foukis, A., Hess, M., Hristov, A., ... & Kurt, T. (2020). Key considerations for the use of seaweed to reduce enteric methane emissions from cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.597430>
- Vijn, S., Compart, D., Dutta, N., Foukis, A., Hess, M., Hristov, A., ... & Kurt, T. (2020). Key considerations for the use of seaweed to reduce enteric methane emissions from cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.597430>
- Vries, M., Zahra, W., Wouters, A., Middelaar, C., Oosting, S., Tiesnamurti, B., ... & Vellinga, T. (2019). Entry points for reduction of greenhouse gas emissions in small-scale dairy farms: looking beyond milk yield increase. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00049>



- Webb, J., Mainville, N., Mergler, D., Lucotte, M., Betancourt, Ó., Davidson, R., ... & Quizhpe, E. (2004). Mercury in fish-eating communities of the andean amazon, napo river valley, ecuador. *Ecohealth*, 1(S2), SU59-SU71. <https://doi.org/10.1007/s10393-004-0063-0>
- Wyngaard, J., Meeske, R., & Erasmus, L. (2018). Effect of dietary nitrate on enteric methane emissions, production performance and rumen fermentation of dairy cows grazing kikuyu-dominant pasture during summer. *Animal Feed Science and Technology*, 244, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.08.005>
- Ye, X., Sahana, G., Lund, M., Li, B., & Cai, Z. (2025). Network analyses unraveled the complex interactions in the rumen microbiota associated with methane emission in dairy cattle. *Animal Microbiome*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s42523-025-00386-z>
- Zhao, R., Yao, X., WEN, X., Zhang, N., & CAI, J. (2017). Carbon footprint assessment for a local branded pure milk product: a lifecycle based approach. *Food Science and Technology*, 38(1), 98-105. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.02717>
- Ziccardi, L., Yanai, A., Fearnside, P., & Stark, S. (2024). Deforestation in the brazilian amazon: threats and opportunities.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4591425/v1>