



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

CENTRO ACADÉMICO Y DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS, SOCIALES
Y TECNOLÓGICAS DE LA AGROINDUSTRIA

Y LA AGRICULTURA MUNDIAL

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ESTRATEGIA AGROEMPRESARIAL

**Balance del carbono equivalente en la producción de carne de bovino en
México**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN ESTRATEGIA AGROEMPRESARIAL

Presenta:

SAULO ACEVEDO CRUZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. JUAN ANTONIO LEOS RODRÍGUEZ



Chapingo, Estado de México, 8 de septiembre de 2026

BALANCE DEL CARBONO EQUIVALENTE EN LA PRODUCCIÓN DE CARNE
DE BOVINO EN MÉXICO, Tesis realizada por **SAULO ACEVEDO CRUZ**, bajo la
supervisión del comité indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN ESTRATEGIA AGROEMPRESARIAL

DIRECTOR:  _____

DR. JUAN ANTONIO LEOS RODRÍGUEZ

CO-DIRECTORA:  _____

DRA. VICTORIA PACHECO ALMARAZ

ASESOR:  _____

DR. RAFAEL NÚÑEZ DOMÍNGUEZ

ASESOR:  _____

DR. ENRIQUE GENARO MARTÍNEZ GONZÁLEZ

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	v
ABREVIATURAS UTILIZADAS	vii
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	x
RESUMEN GENERAL	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Justificación del Problema	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4 Preguntas de Investigación	5
1.5 Hipótesis	6
1.6 Estructura de la tesis	6
1.7. Literatura citada	8
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	10
2.1 Marco teórico y conceptual	10
2.1.1 Teoría del cambio climático	10
2.1. 2 Teoría de la sostenibilidad	11
2.1. 3 Teoría del metabolismo social	11
2.1. 4. Ciclo del carbono	12
2.1.5 Huella de Carbono	13
2.1. 6 Sistemas agropecuarios sostenibles	13
2.2 Marco referencial	14

2.2.1 Producción mundial de carne de bovino	14
2.2.2 Producción nacional de carne de bovino	15
2.2.4 Consumo mundial de carne de bovino.....	16
2.2.5 Consumo nacional de carne de bovino.....	16
2.2.6 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por la ganadería bovina	17
2.3 Literatura citada	18
CAPÍTULO 3. CURRENT STATE OF RESEARCH ON THE CLIMATE CHANGE- LIVESTOCK RELATIONSHIP; A BIBLIOMETRIC REVIEW.....	20
Summary	20
Keywords.....	20
Resumen	2
Palabras Clave.....	2
Introducción	2
Metodología	3
Origen de la información	3
Sistematización de la información	4
Resultados y discusión.....	5
Número de artículos publicados	5
Número de autores por documento	7
Redes de investigación (Co-ocurrencia)	7
Evolución del abordaje del tema	8
Redes de colaboración (países-autores-instituciones)	9
Tendencias de investigación	10
Conclusiones	11
Agradecimientos	12
Funding	12
Conflict of interest statement.....	12
Compliance with ethical standards	12
Data availability	12
Author Contribution Statement (Credit)	12

Referencias	13
CAPÍTULO 4 BALANCE DE CARBONO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CARNE BOVINA EN MÉXICO	18
Abstract	19
Palabras clave.....	19
Kw	19
4.1 Introducción	20
4.2 Metodología	22
4.2.1.Origen de la información	22
4.2.2 Sistematización de la información	23
4.3 Resultados y discusión	26
4.3.1 Caracterización de las unidades de producción.....	26
4.3.2 Estimación de emisiones.....	33
4.3.3.Estimación de captura	36
4.3.4 Balance	39
4.4 Conclusiones	40
4.5 Literatura citada	42
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES.....	47

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.Estrategia de búsqueda en repositorio.	3
Cuadro 2.Indicadores analizados.....	5
Cuadro 3. Fórmulas para cálculo de emisiones de GEI en bovinos para carne.	
.....	24
Cuadro 4. Caracterización de los sistemas de producción bovina evaluados.	
.....	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de estructura de la tesis.	7
Figura 2. Balanza comercial mundial de la producción de carne de bovino.	15
Figura 3. Producción de carne de bovino por estados.	16

Figura 4. Esquema de búsqueda en la base de datos Scopus.	4
Figura 5. Número de artículos publicados en el período 1994-2024 que abordan la relación cambio climático-ganadería.	6
Figura 6. Número de artículos a lo largo de tres décadas.....	7
Figura 7. Áreas temáticas en torno a la relación cambio climático-ganadería.	8
Figura 8. Evolución del abordaje de clústeres temáticos relacionados con cambio climático-ganadería.	9
Figura 9. Diagrama Sankey de las redes de colaboración (países-autores- instituciones).	10
Figura 10. Evolución de términos clave en el tema.	11
Figura 11. Uso de suelo y vegetación de Playa Vicente, Veracruz.....	28
Figura 12. Uso de suelo y vegetación de Jesús Carranza, Veracruz.	29
Figura 13. Valores de NDVI para las categorías de uso de Suelo y vegetación de Playa Vicente, Veracruz.	30
Figura 14. Valores de NDVI para las categorías de uso de Suelo y vegetación de Jesús Carranza, Veracruz.....	31
Figura 15. Suelos presentes en Playa Vicente Veracruz.....	32
Figura 16. Suelos presentes en Jesús Carranza, Veracruz.	32
Figura 17. Emisiones totales por ha.	34
Figura 18. Emisiones por cabeza (kg CO ₂ e /cabeza /año).	35
Figura 19. Emisiones por kilogramo de carne (kgCO ₂ e /kg /año).....	35
Figura 20. Distribución porcentual y absoluta del carbono total almacenado en sistemas de producción extensivos.	37
Figura 21. Captura por unidad animal.	38
Figura 22. Captura por producto terminado.	38
Figura 23. Emisiones de GEI y captura de carbono (kg de CO ₂ e) por kg carne producida (la distancia vertical representa el balance neto).	40

ABREVIATURAS UTILIZADAS

GEI	Gases de Efecto Invernadero
IPPC	Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio el Climático
CC	Cambio Climático
CO _{2e}	Carbono Equivalente
KG/Pv	Kilogramos de Peso Vivo

DEDICATORIA

A lo que personalmente defino como la energía del amor; Dios.

A mi familia, por ser la fuente de inspiración para todos los días tratar de ser mejor.

A Lupita, por nunca dejarme solo y por tu disposición a avanzar juntos.

A mis amigos, por siempre estar para una buena charla.

A mis sobrinos, porque con su esencia tierna e inocente me motivan a ser mejor persona.

A Sansa y a Cato, Compañeros inseparables en las mañanas que esta tesis se escribió.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) madre protectora y compaciente que me permitió ampliar el horizonte en mis pretensiones académicas y de vida.

Al Centro Académico y de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM) porque contribuyó al llenado de mi caja de herramientas que van moldeando mi vida académica.

Al Dr. Juan Antonio Leos Rodríguez, por sus consejos, por confiar en mí y por no rendirse a pesar de las circunstancias y llegar conmigo hasta el final.

A la Dra. Victoria Pacheco Almaraz, por acompañarme desde el inicio hasta el final, su guía por esta aventura marcó la diferencia, por su paciencia y por la disposición para siempre escucharme y hacer equipo.

Al Dr. Rafael Núñez Domínguez, por ser una referencia e inspiración en el ejercicio de la ciencia animal.

Al Dr. Enrique Genaro Martínez González, por ser un guía en el fabuloso mundo de la ciencia y por siempre inspirarme para seguir avanzando.

A las unidades de producción que fueron estudiadas y en general a quienes día con día realizan la noble labor de producir alimentos para la humanidad.

DATOS BIOGRÁFICOS

Saulo Acevedo-Cruz nació el 28 de marzo de 1998 en Cadereyta de Montes, Querétaro, México. Sus estudios de preparatoria los realizó en la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, es Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia por la misma Universidad. En el proceso de formación formó parte del programa MAST internacional de la Universidad de Minnesota realizando prácticas profesionales en la empresa Moreno Ranches INC en los estados de Texas y Florida, EE.UU.

De 2024 a 2026 fue estudiante de Maestría en Ciencias en Estrategia Agroempresarial en el CIESTAAM en donde fue autor de dos artículos de investigación y participó en las ediciones 2025 y 2026 del Congreso Internacional y Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas en la modalidad de ponente. También participó como ponente en el XXI Congreso Internacional de Ciencias Sociales Interdisciplinarias en Galway, Irlanda.



RESUMEN GENERAL

Balance del Carbono equivalente en la producción de Carne de Bovino en México¹

La producción de carne de bovino en México, además de su importancia económica y social, se encuentra bajo escrutinio debido a su impacto ambiental, principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). **El objetivo** de esta investigación fue analizar el balance de carbono equivalente en la producción bovina mexicana con el fin de comprender su papel en la dinámica del cambio climático y explorar alternativas para una ganadería más sostenible y carbono neutro. **Para ello**, se delimitó el estado actual y las tendencias de investigación sobre la relación cambio climático- ganadería, al mismo tiempo se analizó la dinámica de emisiones y captura de carbono en la producción de carne bovina en México, según el marco Tier 2 del IPCC y análisis de uso de suelo. **Los resultados muestran que**, el interés científico se centra en el análisis del cambio climático y agricultura, prácticas agrícolas-ganaderas y emisiones de GEI y en la reducción de emisiones-captura de carbono a partir de los sistemas ganaderos, pasando de centrarse en la parte negativa de las actividades primarias y la presencia de carbono en el planeta, a examinarlo como estrategia de mitigación del cambio climático. Un kilogramo de carne producida en sistemas intensivos emite 11 kg CO₂e mientras que para los sistemas extensivos este valor es de 23 kg CO₂e, el metano (CH₄) es la principal fuente, a través de los procesos de fermentación entérica. En los sistemas extensivos se capturan 327 kg CO₂e de los cuales el 99% corresponde al carbono almacenado en el suelo. Los sistemas 2 y 3 superan la neutralidad de carbono, por lo que pueden ser calificados como sistemas de carne carbono negativa. **Se concluye que**, la promoción de sistemas ganaderos sostenibles puede contribuir a mitigar el impacto ambiental y brindar resiliencia frente al cambio climático y que la eficiencia productiva se traduce en mejoras en la generación de servicios ecosistémicos y sostenibilidad ambiental. Esta investigación contribuye a productores, investigadores y tomadores de decisión para impulsar una ganadería con menor huella de carbono.

Palabras clave: Cambio climático, ganadería sostenible, bibliometría, huella de carbono, eficiencia productiva.

¹Tesis de Maestría en Estrategia Agroempresarial,
Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Saulo Acevedo Cruz
Director de tesis: Dr. Juan Antonio Leos Rodríguez

ABSTRACT

Carbon Equivalent Balance in Beef Production in Mexico

Beef production in Mexico, in addition to its economic and social importance, is under scrutiny due to its environmental impact, primarily greenhouse gas (GHG) emissions. The objective of this research is to analyze the carbon equivalent balance in Mexican beef production in order to understand its role in climate change dynamics and explore alternatives for more sustainable and carbon-neutral livestock farming. To this end, the current state and research trends regarding the relationship between climate change and livestock farming were outlined, while the dynamics of carbon emissions and sequestration in Mexican beef production were analyzed according to the IPCC's Tier 2 framework and land-use analysis. The results show that scientific interest is focused on the analysis of climate change and agriculture, agricultural and livestock practices, and GHG emissions, as well as on reducing emissions and enhancing carbon sequestration through livestock systems—shifting from a focus on the negative aspects of primary activities and the presence of carbon on the planet to examining it as a climate change mitigation strategy. One kilogram of meat produced in intensive systems emits 11 kg CO₂e, while for extensive systems this value is 23 kg CO₂e, with methane (CH₄) being the main source through enteric fermentation processes. In extensive systems, 327 kg CO₂e are sequestered, 99% of which corresponds to carbon stored in the soil. Systems 2 and 3 exceed carbon neutrality and can therefore be classified as carbon-negative beef production systems. It is concluded that promoting sustainable livestock systems can help mitigate environmental impact and build resilience to climate change, and that production efficiency translates into improvements in the provision of ecosystem services and environmental sustainability. This research assists producers, researchers, and decision-makers in advancing livestock production with a lower carbon footprint.

Keywords: Climate change, sustainable livestock farming, bibliometrics, carbon footprint, production efficiency.

¹Tesis of Maestría en Estrategia Agroempresarial,

Universidad Autónoma Chapingo

Author: Saulo Acevedo Cruz

Advisor: Dr. Juan Antonio Leos Rodríguez

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La relación entre la ganadería y el cambio climático es compleja, ya que la actividad ganadera no solo contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también sufre sus efectos (Lorente, 2010). Las principales fuentes de emisiones en este sector incluyen los procesos digestivos de los animales como la fermentación entérica, la gestión de excretas y las modificaciones en el uso del suelo principalmente lo relacionado a la tala indiscriminada para la apertura de nuevas tierras de pastoreo (Jaurena et al., 2021)

Por otro lado, un sector de la ganadería considera que esta pudiera ser un medio para contribuir en la mitigación del fenómeno del cambio climático con la implementación de ganadería extensiva como una alternativa resiliente ante los embates del cambio climático mediante la inclusión de sistemas silvopastoriles, pastoreo controlado y una gestión eficiente de los recursos con los que se cuenta (Pateiro et al., 2020).

Arango et al., (2020) sostienen que enfrentar los estragos ambientales que pueda generar la actividad ganadera es incluso un tema de política pública a nivel regional para los países de Latinoamérica, ya que tratados internacionales como el Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), obligan a estos a establecer una serie de medidas legislativas que ayuden a disminuir el impacto ambiental negativo con el medio ambiente.

Para el caso concreto de México a nivel de país no se cuenta con una regulación específica en cuestión de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por parte de la ganadería; sin embargo, algunos estados como Nuevo León han dado pasos importantes en esta materia con la promulgación de la “*Ley de Cambio Climático del estado de Nuevo León*” en la cual se plantean una serie de estrategias encaminadas a legislar y disminuir las emisiones de GEI en el sector pecuario.

El incremento en el consumo y la demanda de productos de origen animal (particularmente del ganado bovino) a nivel mundial, ha ocasionado que la producción de satisfactores provenientes de la industria pecuaria aumenten (Constantini et al, 2018) y al mismo tiempo la cantidad de animales requeridos para cumplir con esta demanda impactando directamente en la cantidad de emisiones.

De acuerdo con lo proyectado por la OCDE y la FAO el ingreso económico ya no es un factor que defina las preferencias de consumo de las personas, para el caso de la carne ya se habla de algunos otros factores que determinan el consumo o no de esta, entre los que destacan temas relacionados con la salud humana, el bienestar de los animales de los cuales se obtendrá la carne y el impacto ambiental que la producción cárnica genera (FIRA, 2024).

En un contexto global Estados Unidos se consolida como el principal consumidor de carne de Bovino a nivel mundial, seguido de China, Brasil, la Unión Europea e India respectivamente (Consejo Mexicano de la Carne, (COMECARNE) 2024). Brasil es el principal exportador mundial de carne de bovino en el mundo, esto gracias a las condiciones idóneas para realizar ganadería en sistemas extensivos, la actividad ganadera representa aproximadamente el 20% de su PIB nacional (Marafon et al., 2021).

México ocupa el lugar número siete entre los mayores países productores de carne, sin embargo, se consolida como el principal exportador de ganado en pie del mundo, teniendo como socio principal a los estados unidos (FIRA, 2024). Además, es el país número siete entre los principales productores de carne de Bovino en el mundo, mostrando incluso un superávit de producción de este producto (COMECARNE, 2024).

1.1 Planteamiento del problema

El consumo de carne por los humanos representa un elemento propio de su evolución, así como del desarrollo de las habilidades cognitivas, formando parte de su dieta desde hace más de tres millones de años (Arias et al., 2022). Sin embargo, actualmente la producción ganadera es objeto de presión mundial, tanto por los

potenciales daños a la salud, como por sus contribuciones negativas al clima debido a las emisiones de GEI.

La ganadería ocupa aproximadamente el 30% de la superficie terrestre entre el área destinada al pastoreo, las zonas donde se asientan las unidades de producción pecuaria y aquella que está destinada a la agricultura para la producción de materia primas utilizadas en la alimentación animal (FAO, 2026), ya que, la producción de alimentos de origen animal demanda un número elevado de recursos naturales en el planeta, siendo es un tema preocupante que obliga a la población a la búsqueda de las denominadas fuentes alternativas de proteínas (Flachowsky et al., 2018).

El papel de la ganadería en el mundo es de suma importancia, debido a que la sustitución en su totalidad de las fuentes de proteína no es viable en cuanto a volumen de producción. Sin embargo, la industria de la producción de proteínas alternativas cuenta con importante financiamiento para su desarrollo y se proyecta que alcancen ingresos por concepto de producción de al menos 1.2 billones de dólares para el año 2030 con un crecimiento anual del 15.8% (Hefferon et al., 2023), obligando a cambiar la forma de producción ganadera actual.

Ante este escenario la búsqueda urgente de soluciones conjuntas entre la sociedad, el gobierno, las instituciones y la industria es importante, para proponer formas diferentes de producción cárnica bajo un enfoque de sostenibilidad y armonía con el ambiente. En México la producción ganadera genera aproximadamente 25 millones de toneladas, con un valor en el mercado de 850,000 millones de dólares, lo que representa aproximadamente el tres por ciento del PIB nacional (CNOG, 2024).

Lo anterior refleja la importancia económica de esta actividad primaria, que actualmente es objeto de estigmatización debido a sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que contribuyen al cambio acelerado del clima; dando pie a la creación de leyes y reglamentos que lejos de incentivar la producción pecuaria desde un punto de vista sostenible, limitan sus fronteras de acción mediante instrumentos como la *“Ley de Cambio Climático del estado de Nuevo León”* que en

el apartado 6.3.5 establece promover la sustitución de ganado bovino por ganado avícola y porcino.

Actualmente, el sector productivo ha generado una serie de manifiestos donde discuten, argumentan y proponen alternativas a la producción de carne de bovino en México tal y como se conoce hoy en día, siendo la transición hacia sistemas sostenibles con carbono neutro una alternativa recurrente, hecho que justifica la pertinencia de esta investigación.

1.2 Justificación del Problema

La producción de carne de bovino en México es una actividad relevante económicamente, ya que, en el año 2014 contribuyó con el 39% del Producto Interno Bruto Agropecuario (PIBA) (Urrutia et al., 2017), además es una fuente importante de empleos para las personas del sector rural. Sin embargo, es objeto de señalamientos por el impacto ambiental que genera, destacando principalmente la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) como el metano (CH₄) dióxido de carbono (CO₂) y el óxido nitroso (N₂O).

Determinar el balance de carbono en la producción de carne de bovino permite comparar las emisiones de GEI contra las capacidades de captura y almacenamiento de carbono dentro de los sistemas productivos, para comprender el papel que juega cada actor en esta cadena productiva. Se destaca la existencia de compromisos de carácter internacional con respecto a la reducción de las emisiones y la lucha contra el cambio climático, de modo que contar con información confiable ampliará la frontera de acción por parte de la ganadería en cuestiones ambientales, con prácticas que cuiden el suelo, la biodiversidad y el fortalecimiento de la resiliencia en las actividades del sector primario.

La importancia de esta investigación reside en convertirse en un instrumento clave como fuente de información válida, precisa y confiable a productores y “tomadores de decisiones” facilitando así el diseño, la implementación y la evaluación de políticas públicas que logren impactar de manera positiva en todas las aristas del problema.

1.3 Objetivos

En el siguiente apartado se desglosan el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación.

1.3.1 Objetivo general

Analizar la dinámica actual del balance de carbono en la producción de carne de bovino en México, basados en la relación ganadería-cambio climático y el balance de carbono en algunos eslabones de la cadena productiva de la carne de bovino para contribuir en la transición hacia una producción con carbono neutro.

1.3.2. Objetivos específicos

- i. Conocer el estado actual de la investigación de la relación entre el cambio climático y la ganadería, mediante una revisión bibliométrica, para detectar las posibles líneas de investigación pertinentes de abordar.
- ii. Calcular el balance de carbono en la producción de la carne de bovino, mediante el cálculo de inventarios de GEI y Sistemas de Información Geográfica, para contribuir en la transición hacia una producción de carne de bovino con carbono neutro.
- III. Proponer acciones encaminadas hacia modelos de producción sostenibles o con carbono neutro.

1.4 Preguntas de Investigación

- I. ¿Cuál es el estado actual de la investigación en torno a la relación entre el cambio climático y la ganadería?
- II. ¿Cómo es el balance de carbono en la producción de la carne de bovino, en México?
- III. ¿Qué acciones pueden conducir hacia modelos de producción sostenibles o con carbono neutro?

1.5 Hipótesis

- i) La investigación en torno a la relación entre el cambio climático y la ganadería se centra en la crisis del sector, debido a sus emisiones de GEI.
- ii) El balance de carbono en la producción de la carne de bovino, en México contribuye positivamente a la dinámica actual del cambio climático.
- IV. La atención en la eficiencia productiva de los sistemas de producción bovina conduce a modelos sostenibles o con carbono neutro.

1.6 Estructura de la tesis

A continuación, se presenta un esquema que sintetiza la estructura general de la tesis y la articulación de sus principales componentes. Dicho esquema permite visualizar de manera integral la secuencia y relación entre los apartados que conforman la investigación (Figura 1).

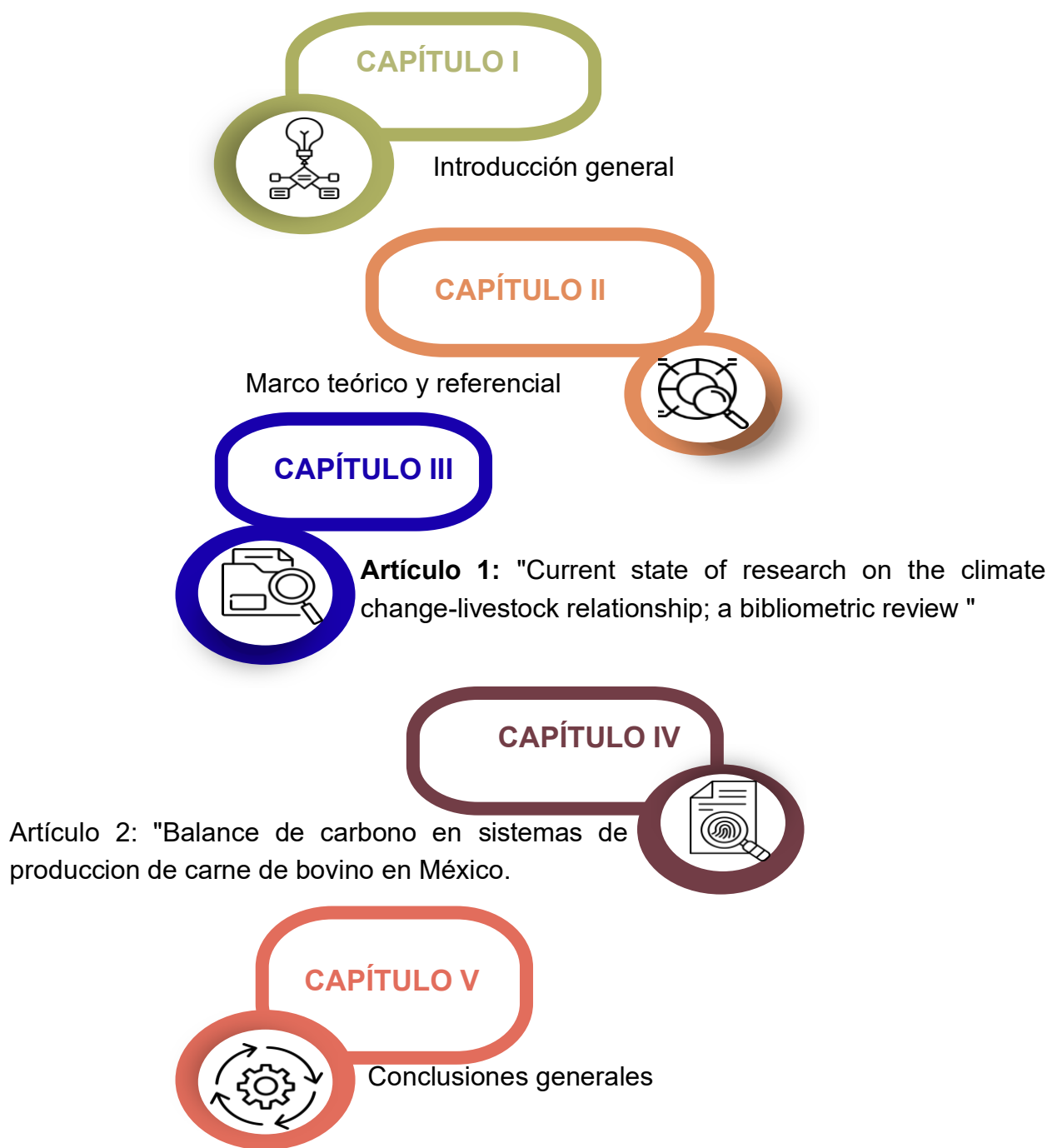


Figura 1. Esquema de estructura de la tesis.

Fuente: Elaboración propia.

1.7. Literatura citada

- Arango, J., Ruden, A., Martinez-Baron, D., Loboguerrero, A. M., Berndt, A., Chacón, M., Torres, C. F., Oyhantcabal, W., Gomez, C. A., Ricci, P., Ku-Vera, J., Burkart, S., Moorby, J. M., & Chirinda, N. (2020). Ambition Meets Reality: Achieving GHG Emission Reduction Targets in the Livestock Sector of Latin America. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00065>
- Arias, R., Velásquez, A., Morales, R., & Alvarado-Gilis, C. (2022). La carne bovina como parte de una dieta saludable. Una revisión. *Agro Sur*, 50(1), 21–30. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2022.v50n1-03>
- Confederación Nacional de Organizaciones Ganaderas (CNOG). (2024). CNOG solicita pausa en importación de ganado para prevenir brotes del gusano barrenador. Ganadería.com. <https://www.ganaderia.com/destacado/cnog-solicita-pausa-en-importacion-de-ganado-para-prevenir-brotes-del-gusano-barrenador>
- Consejo Mexicano de la Carne (COMECARNE). (2024). Compendio estadístico 2024. COMECARNE. <https://comecarne.org/articulos/compendio-estadistico-2024>
- Costantini, A. O., Perez, M. G., Busto, M., González, F., Cosentino, V., Romaniuk, R., & Taboada, M. A. (2018). Emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera. *Ciencia e Investigación*, 68(5), 47–54.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2026). The power of forests. *Unasylva: Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*. FAO. <https://www.fao.org/forestry/unasylva>
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2024). *Panorama Agroalimentario. Carne de bovino 2024*. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. FIRA. fira.gob.mx
- Flachowsky, G., Meyer, U., & Südekum, K. H. (2018). Invited review: Resource inputs and land, water and carbon footprints from the production of edible protein of animal

origin. In *Archives Animal Breeding* (Vol. 61, Number 1, pp. 17–36). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/aab-61-17-2018>

Hefferon, K. L., De Steur, H., Perez-Cueto, F. J. A., & Herring, R. (2023). Alternative protein innovations and challenges for industry and consumer: an initial overview. In *Frontiers in Sustainable Food Systems* (Vol. 7). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1038286>

Lorente Saiz, A. (2010). Ganadería y cambio climático: una influencia recíproca. *GeoGraphos. Revista Digital para Estudiantes de Geografía y Ciencias Sociales*, Vol. 1, n. 3, 1–22.

Marafon, A. L. de O., Barbosa, A., Santos, R. L. dos, Brito, T. L. de, Fernandes, F. H., & Silva, R. L. da. (2021). O CRESCIMENTO DAS EXPORTAÇÕES DE CARNE BOVINA PARA ECONOMIA BRASILEIRA. *REVISTA FIMCA*, 7(3), 37–38. <https://doi.org/10.37157/fimca.v7i3.135>

Pateiro, M., Munekata, P. E. S., Domínguez, R., & Lorenzo, J. M. (2020). Extensive livestock farming against climate change in Spain. *ITEA Informacion Tecnica Economica Agraria*, 116(5), 444–460. <https://doi.org/10.12706/itea.2020.024>

Steinfeld Henning, Gerber Pierre, Wassenaar Tom, Castel Vincent, Rosales Mauricio, & de Haan Cees. (2007). *La larga sombra del ganado : problemas ambientales y opciones* (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Ed.).

Urrutia, M. E. S., Castañeda, F. E. M., García, J. A. E., & Rodríguez, G. B. (2017). Contribución del sector pecuario a la economía mexicana. Un análisis desde la Matriz Insumo Producto. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 8(1), 31–41. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v8i1.4308>

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco teórico y conceptual

2.1.1 Teoría del cambio climático

El cambio climático constituye el eje central para comprender la relevancia del balance de carbono en los sistemas ganaderos, dado que el sector representa una fuente global importante de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Así, el análisis del carbono permite evaluar el papel de los sistemas productivos tanto en la mitigación de emisiones como en la adaptación frente a las nuevas condiciones climáticas.

Esta teoría señala que el planeta ha experimentado una serie de cambios que altera los patrones climáticos, lo cual impacta directamente a los seres humanos ya que las diferentes actividades causantes de este fenómeno también ven afectadas sus operaciones derivado de fenómenos como: incremento en las temperaturas, altas precipitaciones e inundaciones, etc. Plantea que el cambio climático no solo debe ser analizado desde la perspectiva ambiental sino desde el entendimiento de cómo funciona la sociedad y la forma en que ésta utiliza y valora los recursos naturales (Salaverry & Botana, 2022).

Los pioneros son la científica estadounidense Eunice Newton Foote a quien se le considera la primera persona en teorizar sobre el efecto invernadero en el planeta en 1856, además de John Tyndall quien por primera vez estimó el potencial de efecto invernadero para el vapor de agua y el CO₂ (Ortiz & Jackson, 2022).

Esta teoría es el punto de partida en la presente investigación, ya que de ella se desprenden conceptos que sustentan esta contribución. La mayoría converge en una producción sustentable de carne de bovino, con menor huella de carbono, que no solo contribuya en la reducción de emisiones de GEI, sino que pueda ser una herramienta frente al cambio climático considerando en todo momento el uso racional de los recursos naturales.

2.1. 2 Teoría de la sostenibilidad

El concepto de sostenibilidad actualmente se menciona en la mayoría de los procesos de producción, principalmente de aquellos que requieren de la utilización de recursos naturales para ser llevados a cabo. Aborda desde la perspectiva estratégica de incluir las prácticas sostenibles como un indicador de los niveles de productividad en las diferentes actividades (García-Peñalvo, 2022).

En términos prácticos la sostenibilidad se entiende como el no comprometer los recursos naturales del planeta que están destinados a ser aprovechados por futuras generaciones para satisfacer la demanda actual de bienes y servicios. Se atribuye a un grupo de científicos, activistas y líderes de opinión que integraban la comisión mundial sobre medioambiente y desarrollo de la ONU (1983-1987) liderados por la científica Noruega Gro Harlem Brundtland y a quien se le considera “la madre de la sostenibilidad”.

La relación entre el concepto de sostenibilidad con el cambio climático y la ganadería es intrínseca, ya que, es un concepto en cierto modo abstracto de que tanto impacta la producción ganadera y sus efectos en el clima. Si los sistemas ganaderos son sostenibles tendrán un menor impacto en el cambio climático y a su vez se garantiza disposición de recursos para las generaciones futuras (Del Campo et al., 2025).

2.1. 3 Teoría del metabolismo social

El metabolismo social puede ser abordado como una teoría que requiere de la colaboración de ciencias y disciplinas que tengan el objetivo en común la solución de los problemas que en la actualidad resultan de la interacción entre los seres humanos y la naturaleza (Gómez Rodríguez, 2020).

Es importante profundizar en esta teoría ya que incorpora elementos que se refieren a cuestiones elementales como el intercambio de materiales y energía entre la naturaleza y los seres humanos, y donde los segundos obtienen satisfactores de forma directa o transformada mediante un proceso de apropiación (Infante-Amate

et al., 2017), pero a la par que se generan satisfactores también se producen residuos y es aquí donde el estudio de qué sucede con éstos toma relación con el presente trabajo.

La relación entre la teoría del metabolismo social con la ganadería y el cambio climático tienen su punto de convergencia en el uso de recursos que se utilizan en la producción ganadera, y cómo los residuos generados por esta están acelerando el cambio climático, pese a que no existe una forma precisa de cuantificar esta teoría, ya que no cuenta con una metodología plenamente unificada (Watson et al., 2024)

2.1. 4. Ciclo del carbono

La teoría o modelo del ciclo del carbono abordada y construida por grandes científicos como Antoine Lavoisier y Joseph Priestley en el siglo XVIII, permite comprender los procesos biofísicos de emisión y captura en suelos y vegetación, abordando las interacciones que existen entre los diferentes movimientos biogeoquímicos (Galvez & Gaillardet, 2012).

El concepto teórico de los sistemas agropecuarios sostenibles da idea de la necesidad de compatibilizar productividad con conservación ambiental apegados a conceptos recientemente establecidos como la biocapacidad del planeta y finalmente, la teoría del metabolismo social, que aborda los flujos de energía y materiales entre la actividad ganadera y el entorno. De manera integral, estas miradas permiten abordar el balance de carbono combinando dimensiones ambientales, productivas y socioeconómicas, para orientar estrategias de manejo sostenibles y mitigación del cambio climático en la ganadería.

Los ecosistemas tienen la capacidad de asimilar el carbono e incorporarlo a su estructura; es decir, lo fijan y lo mantienen almacenado por largos periodos, a través del proceso de fotosíntesis (Ordóñez & Masera, 2001). Al estrato suelo se le suele percibir como el escenario donde se gestan los eventos y la producción agrícola, juega un papel fundamental en el desarrollo de la mayoría de las actividades primarias, pero pocas veces se le da esta importancia desde el punto de vista

productivo y desde los servicios ambientales que provee, tal es el caso de la captura y almacenamiento de carbono (Niño et al., 2018)

El carbono tiende a almacenarse además de en suelo también en tejido vegetal y mantillo, en lo que podemos denominar la parte aérea de los ecosistemas hierbas, árboles y arbustos (Cano-Flores et al., 2020).

2.1.5 Huella de Carbono

La huella de carbono refiere la totalidad de GEI emitidos por el efecto directo de una organización, evento o producto durante el desarrollo de actividades cotidianas (Cáceres, 2018). De acuerdo con W. Rees & M. Wackernagel (1995) la huella ecológica se entiende como una determinada área o territorio que es ecológicamente productivo y con las dimensiones necesarias para generar los recursos demandados y al mismo tiempo tiene la capacidad de poder asimilar los residuos generados durante los procesos productivos que buscan satisfacer las necesidades de poblaciones establecidas en lugares específicos.

En el contexto actual toma relevancia por la relación entre las emisiones de GEI y la capacidad de la atmósfera de “administrar” a éstos. La estimación de la huella de carbono en la ganadería en la actualidad es abordada mediante metodologías como el análisis de ciclo de vida (ACV) y solo contemplan la cantidad de emisiones de GEI que los animales generan en la producción. Pero muy pocas veces se evalúa el potencial de secuestro que puede tener la ganadería extensiva en el pastoreo y en las diversas formas de hacer ganadería (Blaustein-Rejto et al., 2023).

2.1. 6 Sistemas agropecuarios sostenibles

Los sistemas agropecuarios sostenibles son aquellos sistemas agrícolas o pecuarios que buscan aumentar la eficiencia productiva en los diferentes procesos que los integran procurando en todo momento ocasionar el menor daño ambiental posible, mantener la viabilidad económica y social (Bilali et al., 2021)

En la actualidad los consumidores están tomando como uno de los factores de elección de algún producto el impacto ambiental que éste genera durante su

elaboración, la herramienta más difundida es la evaluación a partir de la huella de carbono (Gómez Murcia, 2024). Para el caso de la producción de carne de bovino, países como Brasil y Uruguay están optando por diversificar la forma de producción incluyendo alternativas de mitigación de los gases de efecto invernadero mediante la implementación de sistemas con un manejo integrado de la producción de carne carbono neutro (Zanasi et al., 2020).

2.2 Marco referencial

El marco referencial de la presente investigación tiene como propósito presentar elementos de contexto que permiten comprender de mejor manera la dinámica de la producción de carne de bovino y su relación con los procesos ambientales y productivos asociados con los sistemas ganaderos. Debido a que la ganadería bovina representa una actividad estratégica para la producción de alimentos, su importancia en la economía mundial y nacional, así como el desarrollo rural resulta necesario analizar su comportamiento desde distintas escalas de análisis, que permitan contextualizar el fenómeno de estudio.

Como derivación del marco referencial y con la finalidad de delimitar la frontera de conocimiento en torno a la temática de interés, en el siguiente capítulo se presenta un artículo bibliométrico que analiza dicho tema.

2.2.1 Producción mundial de carne de bovino

En 2024, el 71.3% de las exportaciones mundiales de carne de res tuvieron como origen a Brasil (28.0%), Australia (14.6%), India (11.7%), Estados Unidos (10.5%) y Argentina (6.5%). Para 2025, Brasil, Australia e India incrementaron sus envíos al exterior, mientras que Estados Unidos y Argentina registrarían disminuciones en sus exportaciones. En este mismo año los principales países importadores fueron: China y Estados Unidos con el 32.7% y el 18.4% de las importaciones mundiales, respectivamente (**Figura 2**).

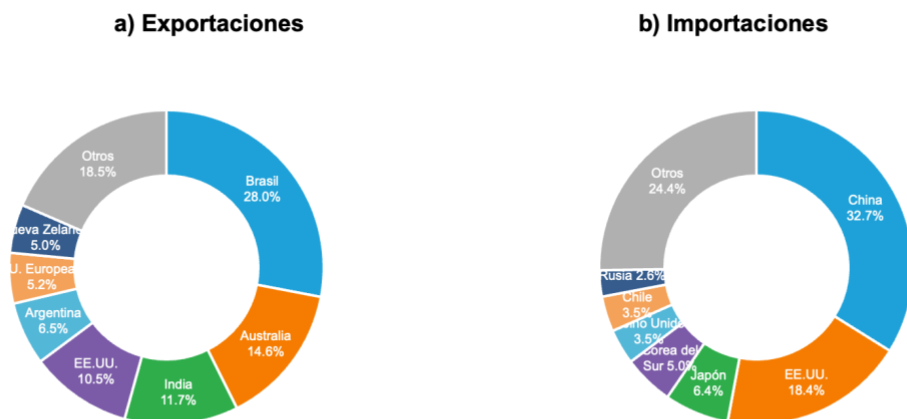


Figura 2. Balanza comercial mundial de la producción de carne de bovino.
Fuente: FIRA (2025).

Para el 2024, la producción mundial de carne de res alcanzó su nivel más alto registrado, con un total de 61.7 millones de toneladas, lo que representó un incremento anual del 2.8%. Durante los últimos diez años, la producción global de este tipo de carne mostró un crecimiento promedio anual de 0.7%. Sin embargo, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) proyectó para 2025 una ligera disminución de 0.2%, situando la producción estimada en 61.6 millones de toneladas (FIRA,2025).

2.2.2 Producción nacional de carne de bovino

La producción de carne de bovino en México en el 2023 fue de 2.21 mdt consolidándose como la principal actividad ganadera ya que para el año 2022 su aportación total al valor de la producción nacional fue de 27.9 % lo que equivale a 164 mil millones de pesos. Los principales estados productores fueron: Veracruz (13%), Jalisco (11.8%), San Luis Potosí (6.1%), Durango (5.5%) y Baja california (5.2%) tal y como se menciona en la (**Figura 3**).



Figura 3. Producción de carne de bovino por estados.

Fuente: elaboración propia con datos de FIRA, 2024.

2.2.4 Consumo mundial de carne de bovino

Para el año 2024 el consumo mundial de carne de bovino alcanzó los 59 millones de toneladas, lo cual resulta un 2.1% de aumento con respecto al año anterior, este comportamiento positivo se deriva de la baja en el consumo de otras carnes como cerdo y pollo los cuales son considerados sustitutos cercanos en el mercado mundial de la proteína de origen animal. Los principales países consumidores de carne de bovino en cuanto a volumen se refieren son Estados Unidos, China, Brasil, la Unión Europea y Argentina, respectivamente (COMECARNE, 2025).

2.2.5 Consumo nacional de carne de bovino

México en el año 2024 cubrió su demanda interna de carne de bovino con el 93% de la producción total de este producto, lo cual se traduce en un superávit donde los excedentes se envían a la exportación. Entre el 2020 y el 2024 se observó un crecimiento sostenido en cuanto a consumo per cápita se refiere con un crecimiento promedio anual de 4.5% al pasar de 1.78 a 2.12 mdt. el aumento en la demanda y

el consumo de carne de bovino en México esta influenciada principalmente por el aumento en el ingreso económico de las familias (FIRA, 2025).

2.2.6 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por la ganadería bovina

La ganadería es una de las actividades de mayor relevancia en el sector primario por sus aportes tan importantes en la seguridad alimentaria, la nutrición de la población y el crecimiento de la economía; sin embargo, este grado de importancia se contrarresta por la cantidad de emisiones que genera.

Esta actividad es responsable del 12% del total de las emisiones de GEI distribuidas en todas las partes que contempla la producción ganadera mundial, en la cual el ganado bovino aporta el 62% de las emisiones totales del sector y en cuanto a lo que a productos finales se refiere, la carne contribuye con el 67% de las emisiones (FAO 2023; Tigmasa, 2022)

2.3 Literatura citada

- Bilali, H., Strassner, C., & Ben Hassen, T. (2021). Sustainable agri-food systems: Environment, economy, society, and policy. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Number 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13116260>
- Blaustein-Rejto, D., Soltis, N., & Blomqvist, L. (2023). Carbon opportunity cost increases carbon footprint advantage of grain-finished beef. *PLoS ONE*, 18(12 December). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295035>
- Cáceres, Q. A. (2018). La responsabilidad social y la huella de carbono en las organizaciones. *Revista estrategia organizacional*, 7 No.2, 43–49.
- Cano-Flores, O., Vela-Correa, G., Acevedo-Sandoval, O. A., & Valera-Pérez, M. Á. (2020). Organic carbon concentrations in the woodland and soils of the protected natural area “El Faro” in Tlalmanalco, Estado de Mexico. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 895–905. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.757>
- COMECARNE. (2025). Compendio estadístico 2025. COMECARNE. <https://www.usapeec.org.mx/post/comecarne-presenta-compendio-estad%C3%ADstico-2025>
- Del Campo, M., Montossi, F., Soares de Lima, J. M., & Brito, G. (2025). Future cattle production: Animal welfare as a critical component of sustainability and beef quality, a South American perspective. *Meat Science*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109672>
- FIRA. (2025). *Panorama Agroalimentario. Carne de bovino 2025*. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. FIRA. <https://www.fira.gob.mx/Nd/NEstEcon.jsp>
- Galvez, M. E., & Gaillardet, J. (2012). Historical constraints on the origins of the carbon cycle concept. *Comptes Rendus - Geoscience*, 344(11–12), 549–567. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.10.006>
- García-Peñalvo, F. J. (2022). Developing robust state-of-the-art reports: Systematic Literature Reviews. In *Education in the Knowledge Society* (Vol. 23, p. E28600). Ediciones Universidad de Salamanca. <https://doi.org/10.14201/eks.28600>
- Gómez, M. J. J. (2024). Huella de Carbono: contribución en la producción y consumo responsables. *Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica*, 4(1), 465–475. <https://doi.org/10.61384/r.c.a.v4i1.111>
- Gómez, R. D. T. (2020). Metabolismo social y bioética. *Revista Iberoamericana de Bioética*, (12), 01–11. <https://doi.org/10.14422/rib.i12.y2020.010>

- Infante-Amate, J., González De Molina, M., & Toledo, V. M. (2017). *El metabolismo social. Historia, métodos y principales aportaciones*.
http://www.redibec.org/IVO/rev19_01.pdf
- Niño, F. A., Delgado, Y. M., & Diéguez, E. T. (2018). Carbon storage and flux in arid soils as an environmental service: An example in northwestern Mexico. *Terra Latinoamericana*, 36(2), 93–104. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.334>
- Ordóñez, J. A., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7(1), 3–12.
- Ortiz, J. D., & Jackson, R. (2022). Understanding Eunice Foote's 1856 experiments: heat absorption by atmospheric gases. *Notes and Records*, 76(1), 67–84.
<https://doi.org/10.1098/rsnr.2020.0031>
- Salaverry, E., & Botana, M. I. (2022). *Las teorías sobre cambio climático aplicadas en América Latina y la estandarización de los sistemas ambientales*.
https://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/trab_eventos/ev.15067/ev.15067.pdf
- Tigmasa, P. K. P. (2022). Contribución de las emisiones de gas metano producidas por el ganado bovino al cambio climático. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 5. <https://doi.org/https://doi.org/10.46380/rias.v5.e215>
- Watson, A., Gingrich, S., & MacFadyen, J. (2024). Recent advances in social metabolism research: Sources and methods. In *Historical Methods* (Vol. 57, Number 4, pp. 199–204). Routledge.
<https://doi.org/10.1080/01615440.2024.2441076>
- Zanasi, C., Rabboni, C., Rota, C., Bungenstab, D. J., & Laura, V. A. (2020). The Carne Carbono Neutro Accordance to Brazilian Consumers' Attitude towards Beef. *International Journal on Food System Dynamics*, 11(4), 360–376.
<https://doi.org/10.18461/ijfsd.v11i4.60>

CAPÍTULO 3. CURRENT STATE OF RESEARCH ON THE CLIMATE CHANGE-LIVESTOCK RELATIONSHIP; A BIBLIOMETRIC REVIEW

ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN EN TORNO A LA RELACIÓN CAMBIO CLIMÁTICO-GANADERÍA; UNA REVISIÓN BIBLIOMÉTRICA^a

Saulo Acevedo-Cruz¹, Juan Antonio Leos-Rodríguez², Victoria Pacheco- Almaraz^{2*}

¹*Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México- Texcoco, 56230, Chapingo, Estado de México. Email: saulo.acevedo@ciestaam.edu.mx*

²*División de Ciencias Económico Administrativas (DICEA), Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México- Texcoco, 56230, Chapingo, Estado de México. Email: jleos45@gmail.com; vpacheco@ciestaam.edu.mx*

**Corresponding autor*

Summary

Background. Bibliometric analysis is an essential tool for defining the frontiers of knowledge in climate change research and its relationship with different economic sectors, especially beef cattle farming due to its greenhouse gas emissions, as livestock farming is currently considered the primary activity that contributes most to greenhouse gas emissions. Objective. To define the current state and trends in research on the relationship between climate change and livestock farming. Methodology. Metadata obtained from the Scopus repository (830) articles for the period between 1994 and 2024 were analyzed using the search equation “(TITLE-ABS-KEY (“carbon capture”) OR TITLE-ABS-KEY (“carbon sequestration”) OR TITLE-ABS-KEY (“carbon sinks”) OR TITLE-ABS-KEY (“carbon fixation”) AND TITLE-ABS-KEY (“cattle production”) OR TITLE-ABS-KEY (“livestock sector”) OR TITLE-ABS-KEY (livestock) OR TITLE-ABS-KEY (“animal production”)) AND (LIMIT TO (DOCTYPE,“ar”)) AND (EXCLUDE (SUBJAREA,“CHEM”))). using VOSviewer and R-studio software, and the thematic groups were then characterized. Results. Scientific interest focuses on the analysis of climate change and agriculture, agricultural and livestock practices, and GHG emissions, as well as on reducing emissions and carbon capture from livestock systems. Implications. Scientific interest has shifted from focusing on the negative aspects of primary activities and the presence of carbon on the planet to examining it as a climate change mitigation strategy. Conclusions. Research into the relationship between climate change and livestock farming has evolved towards the search for solutions within the activity itself, recognizing the potential of sustainable livestock systems as elements of change in the face of the climate emergency, requiring further research to enable the implementation of possible strategies.

Keywords

Global warming, livestock sector, greenhouse gases, carbon sequestration, bibliometrics, sustainable livestock farming, carbon neutral.

^a El capítulo fue publicado en el volumen 28, número 3 de la Revista Tropical and Subtropical Agroecosystems en septiembre de 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6423>

Resumen

Antecedentes. El análisis bibliométrico representa una herramienta esencial para delimitar la frontera de conocimiento en torno a la investigación sobre el cambio climático y su relación con los diferentes sectores económicos, en especial con la actividad ganadera bovina productora de carne por sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero ya que en la actualidad se le responsabiliza a la ganadería como la actividad primaria que contribuye en mayor medida a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero. **Objetivo.** Delimitar el estado actual y las tendencias de investigación sobre la relación cambio climático-ganadería. **Metodología.** Se realizó el análisis de metadatos obtenidos del repositorio Scopus (830) artículos para el periodo de tiempo comprendido entre 1994 y 2024 a partir de la ecuación de búsqueda “(TITLE-ABS-KEY ("carbon capture") OR TITLE-ABS-KEY ("carbon sequestration") OR TITLE-ABS-KEY ("carbon sinks") OR TITLE-ABS-KEY ("carbon fixation") AND TITLE-ABS-KEY ("cattle production") OR TITLE-ABS-KEY ("livestock sector") OR TITLE-ABS-KEY (livestock) OR TITLE-ABS-KEY ("animal production")) AND (LIMIT TO (DOCTYPE,"ar")) AND (EXCLUDE (SUBJAREA,"CHEM"))). mediante los softwares VOSviewer y R-studio, y posteriormente se caracterizaron los grupos temáticos. **Resultados.** El interés científico se centra en el análisis del cambio climático y agricultura, prácticas agrícolas-ganaderas y emisiones de GEI y en la reducción de emisiones-captura de carbono a partir de los sistemas ganaderos. **Implicaciones.** El interés científico ha pasado de centrarse en la parte negativa de las actividades primarias y la presencia de carbono en el planeta, a examinarlo como estrategia de mitigación del cambio climático. **Conclusiones.** La investigación en torno a la relación cambio climático-ganadería ha evolucionado hacia la búsqueda de soluciones en la misma actividad reconociendo el potencial de los sistemas ganaderos sostenibles como elementos de cambio ante la emergencia climática, requiriendo mayor investigación que permita poner en práctica posibles estrategias.

Palabras Clave

Calentamiento global, sector ganadero, gases de efecto invernadero, secuestro de carbono, bibliometría, ganadería sostenible, carbono neutro.

Introducción

Uno de los temas que define la agenda de los organismos internacionales relacionados con la industria, el transporte, el sector primario y todos aquellos a los que se les atribuye participación en las emisiones de GEI, es el cambio climático (Díaz , 2012), debido a la amenaza que representa para los sectores económicos, principalmente el primario (López, 2016), con estragos cada vez más evidentes, que van desde la escasez de agua hasta eventos climáticos extremos que comprometen directamente la seguridad alimentaria. (Paricahua, 2021).

De acuerdo con la FAO (2024), los estragos de este fenómeno se aprecian con mayor intensidad en los sectores agrícola y ganadero, con efectos negativos que impactan en la seguridad alimentaria de los humanos y aumentan el número de personas sin acceso a alimentos a nivel global (Varela, Estévez and Sánchez, 2024). Específicamente en el sector ganadero, la relación entre la ganadería y el cambio climático es compleja, ya que esta actividad no solo contribuye en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), también sufre sus efectos (Lorente , 2010).

Dentro del sector, las principales fuentes de emisiones de GEI provienen de los procesos digestivos de los animales como la fermentación entérica, la gestión de excretas y las modificaciones en el uso del suelo (Jaurena et al., 2021; Meissner et al., 2023). Son responsables de una gran parte de emisiones de GEI como el dióxido de carbono (CO₂) por la deforestación y el uso de energías fósiles (16%), el metano (CH₄) generado por la digestión de rumiantes (fermentación entérica, 39%) y el óxido nitroso (N₂O) por el uso de fertilizantes y estiércol (9%) (Gerber *et al.*, 2013).

La actividad ganadera bovina se puede clasificar como intensiva o extensiva, siendo la segunda categoría la más comprometida con la producción sostenible, por lo que representa un medio para contribuir en la mitigación

del cambio climático (Lerner *et al.*, 2017). La ganadería resiliente, incluye sistemas silvopastoriles, pastoreo controlado y gestión eficiente de recursos (Bruck *et al.*, 2019; Pateiro *et al.*, 2020). Además, se alinea a las nuevas tendencias de consumo donde es decisivo el impacto ambiental generado por los productos durante su elaboración (huella de carbono) (Gómez, 2024).

Por otro lado, las revisiones sistemáticas, específicamente la bibliometría, son una herramienta que permite analizar grandes bases de datos relacionadas con investigaciones específicas, con objetivos amplios y exploratorios (Salinas, 2020). Al mismo tiempo, forma parte de una familia amplia de métodos y aproximaciones y su importancia radica en el volumen de datos que permite examinar, apoyada en el acceso a repositorios relacionados con la producción científica en formato digital (García-Peñalvo, 2022).

Las bondades de esta herramienta son múltiples, sin embargo, se caracteriza principalmente por ofrecer una síntesis del estado actual del conocimiento de un determinado tema, para así establecer posibles prioridades futuras de investigación (Page *et al.*, 2021). Los estudios bibliométricos representan una herramienta importante para dimensionar las tendencias, los patrones y las dinámicas de la producción científica en una determinada área de interés (Gómez *et al.*, 2025). Mediante el uso de algunos métodos cuantitativos (número de artículos, número de autores, etc.) podemos conocer cómo se compone y como se distribuye la investigación en torno a un tema (Gutiérrez-Mora *et al.*, 2025).

El interés creciente por investigaciones relacionadas con el análisis del cambio climático y los sectores económicos, específicamente el ganadero (Ricard, 2019; Ostoja *et al.*, 2023) y el uso de herramientas digitales para análisis de grandes volúmenes de datos relacionados con la producción científica, respaldan el objetivo de esta investigación, delimitar el estado actual y las tendencias de investigación en torno a la relación cambio climático-ganadería, mediante una revisión bibliométrica, para ofrecer un panorama de la evolución de investigaciones en esta temática.

Metodología

Para solventar el objetivo planteado, la investigación se compuso de dos fases consistentes en la recolecta de información y sistematización de ésta.

Origen de la información

Para responder el cuestionamiento de ¿Cuáles son los intereses y las tendencias de investigación en torno a la relación cambio climático-ganadería?, este análisis bibliométrico parte de la búsqueda de información, misma que se realizó en el mes de diciembre de 2024 en el repositorio de *Scopus*, por su importancia dentro de los repositorios científicos (Forliano *et al.*, 2021). Como parte de los criterios de inclusión se consideraron únicamente artículos científicos publicados en el período comprendido de 1994-2024 considerando todos los idiomas, se excluyó el material de áreas de estudio como las ciencias de la computación, química, bioquímica, genética y biología molecular (**Cuadro 1**) (

Figura 4). La estrategia de búsqueda se basó en palabras clave, con sus respectivos sinónimos y traducciones, lo que permitió obtener 830 artículos científicos relacionados con el tema de interés, mediante la siguiente ecuación:

Cuadro 1.Estrategia de búsqueda en repositorio.

Repositorio	Comando de búsqueda	Número de artículos	Criterio de inclusión	Criterio de exclusión	Período de tiempo
Scopus	<i>“(TITLE-ABS-KEY ("carbon capture") OR TITLE-ABS-KEY ("carbon sequestration") OR TITLE-ABS-KEY ("carbon sinks") OR TITLE-ABS-KEY ("carbon fixation") AND TITLE-ABS-KEY ("cattle production") OR TITLE-ABS-KEY ("livestock sector") OR TITLE-ABS-KEY (livestock) OR TITLE-ABS-KEY ("animal production")) AND (LIMIT TO (DOCTYPE,"ar")) AND (EXCLUDE (SUBJAREA,"CHEM"))).</i>	830	Tipo de documentos: artículos científicos	Áreas de conocimiento: Ciencias de la comunicación, química, bioquímica, genética y biología molecular	1994-2024

Fuente: Elaboración propia

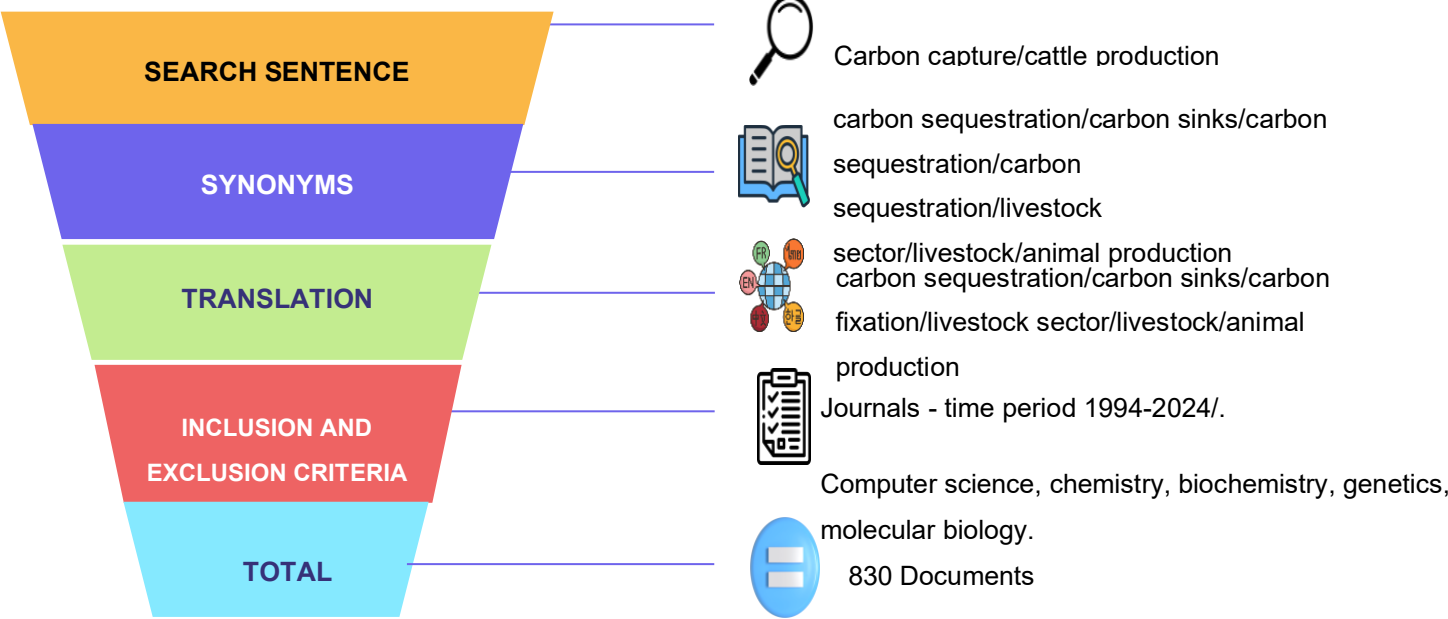


Figura 4. Esquema de búsqueda en la base de datos Scopus. Fuente: Elaboración propia.

Sistematización de la información

Los metadatos de los documentos obtenidos de Scopus fueron exportados en formato CSV para su posterior análisis en el software VOSviewer y R-Studio ((van Eck & Waltman, 2010) que permitieron procesar la información a través de redes. Para facilitar su interpretación se crearon mapas de la ciencia basados en diversos indicadores bibliométricos (**Cuadro 2**).

Cuadro 2.Indicadores analizados.

Tipo de indicador	Indicador	Descripción	Software
Productividad	1) Número de artículos publicados de 1994 a 2024	Indica el número de artículos publicados en un lapso.	Excel R Studio
Colaboración	2) Número de autores por documento.	Refiere al número de autores que participan en un artículo o publicación científica.	Excel
Colaboración	3) Redes de investigación (Co-ocurrencia) (Figura 4).	Muestra un panorama de la colaboración que existe entre investigadores que abordan el tema de interés (Caracuel-Sillero et al., 2024). Se utilizaron 100 palabras clave.	Vosviewer R Studio
Impacto	4) Evolución del abordaje del tema (Figura 5)	Como ha cambiado la forma en que se investiga y se ha trabajado sobre el tema.	Vosviewer R Studio
Colaboración	5) Redes de colaboración (países- autores- instituciones) (Figura 6).	Permite visualizar como se establecen las relaciones de colaboración entre distintos, países, autores y centros de investigación en torno al tema de investigación.	R Studio

Productividad	6)	Tendencias de investigación	Proporciona información de cómo se han referido los investigadores a un tema específico (Ramírez et al., 2020).	R Studio
---------------	----	-----------------------------	---	----------

Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

Número de artículos publicados

Para el período comprendido entre 1994-2004, el número de artículos y de autores involucrados en el tema fue de 25 y 88, respectivamente. Sin embargo, entre 2005-2014 existe una tendencia creciente con 151 artículos y 708 autores. Mientras que para el período de 2015-2024 se presenta un crecimiento exponencial con 654 artículos y 3847 autores, representando el interés por el tema en la última década (**Figura 5Error! Reference source not found.**). El total de publicaciones para el período analizado fue de 830 artículos científicos.

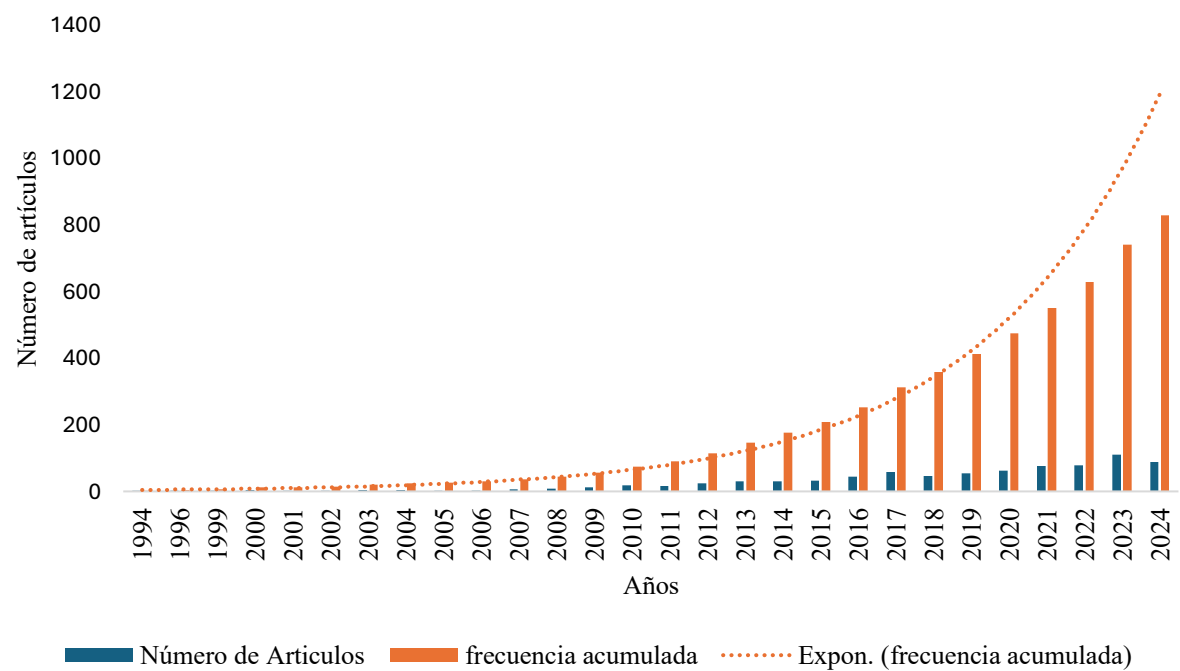


Figura 5. Número de artículos publicados en el período 1994-2024 que abordan la relación cambio climático-ganadería.

Fuente: Elaboración propia.

Organizados por período de tiempo en la **Figura 6** se encontró que en la última década la investigación en torno al tema acumula la mayor cantidad de artículos publicados lo que refleja una creciente preocupación por atender la presión sobre el papel que desempeña la ganadería en la crisis ambiental de la actualidad.

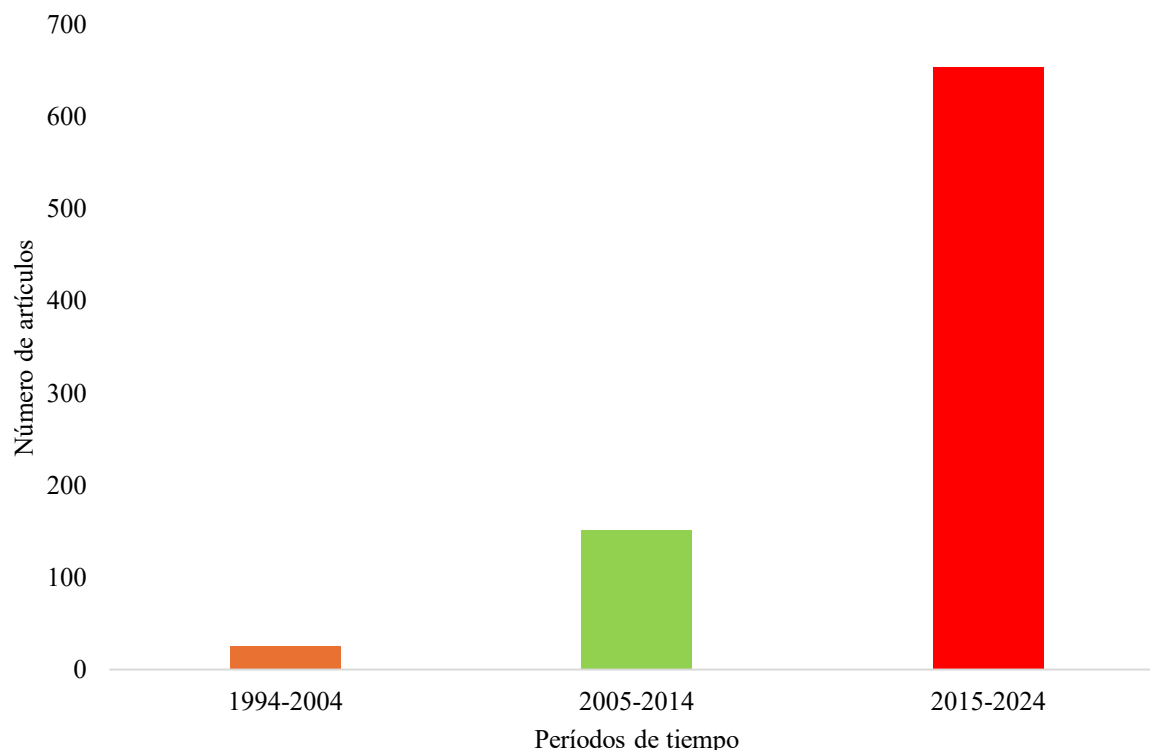


Figura 6. Número de artículos a lo largo de tres décadas.

Fuente: Elaboración propia.

Número de autores por documento

Se encontró que en los últimos 10 años existió una mayor colaboración entre investigadores. Para el período de 1994-2004 el promedio fue de 3.52, para 2005-2014 de 4.6 y para el último período fue de 5.8, lo que demuestra una tendencia de mayor colaboración en la investigación de los temas del cambio climático y su relación con la ganadería. Esto refleja el compromiso entre instituciones, países e investigadores con respecto a la generación de nueva información vinculada al tema, posiblemente como respuesta a crecientes cuestionamientos sobre la sostenibilidad del sector ganadero (Steinfeld *et al.*, 2007).

Redes de investigación (Co-ocurrencia)

La técnica de análisis de co-ocurrencia reflejó la existencia de tres grupos de investigadores diferenciados por sus intereses de estudio (**Figura 7**).

Cambio climático y agricultura: definido por palabras como “Gases de Efecto Invernadero”, “Dióxido de Carbono” y “sistemas agrícolas”. Este grupo engloba a la agricultura y su relación con los GEI y el cambio climático. Son investigadores que analizan alternativas de mitigación a través de la captura de carbono y manejo de residuos de la actividad agrícola, mediante técnicas que optimizan estos desechos, como el biochar. Kuhla & Viereck (2023), Lefebvre *et al.* (2023), Zhang *et al.* (2024) y Gao *et al.* (2024) señalan que las emisiones de GEI en la cría de animales de granja se relaciona con la eficiencia en la gestión de la energía en estos procesos.

Prácticas agrícolas-ganaderas y emisiones de GEI: caracterizado por términos relacionados con “ganado, agricultura”, “humano” y “nitrógeno”. Son investigaciones asociadas a las actividades antropogénicas y prácticas ganaderas y agrícolas, como el uso de fertilizantes; desde estos ámbitos analizan emisiones de GEI. Diversos autores (Steinfeld Henning *et al.*, 2007; Staddon & Faghihinia, 2021; Brook *et al.*, 2022; Machado *et*

al., 2022 y Bilotto *et al.*, 2023), reportan que estas actividades, sobre todo la ganadera, es responsable de gran parte de las emisiones de GEI, es decir, son objeto de presiones.

También plantean que, al mismo tiempo, que se señala a la actividad ganadera como altamente contaminante, la demanda de alimentos por el crecimiento poblacional obliga a buscar principalmente fuentes de proteína que tengan un impacto menor en el ambiente (Lean & Moate, 2021; Khoshnevisan *et al.*, 2022; Biagini & Betta, 2024).

Reducción de emisiones-captura de carbono: grupo definidos por términos como “secuestro de carbono”, “pastizales” y el “carbono en el suelo”. Estos autores analizan la relación entre los procesos de captura de carbono, los medios y ecosistemas donde se puede llevar a cabo. (Chen *et al.*, 2018; Morales Ruiz *et al.*, 2021; Fatumah *et al.*, 2023 Díaz Pablo *et al.*, 2024; Monteiro *et al.*, 2024). S Destacan el papel que puede llegar a tener el manejo integrado de los sistemas ganaderos, agrícolas y forestales en la reducción de las emisiones de GEI por sus contribuciones a la práctica de una ganadería sostenible.

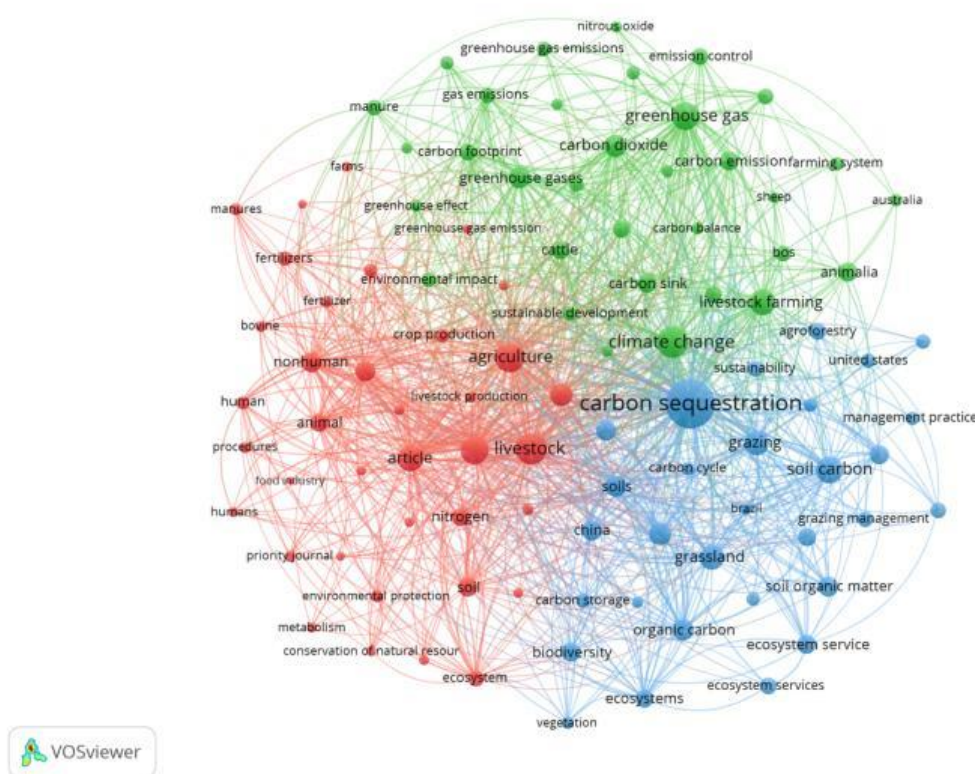


Figura 7. Áreas temáticas en torno a la relación cambio climático-ganadería.

Fuente: Elaboración propia.

Evolución del abordaje del tema

Entre 2016 y 2018 la investigación se centró en los términos dióxido de carbono, producción ganadera y GEI, mientras que de 2019 a 2021 los enfoques se dirigieron hacia carbono en el suelo, manejo de pastizales y servicios ecosistémicos, es decir, se observa una búsqueda de alternativas de producción basadas en la propia naturaleza y el manejo sostenible de los recursos naturales, una de ellas se encuentra en mejorar la gestión de los suelos destinados a la ganadería, que pueden fungir como almacenes de carbono (Albiac *et al.*, 2017; Lessmann *et al.*, 2022) (**Figura 8**).

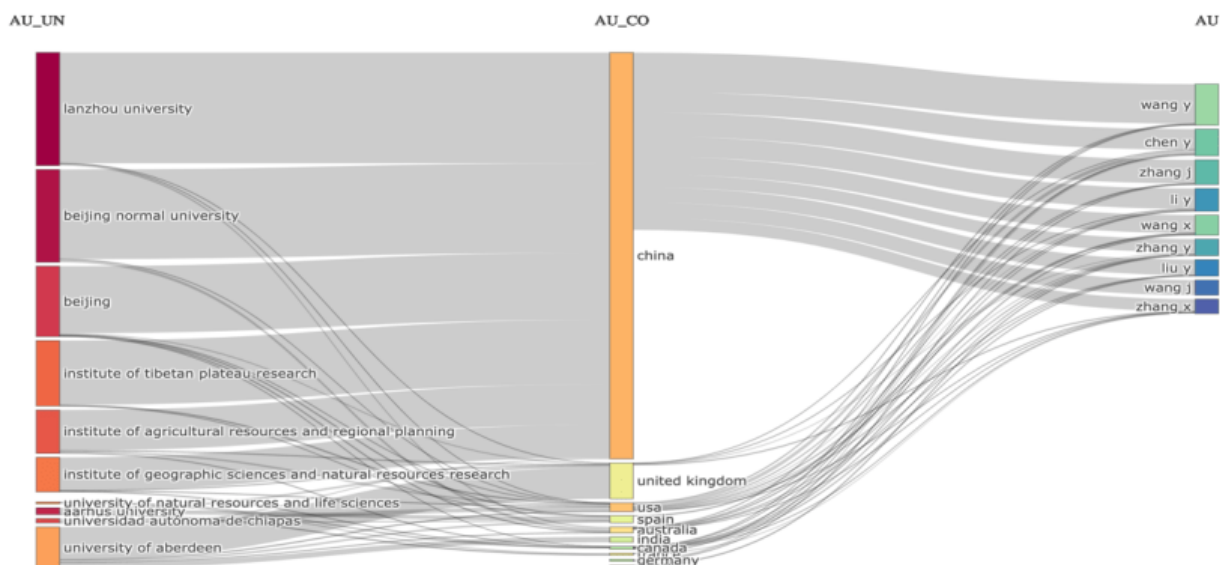


Figura 9. Diagrama Sankey de las redes de colaboración (países-autores-instituciones).

Fuente: Elaboración propia.

Tendencias de investigación

En la **Figura 10** con la ayuda de la herramienta biblioshiny se puede observar la evolución de términos clave relacionados con el abordaje de la temática de cambio climático-ganadería. Se aprecia el incremento en el uso de términos como “cambio climático”, “secuestro de carbono” y “biochar”, es decir, la investigación ha transitado de un enfoque teórico a uno práctico, centrado en soluciones basadas en la misma naturaleza, pero de la mano del empleo de tecnologías de actualidad. A continuación, se presentan puntos clave que fundamentan el argumento anterior.

2003-2010: Predominio del “ciclo del carbono”, “calentamiento global” y “dióxido de carbono”.

2011-2018: Expansión hacia estrategias de mitigación, uso del suelo y adaptación al cambio climático.

2019-2024 Auge de soluciones aplicadas como biochar, captura de carbono, agricultura sostenible y servicios ecosistémicos.

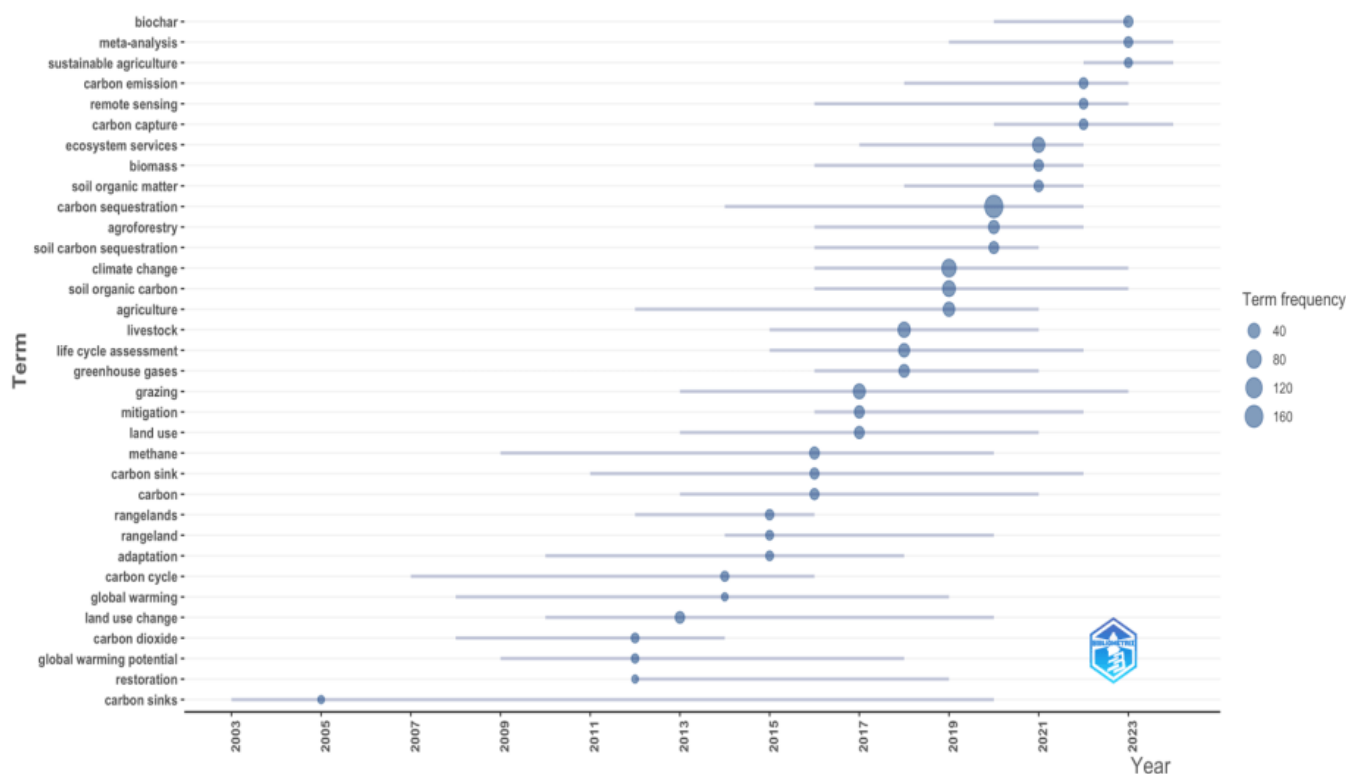


Figura 10. Evolución de términos clave en el tema.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El análisis bibliométrico muestra que, derivado de la creciente presión sobre la ganadería para disminuir su huella de carbono, es crucial transitar hacia una actividad más sostenible, mediante la implementación de diferentes sistemas de producción capaces de contribuir a la mitigación del cambio climático y al mismo tiempo generar resiliencia ante los estragos actuales y futuros ocasionados por este fenómeno. Esto se puede confirmar con la integración de los grupos temáticos que van desde el análisis del cambio climático y agricultura, las prácticas agrícolas-ganaderas y emisiones de GEI, hasta la reducción de emisiones-captura de carbono.

Los resultados evidencian que existe una relación compleja entre la ganadería y el cambio climático, ya que la actividad ganadera depende de los factores climatológicos para su desarrollo. Si los patrones del clima son afectados consecuentemente las cadenas de suministro, principalmente de materias primas, sufrirán efectos adversos poniendo en riesgo la producción de proteínas de origen animal con alto valor biológico, los cuales son claves en la evolución del ser humano. Sin embargo, al mismo tiempo esta actividad contribuye simplemente a las emisiones de GEI.

Los hallazgos de esta contribución muestran elementos a considerar en futuras investigaciones, tales como la capacidad de los sistemas ganaderos para capturar y almacenar carbono. Es decir, destaca la necesidad de estudios que aborden el papel que juegan estos sistemas en la mitigación del cambio climático, con lo que se puede contribuir en la eliminación de ciertos estigmas generados con el paso del tiempo y que limitan la práctica de una ganadería más sostenible que garantice la seguridad alimentaria futura.

Finalmente, se demuestra que el interés científico hasta la década pasada se centraba en la búsqueda de los principales emisores de los GEI dentro del sector pecuario, dejando de lado su potencial como posible aliado en la mitigación del cambio climático. En la actualidad los investigadores optan por encontrar en los sistemas

ganaderos aquella parte del eslabón que puede jugar un papel central en la captura de carbono proponiendo técnicas productivas que aumenten esta condición como los sistemas silvopastoriles y el manejo de las praderas y pastizales, creando así líneas de investigación emergentes.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), a la Universidad Autónoma Chapingo. Al Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM).

Funding

The present work did not receive funding.

Conflict of interest statement

The authors declare that they have no conflict of interest with respect to this manuscript.

Compliance with ethical standards

Not applicable.

Data availability

The data can be consulted with the first author at the following email address
saulo.acevedo@ciestaam.edu.mx

Author Contribution Statement (Credit)

S. Acevedo-Cruz: conceptualization, data curation, formal analysis, writing – original draft: **J.A. Leos-Rodríguez:** project administration, supervision and validation: **V. Pacheco-Almaraz:** Methodology, software, writing – review & editing. All authors have read and agree with the published version of the manuscript and the data can be consulted with the first author at the following e-mail address

Referencias

- Albiac, J., Kahil, T., Notivol, E. and Calvo, E., 2017. Agriculture and climate change: Potential for mitigation in Spain. *Science of the Total Environment*, 592, pp.495–502. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.110>.
- Biagini, D. and Betta, M., 2024. An unconventional approach to evaluating the environmental role of a productive system: An environmental assessment of beef farms in North-West Italy. *Science of the Total Environment*, pp. 953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176100>.
- Bilotto, F., Christie-Whitehead, K.M., Malcolm, B. and Harrison, M.T., 2023. Carbon, cash, cattle and the climate crisis. *Sustainability Science*, 18(4), pp.1795–1811. <https://doi.org/10.1007/s11625-023-01323-2>.
- Brook, R., Forster, E., Styles, D., Mazzetto, A.M., Arndt, C., Esquivel, M.J. and Chadwick, D., 2022. Silvopastoral systems for offsetting livestock emissions in the tropics: a case study of a dairy farm in Costa Rica. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(5). <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00834-z>.
- Bruck, S.R., Bishaw, B., Cushing, T.L. and Cubbage, F.W., 2019. Modeling the financial potential of silvopasture agroforestry in eastern North Carolina and Northeastern oregon. *Journal of Forestry*, 117(1), pp.13–20. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvy065>.
- Caracuel-Sillero, M., Alfonso-Caveda, D. and Menor-Campos, A., 2024. Research trends on agricultural cooperatives in Spain: a bibliometric analysis. *European Public and Social Innovation Review*, 9. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-1820>.
- Chen, Y., Tao, Y., Cheng, Y., Ju, W., Ye, J., Hickler, T., Liao, C., Feng, L. and Ruan, H., 2018. Great uncertainties in modeling grazing impact on carbon sequestration: A multi-model inter-comparison in temperate Eurasian Steppe. *Environmental Research Letters*, 13(7). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacc75>.
- Diaz Cordero, G., 2012. Vista de El cambio climático general. *Ciencia y Sociedad*, XXXVII, pp.227–240.
- Díaz Pablo, M.E., Alegre Orihuela, J.C., Gómez Bravo, C.A., Mendoza Tamani, P. and Arevalo-Hernandez, C.O., 2024. Reservas de carbono en tres sistemas silvopastoriles de la Amazonía peruana. *Manglar*, 21(3), pp.305–311. <https://doi.org/10.57188/manglar.2024.033>.

FAO, 2024. *Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación*. International Food Policy Research Institute. <https://doi.org/10.2499/0896295370>.

Fatumah, N., Mohammed, S., Ashraf, N., Abasi, K. and Shadia, N., 2023. Adoption of novel climate-smart farming systems for enhanced carbon stock and carbon dioxide equivalent emission reduction in cattle corridor areas of Uganda. *Heliyon*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14114>.

Forliano, C., De Bernardi, P. and Yahiaoui, D., 2021. Entrepreneurial universities: A bibliometric analysis within the business and management domains. *Technological Forecasting and Social Change*, pp.165. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120522>.

Gao, L., Fei, F., Jia, Y., Wen, P., Zhao, X., Shao, H., Feng, T. and Huo, L., 2024. Optimal dispatching of integrated agricultural energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and demand response. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, pp.156. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109693>.

García-Peñalvo, F.J., 2022. *Developing robust state-of-the-art reports: Systematic Literature Reviews. Education in the Knowledge Society*, <https://doi.org/10.14201/eks.28600>.

Gómez, M.C.S., García, J.L.C., Castro, S.V. and del Brio Alonso, I., 2025. Research Methods in the Educational Field: Bibliometric Analysis - A Comparative Study between Scopus and WoS. *Revista Espanola de Educacion Comparada*, (46), pp.141–172. <https://doi.org/10.5944/reec.46.2025.40201>.

Gómez Murcia, J.J., 2024. Huella de Carbono: contribución en la producción y consumo responsables. *Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica*, 4(1), pp.465–475. <https://doi.org/10.61384/r.c.a..v4i1.111>.

Gutiérrez-Mora, I., Hernández-Cázares, A.S., Hidalgo-Contreras, J.V., Lopez-Ayala, J.L. and Velasco-Velasco, J., 2025. *Application of remote sensing in the estimation of agricultural crops yields: a bibliometric review. Tropical and Subtropical Agroecosystems*, <https://doi.org/10.56369/tsaes.5613>.

Jaurena, M., Durante, M., Devincenzi, T., Savian, J. V., Bendersky, D., Moojen, F.G., Pereira, M., Soca, P., Quadros, F.L.F., Pizzio, R., Nabinger, C., Carvalho, P.C.F. and Lattanzi, F.A., 2021. Native Grasslands at the Core: A New Paradigm of Intensification for the Campos of Southern South America to Increase Economic and Environmental Sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.547834>.

Khoshnevisan, B., He, L., Xu, M., Valverde-Pérez, B., Sillman, J., Mitraka, G.C., Kougias, P.G., Zhang, Y., Yan, S., Ji, L., Carbajales-Dale, M., Elyasi, S.N., Marami, H., Tsapekos, P., Liu, H. and Angelidaki, I., 2022. From renewable energy to sustainable protein sources: Advancement, challenges, and future roadmaps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp.157. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112041>.

Kuhla, B. and Viereck, G., 2023. *Die Methanemissionen von Nutztieren in Deutschland Ende des 19. Jahrhunderts und heute im Vergleich*.

Lean, I.J. and Moate, P.J., 2021. Cattle, climate and complexity: food security, quality and sustainability of the Australian cattle industries. *Australian Veterinary Journal*, 99(7), pp.293–308. <https://doi.org/10.1111/avj.13072>.

Lefebvre, D., Fawzy, S., Aquije, C.A., Osman, A.I., Draper, K.T. and Trabold, T.A., 2023. Biomass residue to carbon dioxide removal: quantifying the global impact of biochar. *Biochar*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00258-2>.

Lerner, A.M., Zuluaga, A.F., Chará, J., Etter, A. and Searchinger, T., 2017. Sustainable Cattle Ranching in Practice: Moving from Theory to Planning in Colombia's Livestock Sector. *Environmental Management*, 60(2), pp.176–184. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0902-8>.

Lessmann, M., Ros, G.H., Young, M.D. and de Vries, W., 2022. Global variation in soil carbon sequestration potential through improved cropland management. *Global Change Biology*, 28(3), pp.1162–1177. <https://doi.org/10.1111/gcb.15954>.

López Feldman, A.J., & H.C.D., 2016. Vista de Cambio climático y agricultura_ una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *EL TRIMESTRE ECONOMICO*, LXXXIII, pp.459–496.

Lorente Saiz, A., 2010. Ganadería y cambio climático: una influencia recíproca. *GeoGraphos. Revista Digital para Estudiantes de Geografía y Ciencias Sociales*, Vol. 1, n. 3, pp.1–22.

Machado, J.M., da Motta, E.A.M., Barbosa, M.R., Weiler, R.L., Mills, A., Ongaratto, F., Maidana, F.M., Montagner, P., Rodrigues, D.P.A. and Silveira, D.C., 2022. Strategies to mitigate the emission of methane in pastures: enteric methane: A review. *Australian Journal of Crop Science*, 16(6), pp.682–690. <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.06.p3457>.

Meissner, H.H., Blignaut, J.N., Smith, H.J. and du Toit, C.J.L., 2023. The broad-based economic impact of beef and dairy production: A global review. *South African Journal of Animal Science*, 53(2), pp.250–275. <https://doi.org/10.4314/sajas.v53i2.11>.

Monteiro, A., Barreto-Mendes, L., Fanchone, A., Morgavi, D.P., Pedreira, B.C., Magalhães, C.A.S., Abdalla, A.L. and Eugène, M., 2024. Crop-livestock-forestry systems as a strategy for mitigating greenhouse gas emissions and enhancing the sustainability of forage-based livestock systems in the Amazon biome. *Science of the Total Environment*, pp.906.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167396>.

Morales Ruiz, D.E., Aryal, D.R., Pinto Ruiz, R., Guevara Hernández, F., Casanova Lugo, F. and Villanueva López, G., 2021. Carbon contents and fine root production in tropical silvopastoral systems. *Land Degradation and Development*, 32(2), pp.738–756. <https://doi.org/10.1002/ldr.3761>.

Ostoja, S.M., Choe, H., Thorne, J.H., Alvarez, P., Kerr, A., Balachowski, J. and Reyes, J., 2023. The Impact of Climate Change on California Rangelands and Livestock Management. *Agriculture (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/agriculture13112095>.

Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L.A., Stewart, L.A., Thomas, J., Tricco, A.C., Welch, V.A., Whiting, P. and Moher, D., 2021. *The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. The BMJ*, <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

Paricahua Choque, M., 2021. Cambio Climático y Desarrollo Sostenible. *Revista Latinoamericana Ogmios*, 21(1). <https://doi.org/10.53595/rlo.2021.1.008>.

Pateiro, M., Munekata, P.E.S., Domínguez, R. and Lorenzo, J.M., 2020. Extensive livestock farming against climate change in Spain. *ITEA Informacion Tecnica Economica Agraria*, 116(5), pp.444–460. <https://doi.org/10.12706/itea.2020.024>.

Ramirez, R.F., Vargas, P.L. and Cardenas, O.S., 2020. La seguridad alimentaria: una revisión sistemática con análisis no convencional. *Espacios*, [online] 41(45), pp.319–328. <https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n45p25>.

Salinas, M., 2020. *Sobre las revisiones sistemáticas y narrativas de la literatura en Medicina*.

Staddon, P.L. and Faghihinia, M., 2021. Grazing intensity is key to global grassland carbon sequestration potential. *Sustainable Environment*, 7(1). <https://doi.org/10.1080/27658511.2021.1895474>.

Steinfeld Henning, Gerber Pierre, Wassenaar Tom, Castel Vincent, Rosales Mauricio and de Haan Cees, 2007. *La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones*. Roma.

Van Eck, N.J. and Waltman, L., 2010. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), pp.523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>.

Varela, N.E., Estévez, S.O. and Sánchez, S.S., 2024. Food in the international institutional discourse: A lexical analysis of official documents on climate change. *Política y Sociedad*, 61(3). <https://doi.org/10.5209/poso.88151>.

Viglizzo, E.F.R.M.F., 2019. *Is there a missing link in the carbon balance calculation in Argentine grazing livestock systems?*

Zhang, Y.W., Peng, Z.C., Chang, S.H., Wang, Z.F., Li, L., Li, D.C., An, Y.F., Hou, F.J. and Ren, J.Z., 2024. Grazing management can achieve the reconfiguration of vegetation to combat climate impacts and promote soil carbon sequestration. *Plant Diversity*. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2024.09.002>.

CAPÍTULO 4 BALANCE DE CARBONO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CARNE BOVINA EN MÉXICO

Saulo Acevedo-Cruz²; Juan Antonio Leos Rodríguez³; Victoria Pacheco-Almaraz^{4*}; Rafael Núñez Domínguez⁵; Enrique Genaro Martínez González⁶

*autor de correspondencia

Resumen

Durante largos periodos los niveles de Gases de Efecto Invernadero en la atmósfera permanecieron constantes; sin embargo, en los últimos años han experimentado una tendencia al alza responsabilizando a diferentes sectores, particularmente a la ganadería. El objetivo fue analizar la dinámica de emisiones y captura de carbono en la producción de carne bovina en México, según el marco Tier 2 del IPCC y análisis de uso de suelo, para contribuir en la generación de información que impulse la transición hacia modelos de producción de carbono neutro. Los resultados muestran que, un kilogramo de carne producida en sistemas intensivos emite 11 kg CO₂e mientras que para los sistemas extensivos este valor es de 23 kg CO₂e, siendo el metano (CH₄) la principal fuente, a través de los procesos de fermentación entérica. En los sistemas extensivos se capturan 327 kg CO₂e de los cuales el 99% corresponde al carbono almacenado en el suelo. El sistema 2 es más eficiente por unidad de producto, al requerir "menos inventario ecológico" (menos espacio/carbono retenido) para colocar un kg de carne en el mercado, pero desde la óptica de mitigación, el sistema 3 funciona como un sumidero neto absoluto. Los sistemas 2 y 3 superan la neutralidad de carbono, por lo que pueden ser calificados como sistemas de carne carbono negativa. Se concluye que, la eficiencia productiva

² Centro Académico de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carretera México-Texcoco. CP 56230. Chapingo, Estado de México. ORCID: 0009-0000-3181-7126. Dirección de correo electrónico: saulo.acevedo@ciestaam.edu.mx

³ División de Ciencias Económico Administrativas (DICEA), Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carretera México-Texcoco. CP 56230. Chapingo, Estado de México. ORCID: 0000-0002-5009-9251. Dirección de correo electrónico: jleos45@gmail.com

⁴ División de Ciencias Económico Administrativas (DICEA), Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carretera México-Texcoco. CP 56230. Chapingo, Estado de México. ORCID: 0000-0002-9825-1566. Dirección de correo electrónico: vpacheco@ciestaam.edu.mx

⁵ Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, CP 56230. Chapingo, Estado de México. ORCID: 0000-0002-1447-4632. Dirección de correo electrónico: RNUNEZD@chapingo.mx

⁶ Centro Académico y de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carretera México-Texcoco. CP 56230. Chapingo, Estado de México. ORCID:0000-0001-9312-5002. Dirección de correo electrónico: enriquemartinez@ciestaam.edu.mx

puede traducirse en mejoras en la generación de servicios ecosistémicos y sostenibilidad ambiental.

Abstract

For long periods of time, greenhouse gas levels in the atmosphere remained constant; however, in recent years they have shown an upward trend, with various sectors -particularly the livestock industry- being held responsible. Therefore, the objective is to analyze the dynamics of carbon emissions and sequestration in beef production in Mexico, based on the IPCC's Tier 2 framework and land-use analysis, to contribute to the development of inputs that drive the transition toward carbon-neutral production models. The results show that one kilogram of beef produced in intensive systems emits 11 kg CO₂e, while in extensive systems this value is 23 kg CO₂e, with methane (CH₄) being the primary source through enteric fermentation processes. In extensive systems, 327 kg CO₂e are sequestered, 99% of which corresponds to carbon stored in the soil. System 2 is more efficient per unit of product, as it requires "less ecological inventory" (less space/retained carbon) to bring one kg of meat to market; however, from a mitigation perspective, System 3 functions as an absolute net carbon sink. Systems 2 and 3 exceed carbon neutrality and can therefore be classified as carbon-negative meat systems. It is concluded that productive efficiency can translate into improvements in the provision of ecosystem services and environmental sustainability.

Palabras clave

Cambio climático, carbono neutro, ganadería sostenible, servicios ecosistémicos, eficiencia productiva.

Kw

Climate change, carbon neutrality, sustainable livestock farming, ecosystem services, production efficiency.

4.1 Introducción

Durante largos periodos las concentraciones atmosféricas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) permanecieron constantes; sin embargo, desde el periodo preindustrial han experimentado una tendencia al alza, atribuida a actividades antropogénicas como la industria energética, la gestión de residuos y la ganadería (IPCC, 2021; WMO, 2025). Dicho incremento es preocupante por el potencial de calentamiento global de elementos como el metano (CH_4) y sus impactos; ya que, en 2023 la ganadería emitió 4.3 Gt CO_2e , siendo el principal componente de emisiones en los sistemas agroalimentarios (FAO, 2023; FAO, 2025).

Estas emisiones tienen como origen la actividad humana expresados en CO_2e , y son la fermentación entérica con la producción de metano (CH_4) y la gestión de estiércol (CH_4 y N_2O) las mayores fuentes (Eskola et al., 2024). Esta creciente acumulación de emisiones potencializa el cambio climático global y al mismo tiempo evidencia la necesidad de su análisis para el diseño de estrategias de mitigación en el sector agropecuario, históricamente señalado como fuente de emisiones de GEI.

De acuerdo con Gennari et al. (2024), la producción de proteínas de origen animal emite una cantidad considerable de GEI. Producir un kg de carne bovina implica una huella de carbono, a escala mundial, de 99.48 kg CO_2e por kg de producto (Poore & Nemecek, 2018), sin embargo, se trata de un promedio global, lo que justifica su análisis. De manera general, producir 100 gramos de proteína proveniente de chícharos emite 0.4 kg de CO_2e , mientras que, la misma cantidad de proteína de origen animal (carne de bovino) emite 35 kg de CO_2e (Ritchie, Rosado & Roser, 2020).

Por otra parte, la mitigación y adaptación al cambio climático, se relaciona directamente con los servicios ecosistémicos, tales como la captura de carbono, considerada en la actualidad como la principal herramienta para mitigar el cambio climático (González-Quiroz et al., 2025). La vegetación fija CO_2 atmosférico mediante la fotosíntesis incorporando el carbono a la biomasa y liberando O_2 , contribuyendo al almacenamiento de carbono en la biomasa y el suelo,

El porcentaje de biomasa considerado carbono orgánico varía de acuerdo con la especie y el tipo de organismo vegetal (árboles, arbustos y herbáceas). En los ecosistemas terrestres los bosques representan los mayores sumideros de carbono (Cárdenas et al., 2026), de modo que, una mejor gestión de la vegetación impacta en el aumento de su potencial de captura (Walker et al., 2022); pueden almacenar cerca de 662 Gt de C y los sistemas silvopastoriles tropicales, han tenido registros de 387 Mg C ha⁻¹ (De la Cruz-López et al., 2024).

La ganadería si bien representa una fuente potencial de emisiones de GEI, también es una alternativa de captura de carbono en la vegetación y suelos donde se desarrolla la actividad, jugando un papel importante en función de su manejo y cuidado (Polín-Raygoza et al., 2025). Además, esta actividad puede ser monetizada por los productores, al considerarse una fuente de ingresos por servicios ecosistémicos (Witt et al., 2024), representando tanto una opción de mitigación del cambio climático como un instrumento económico.

La brecha entre las escasas investigaciones sobre el papel de la ganadería en el cambio climático y el creciente interés de los consumidores por compras ambientalmente responsables (Bongiovanni & Tuninetti, 2023), es una disyuntiva que sustenta esta investigación. El objetivo fue analizar la dinámica de emisiones y captura de carbono en la producción de carne bovina en México, según el marco Tier 2 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2019) y análisis de uso de suelo, para contribuir en la generación de información que impulse la transición hacia modelos de producción de carbono neutro.

La presente contribución brinda información relacionada con el papel que desempeñan los sistemas de producción de carne bovina en la dinámica del cambio climático y elementos de contexto para la temática de producción con carbono neutro.

4.2 Metodología

4.2.1. Origen de la información

La base de datos se integró con información proveniente de recorridos de campo en tres unidades de producción ubicadas en Calera, Zacatecas (sistema 1, intensivo), Playa Vicente y Jesús Carranza, Veracruz (sistema 2 y 3, extensivos), contrastando dos modalidades de engorda bovina presentes en México, sin pretender representar la diversidad productiva nacional, donde predominan los sistemas basados en pastoreo (Jaramillo et al., 2023).

En el periodo de mayo a agosto de 2025 se realizaron entrevistas personales con los propietarios y encargados operativos. Dichas unidades fueron seleccionadas a conveniencia, considerando su participación en el eslabón de producción primaria de la cadena de valor bovina, específicamente en la etapa de engorda o finalización de los animales destinados a la producción de carne (Rich, 2024).

Lo anterior fue complementado con información satelital de diciembre 2024 y percepción remota a través de Sistemas de Información Geográfica basadas en 1) polígonos de las áreas de estudio, 2) cartas de uso de suelo y vegetación Serie VII del (INEGI, 2024), 3) cartas edafológicas, 4) imágenes satelitales multiespectrales de Landsat, 5) divisiones político-administrativas de los municipios (INEGI, 2024)., Se obtuvieron imágenes de las bandas 4 y 5 para el insumo 4.

En las emisiones se consideró como fuente la fermentación entérica, referida al proceso digestivo de los rumiantes, donde microorganismos metanogénicos generan gases como el óxido nitroso (N_2O), dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) (Tseten et al., 2022). Del mismo modo, se incluyó la gestión de excretas, centrada en las estrategias para disminuir el impacto ambiental de los gases presentes en las heces (implementación de biodigestores, gestión de los nutrientes, compostaje, separación y almacenamiento del estiércol) (Symeon et al., 2025).

En el caso de la captura se consideró información referida al uso de suelo y vegetación, estatus de la vegetación y tipo de suelo en cada una de las zonas de estudio, ya que se estimó la captura superficial y almacenamiento en el suelo.

4.2.2 Sistematización de la información

Se estimaron las emisiones de GEI en las unidades de producción basados en herramientas metodológicas desarrolladas por el panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC, 2019), específicamente el nivel 2, (Tier 2), que representa un método de complejidad intermedia para calcular inventarios de GEI, utilizando factores de emisión específicos de cada país o región. Se calcularon emisiones provenientes de los procesos de fermentación entérica y gestión de excretas por superficie, unidad animal y kilogramo de carne producido en cada sistema (Cuadro 3).

Cuadro 3. Fórmulas para cálculo de emisiones de GEI en bovinos para carne.

Fuente de emisión	Fórmula	Descripción
Fermentación entérica	EMISIONES DE METANO (CH₄) $CH_4 = N \times \left(\frac{GE \times Y_m \times 365}{55.65} \right)$ GE = ingesta diaria de energía bruta (gross energy (MJ cabeza⁻¹ día⁻¹). Y_m = fracción de la energía bruta que se convierte en metano (%). 55.65 = factor para convertir energía de metano MJ a kg CH₄. Las tablas de Y_m y los valores de ingesta de energía son proporcionados por el IPCC (2019) y varían por especie, tipo de animal, productividad y dieta.	Depende del consumo de energía bruta (GE) y del factor de conversión de metano (Y_m), el cual representa la proporción de la energía ingerida que se pierde en forma de metano durante la fermentación entérica.
Gestión de excretas	EMISIONES DE METANO (CH₄) $CH_{4(mm)} = \sum_{T,S,P} \frac{N_{(T,P)} \times VS_{(T,P)} \times AWMS_{(T,S,P)} \times EF_{T,S,P}}{1000}$ CH₄(mm) = emisiones anuales de CH₄ por manejo de estiércol (kg CH₄ año⁻¹). T = tipo de animal (p. ej., bovino). P = Clase de productividad. S = Tipo de sistema de manejo de estiércol. N_T, P_j = número de cabezas. VS_T, P_j = tasa de sólidos volátiles excretados (kg VS cabeza⁻¹ año⁻¹). AWMS_T, S, P_j = fracción del estiércol manejado en S. EF_T, S, P_j = factor de emisión de metano para ese sistema (g CH₄ kg⁻¹ VS). /1000 = conversión de g a kg.	Determinadas por la cantidad de sólidos volátiles excretados (VS), el potencial máximo de producción de metano del estiércol (Bo) y el factor de conversión de metano (MCF), que refleja las condiciones ambientales y el sistema de manejo del estiércol.

	EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO (N₂O) $N_2O_{direct} = \sum_{T,S} N(T) \times Nex(T) \times MS(T,S) \times EF_3(S) \times \frac{44}{28}$ N₂O direct = Emisiones directas anuales (kg / año). T = tipo de animal (p. ej., bovino). S = Tipo de sistema de manejo de estiércol. Nex = cantidad de nitrógeno excretados (kg cabeza⁻¹ año⁻¹). MS = fracción del estiércol manejada en el sistema. EF₃ = factor de emisión. 44/28 = factor de conversión del nitrógeno a óxido nitroso $N_2O_{indirect} = (N_{volatilized} * EF_{volat}) + (N_{leached} * EF_{leach}) \times \frac{44}{28}$ Nvolatilized = nitrógeno volatilizado como NH₃/NO_x Nvolat = factor de emisión por volatilización. Nleached = nitrógeno perdido por escurrimiento o lixiviación. EFleach = factor de emisión por lixiviación (IPCC, 2019). 44/28 = factor de conversión del nitrógeno a óxido nitroso.	Su magnitud depende de la cantidad de nitrógeno excretado por los animales (Nex), de la fracción del estiércol manejada en cada sistema (MS) y del factor de emisión correspondiente (EF₃). Debido a que el N₂O posee un potencial de calentamiento global superior al del CH₄, pequeñas cantidades emitidas pueden representar una contribución importante al total de emisiones calculadas en los inventarios en términos de CO_{2e}.
--	--	---

Fuente: Elaboración propia con base en IPCC (2019).

Se estimó la captura de carbono superficial y las reservas de carbono en el suelo donde se desarrolla la actividad. Se categorizó el uso de suelo y vegetación de las zonas de estudio, teniendo como referencia las cartas temáticas de las zonas de producción, basados en la serie VII del (INEGI,2024). El estatus de las categorías de vegetación se validó con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), mediante imágenes.

El NDVI es un indicador espectral que cuantifica el vigor, la densidad y la actividad fotosintética de la vegetación; refiere que la vegetación sana absorbe gran parte de la radiación roja para la fotosíntesis y refleja intensamente la radiación del infrarrojo cercano (Rouse et al., 1974; Tucker, 1979). Oscila entre -1 y +1, valores altos evidencian mayor cobertura vegetal, biomasa y actividad fotosintética, mientras que los bajos o negativos corresponden a superficies con poca vegetación.

En el caso de la captura superficial, a cada categoría de vegetación se le asignó un valor de biomasa, calibrando información de campo con valores publicados. Posteriormente, la captura superficial se convirtió a carbono, mediante la fracción de 0.47 del IPCC (2019). En el caso del almacenamiento en el suelo, el procedimiento a seguir fue el mismo, es decir, a cada tipo de suelo se le asignó un valor de biomasa y enseguida se transformó a carbono. Ambos resultados fueron sumados para determinar la captura total de carbono por superficie, unidad animal y kilogramo de carne producida.

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Caracterización de las unidades de producción

El sistema 1 (intensivo) presenta una carga animal de 289.5 cabezas / ha, representando unidades típicas de producción de las zonas centro y norte de México, mientras que el 2 y 3 (extensivos) registraron 2.5 y 1.3 cabezas / ha, respectivamente, evidenciando la forma más común de producción en el sur (Cuadro 4).

El perfil productivo difiere entre los sistemas, el primero de tipo empresarial orientado a un mercado especializado y con estrategias idóneas en nutrición y de manejo. Por el contrario, los extensivos son de carácter familiar y tienen el propósito central de abastecer de becerros a sistemas intensivos de producción. El ganado bovino proveniente de sistemas intensivos tiene una mayor disponibilidad de masa forrajera y nutrientes que aquellos criados extensivamente, impactando positivamente en la ganancia de peso diario y en la disminución de la intensidad de emisiones (Meo-Filho et al., 2022).

Cuadro 4. Caracterización de los sistemas de producción bovina evaluados.

Sistema	Tipo	Sumidero de carbono	Superficie (ha)	N°. de cabezas	Composición	Peso vivo (kg /pv)	Permanencia en el sistema (meses)
1	Intensivo	No	21.8	6,312	5,311 hembras 1,001 machos	440	4
2	Extensivo	Si	10	25	machos	300	9
3	Extensivo	Si	25	32	machos	282	11

Fuente: Elaboración propia.

La caracterización del uso de suelo y vegetación de las unidades con potencial de captura de carbono (2 y 3), indica la presencia de pastizales cultivados e inducidos, como vegetación dominante (**Figura 11** y **Figura 12**), lo que respalda el posicionamiento de estos municipios (Jesús Carranza y Playa Vicente, Veracruz) en la producción de bovinos en el estado de Veracruz, siendo una actividad ganadera de tipo extensiva.

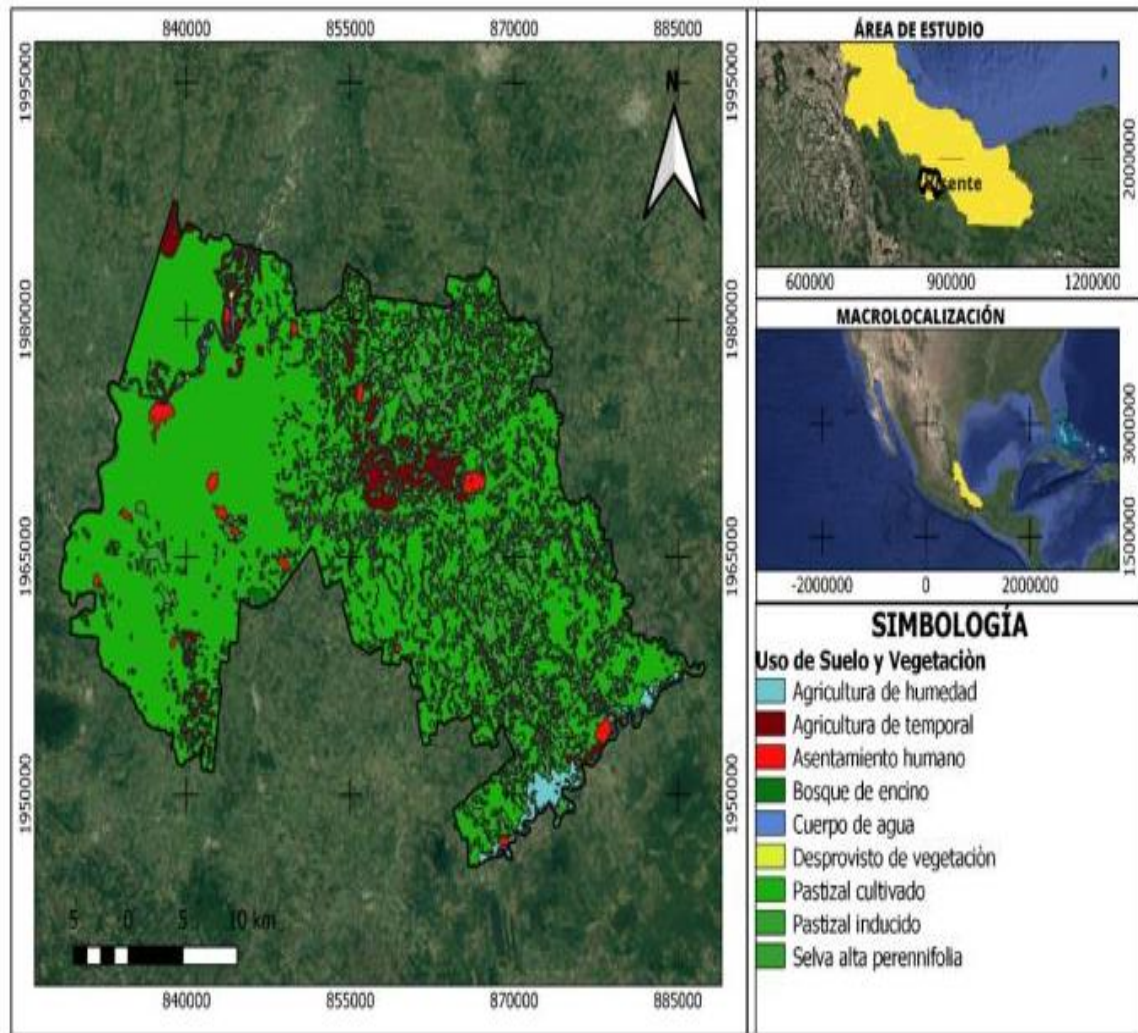


Figura 11. Uso de suelo y vegetación de Playa Vicente, Veracruz.
Fuente: Elaboración propia con base en información de campo.

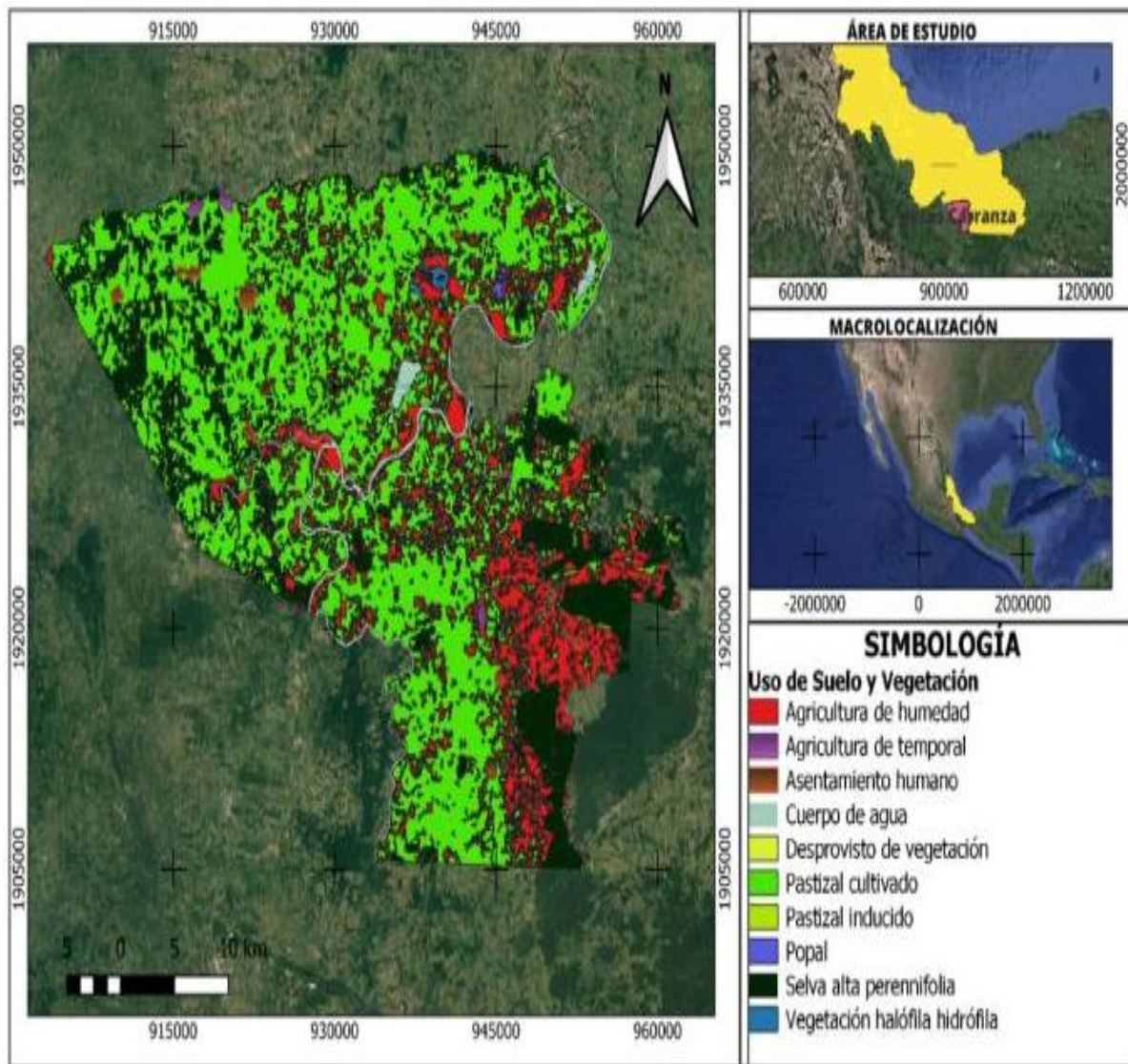


Figura 12. Uso de suelo y vegetación de Jesús Carranza, Veracruz.
Fuente: Elaboración propia con base en información de campo.

El NDVI mostró valores más altos en Playa Vicente (0.3706 – 0.5573) que en Jesús Carranza (0.3054 – 0.4730) (**Figura 13** **Figura 14**), indicando que, en la primera zona se cuenta con vegetación más densa, sana y con alta actividad fotosintética; esto puede traducirse en mayor producción de biomasa aérea, cobertura del dosel más amplia y mejor condición del forraje (Glenn et al., 2008; Pettorelli et al., 2005).

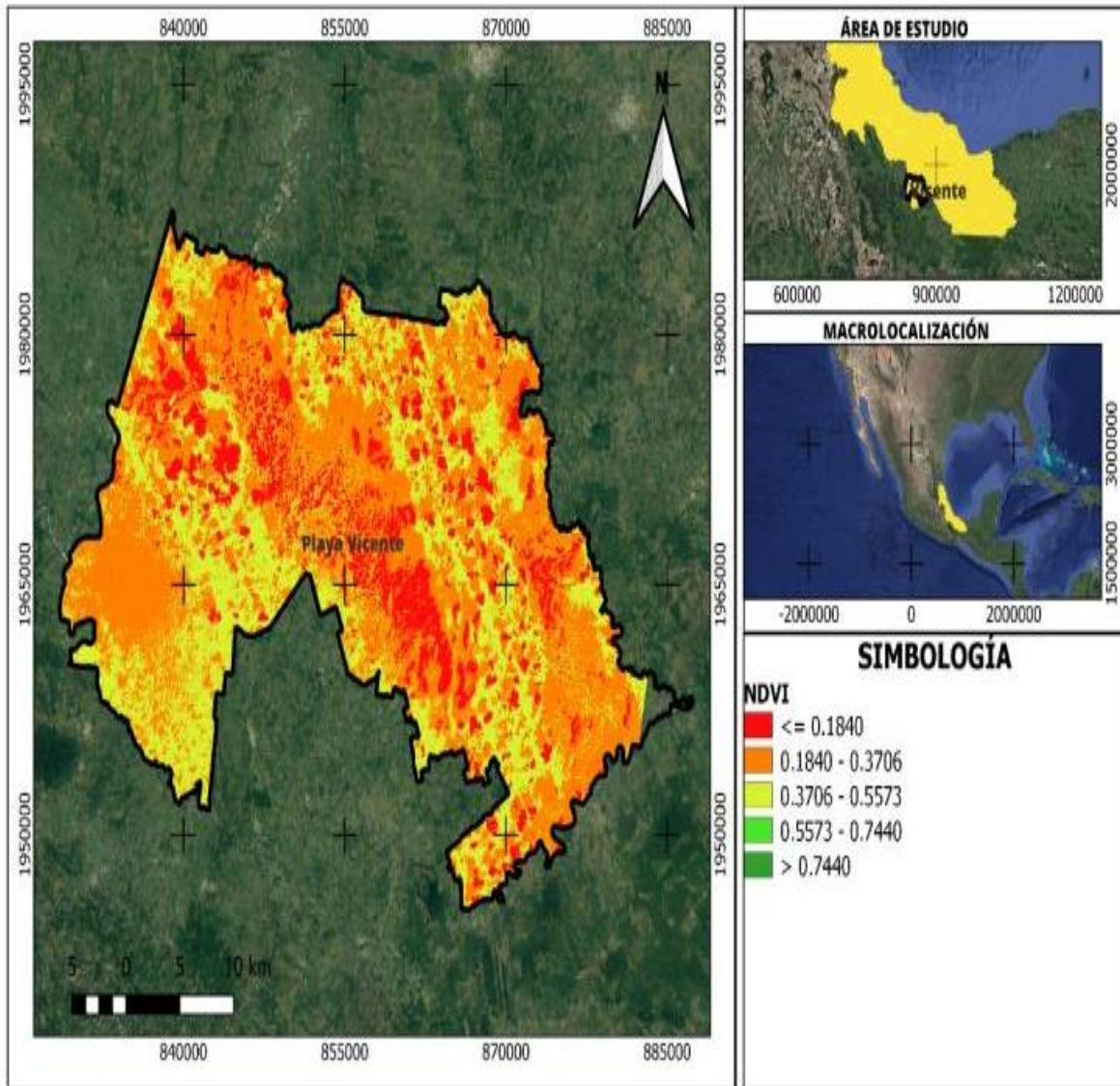


Figura 13. Valores de NDVI para las categorías de uso de suelo y vegetación de Playa Vicente, Veracruz.

Fuente: Elaboración propia con base en información de campo.

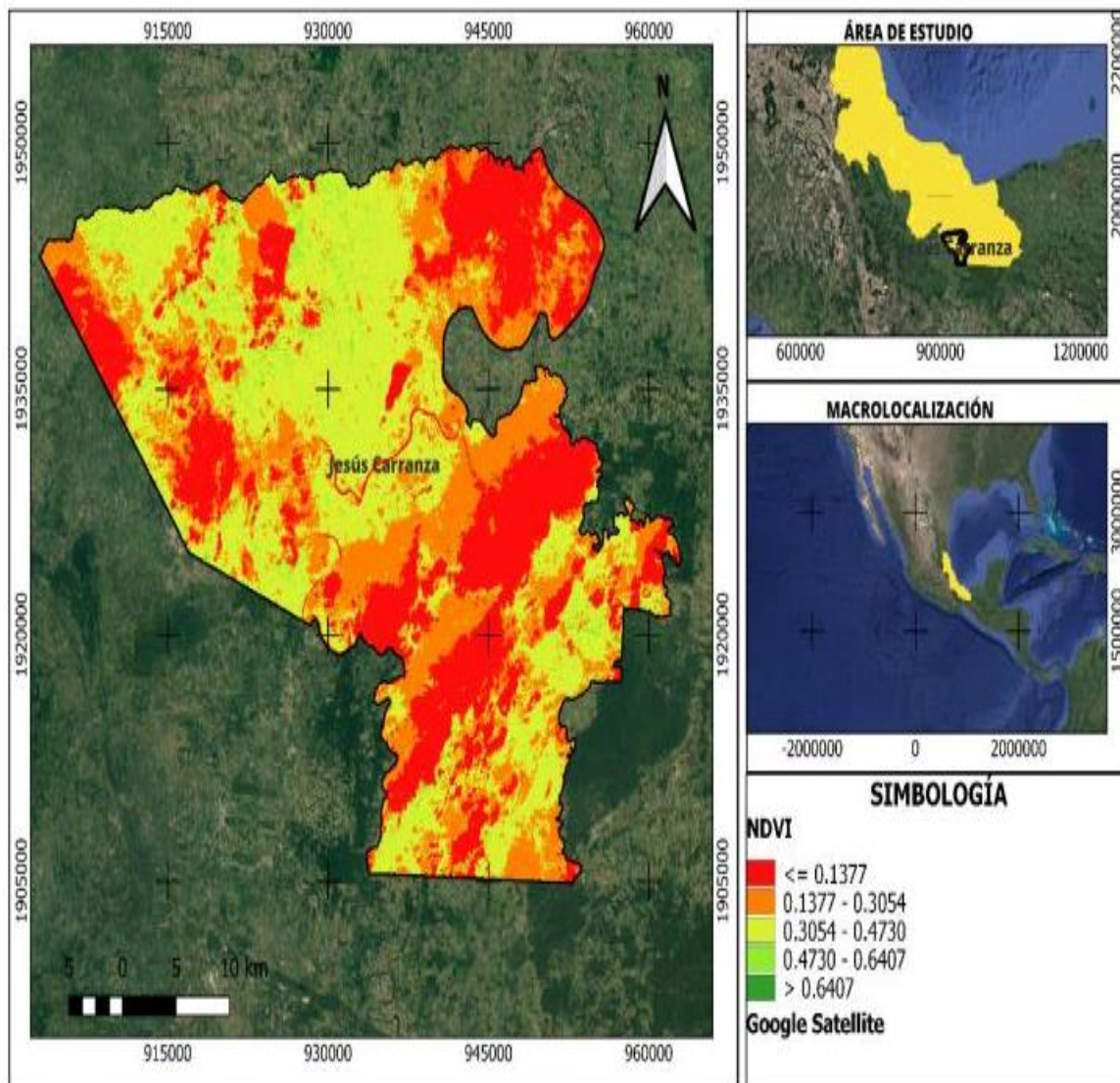


Figura 14. Valores de NDVI para las categorías de uso de suelo y vegetación de Jesús Carranza, Veracruz.

Fuente: Elaboración propia con base en información de campo.

La caracterización edafológica mostró que en el municipio de Playa Vicente predominan los Cambisoles dístricos y Acrisoles órticos, mientras que, en Jesús Carranza se identificaron Cambisoles vérticos y acrisoles húmicos (**Figura 15** y **Figura 16**). En pastizales cultivados e inducidos, las propiedades físicas y químicas de estos suelos favorecen la estabilización del carbono orgánico, aunque su almacenamiento está en función del aporte continuo de biomasa vegetal (Bai & Cotrufo, 2022; Liu et al., 2023).

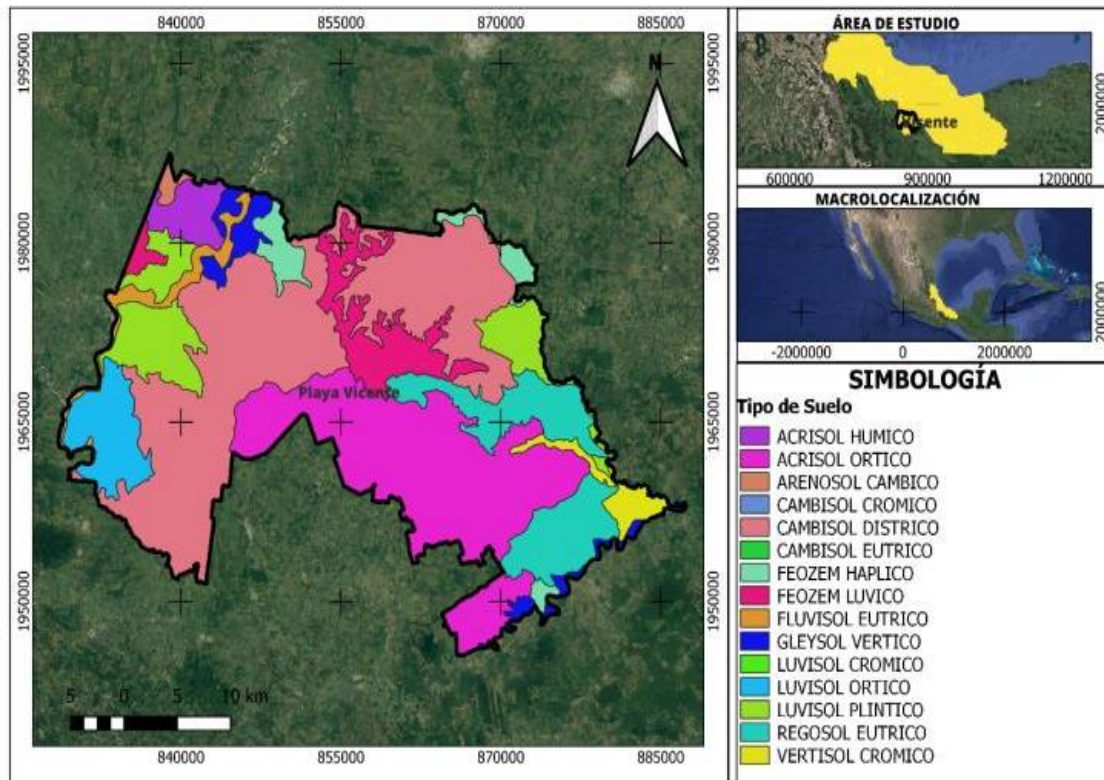


Figura 15. Suelos presentes en Playa Vicente Veracruz.

Fuente: Elaboración propia con base en información de campo.

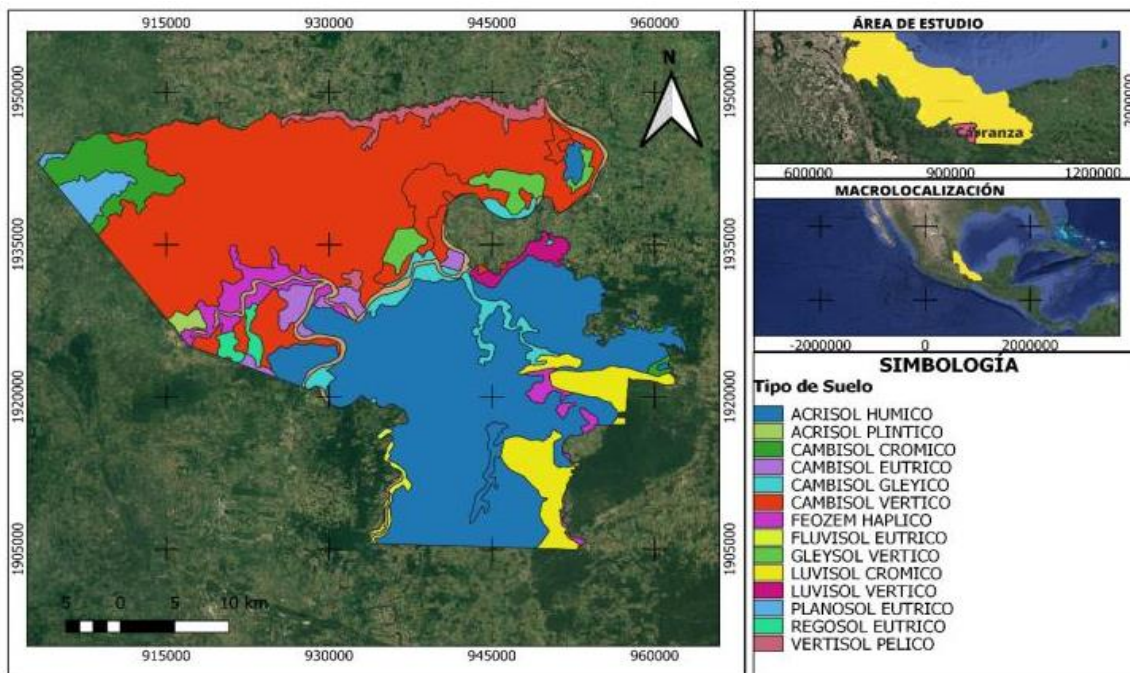


Figura 16. Suelos presentes en Jesús Carranza, Veracruz.

Fuente: Elaboración propia con base en información de campo.

Con base en los hallazgos, considerando que las zonas con sistemas extensivos presentan el mismo uso de suelo, pero con diferentes valores en el NDVI, se sugiere que, en Playa Vicente existe mayor aporte de biomasa aérea y radical al suelo por su mayor cobertura vegetal y vigor fotosintético, y consecuentemente puede presentarse un mayor potencial de captura y almacenamiento de carbono.

4.3.2 Estimación de emisiones

El sistema intensivo (1) emite una mayor cantidad de GEI con un valor de 2,271.5 toneladas CO₂e/ha, mientras que los sistemas extensivos (2 y 3), tienen valores de 12.3 y 6.1 toneladas CO₂e/ha, respectivamente; es decir, existe una marcada diferencia en la huella de carbono por unidad de superficie en los sistemas analizados, ya que, la alta carga animal del sistema 1 genera emisiones superiores. La fermentación entérica es la principal fuente, a través del metano (CH₄) que aporta entre el 56 y 63 % del total de CO₂ e (**Figura 17**).

El óxido nitroso (N₂O) derivado de las excretas constituye la segunda fuente, mientras que el CH₄ asociado al mismo proceso representa una fracción marginal del total. La prevalencia de la fermentación entérica en las emisiones coincide con lo reportado por la FAO (2019) y Gerber et al. (2013), quienes reportan que el metabolismo digestivo de los rumiantes es el mayor vector de impacto climático sectorial, seguido por el óxido nitroso (N₂O) de las excretas.

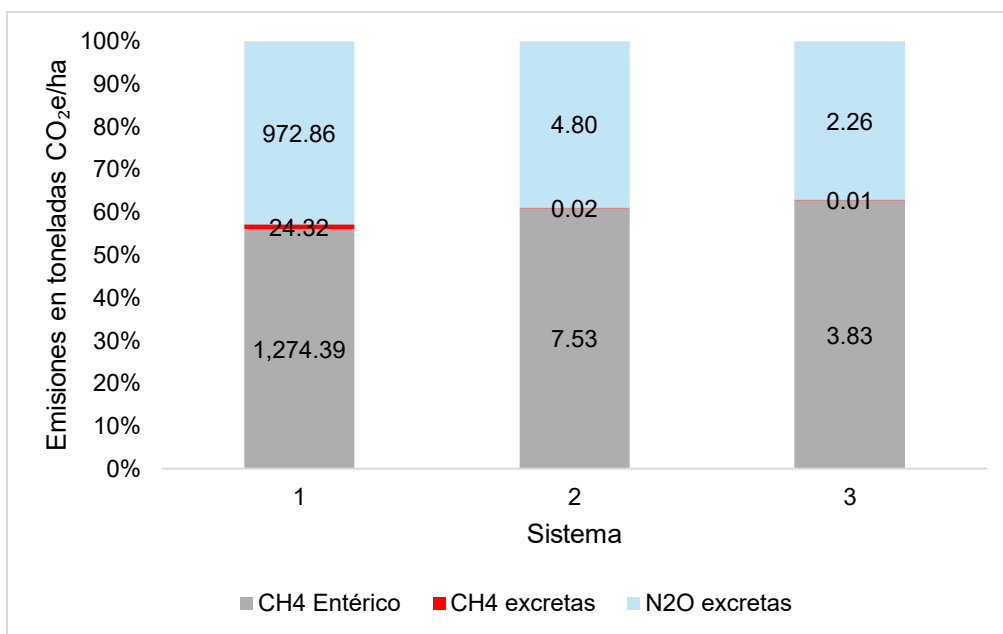
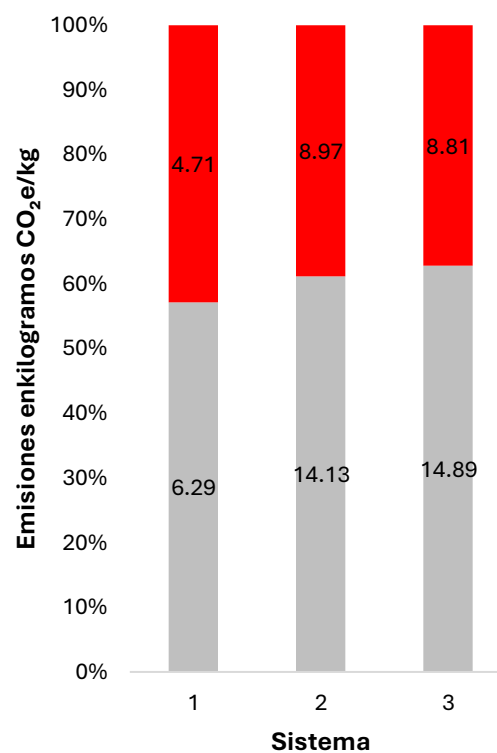
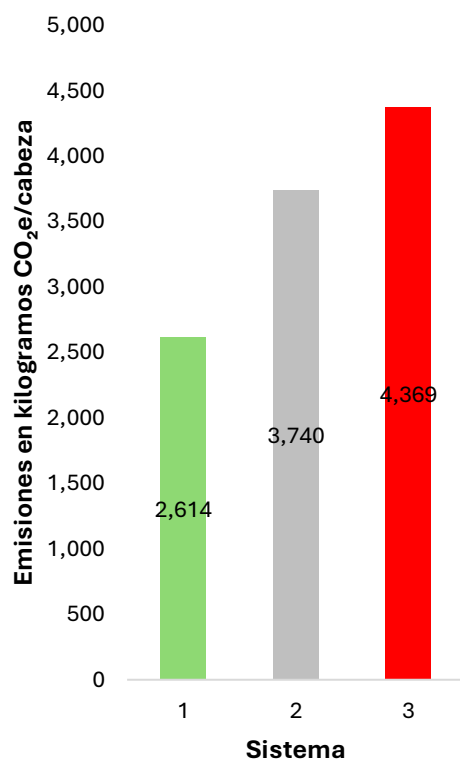


Figura 17. Emisiones totales por ha.

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, el total de **emisiones por unidad animal** es mayor en el sistema extensivo (3), con 4.36 toneladas CO₂e/ cabeza, mientras que el sistema intensivo (1) emite 2.26 toneladas CO₂e/ cabeza (**Figura 18**). Del mismo modo, las **emisiones por kilogramo de carne producida** permiten afirmar que el sistema extensivo (3) tiene un impacto ambiental mayor, con un total de 23.7 kg de CO₂e, mientras que el sistema intensivo (1) genera únicamente 11.0 kg de CO₂e (**Figura 19**).



■ CH4 Entérico ■ Gestión de excretas ■

Figura 18. Emisiones por cabeza (kg CO₂e /cabeza /año).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Emisiones por kilogramo de carne (kgCO₂e /kg /año).

Fuente: Elaboración propia.

El análisis del impacto ambiental considerando únicamente la superficie puede generar interpretaciones sesgadas sobre la sostenibilidad real de los sistemas, ya que no considera la eficiencia con la que se utiliza el recurso forrajero. Al incorporar la densidad de inventario permite evaluar la intensidad productiva, ya que, mientras los sistemas extensivos operan con cargas muy bajas (2.5 y 1.3 animales/ha), el sistema intensivo sostiene una densidad de 289.5 animales/ha (Broocks et al., 2020; Mogensen et al., 2015; Wang et al., 2024), lo que muestra diferencias en el uso del suelo y en productividad por unidad de superficie.

En la **Figura 18** se reporta la cantidad de emisiones por unidad animal en términos de kg CO₂e /cabeza /año en donde la principal fuente de emisión proviene de la fermentación entérica y el resto de la gestión del estiércol. Por otro lado, la **Figura 19** muestra la cantidad estimada de kg CO₂e /kg /año que se generan al producir un kilogramo de carne de bovino. Es importante mencionar que en ambos tipos de estimaciones se consideran las mismas fuentes de emisión.

Esta gran concentración de emisiones provenientes de la fermentación entérica se traduce en una mayor eficiencia de conversión alimenticia, en los ciclos productivos más cortos (permanencia en los sistemas) y en la etología (Herrero et al., 2016), es decir, manejo de enfermedades, composición de la dieta, etc, factores que en conjunto respaldan los hallazgos, mismos que coinciden con diversos estudios (Carlson et al., 2023; Desjardins et al., 2012;; Lynch, 2019; Mcatee et al., 2025; Nogalski et al., 2018).

Lo anterior permite afirmar que, aunque el sistema intensivo muestra un impacto severo por unidad de superficie, su huella de carbono por unidad animal o por kilogramo de producto final (carne) suele ser significativamente menor que la de los sistemas extensivos, demostrando que la intensificación tecnológica estratégica puede mitigar las emisiones globales por unidad de alimento producido, lo que permite identificar puntos críticos y de intervención para contribuir en el desempeño ambiental de los sistemas ganaderos.

4.3.3. Estimación de captura

En las dos unidades de producción extensiva se capturan 159.57 ton CO₂ / ha, de los cuales el 99% (158.4 ton CO₂e / ha) corresponde al carbono almacenado en el suelo (**Figura 20**), valores situados dentro de los rangos para pastizales inducidos en el trópico húmedo de México según intensidad de manejo y mejoras aplicadas.

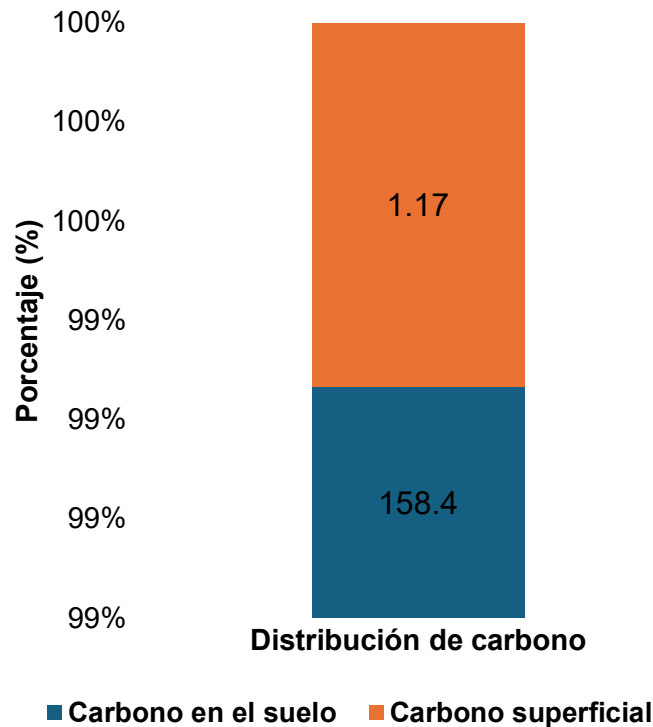


Figura 20. Distribución porcentual y absoluta del carbono total almacenado en sistemas de producción extensivos.

Fuente: Elaboración propia.

Dicha captura se relaciona con la cantidad y calidad de la vegetación, es decir, con las prácticas de manejo implementadas en los sistemas extensivos, reflejado en los valores del NDVI, que corresponden a pastizales con cobertura vegetal moderada a alta, asociada con una mayor productividad primaria y un incremento en el aporte de biomasa aérea y radical al suelo (Bai & Cotrufo, 2022; Liu et al., 2023).

Los valores más elevados observados en Playa Vicente sugieren un mayor potencial de captura y estabilización de carbono superficial respecto a Jesús Carranza, aun cuando ambos municipios presentan el mismo uso del suelo, lo que evidencia la influencia del vigor de la vegetación sobre los procesos de secuestro de carbono (Bai & Cotrufo, 2022; Sanderman et al., 2021).

Considerando la superficie para definir el inventario de carbono absoluto, se observa que en el sistema 3 éste es 2.5 veces mayor que el sistema 2, pero siendo un sistema subpoblado dada su baja carga animal (1.28 vs 2.5 cabezas/ha), refleja

mayores valores en términos de carbono por unidad animal y unidad de producto final (63.89 vs 124.78 toneladas CO₂e / cabeza y 212.96 vs 442.48 kilogramos de CO₂e / kg de carne producida), esto significa que en el sistema 2 el inventario se reparte entre muchos más individuos proporcionalmente (**Figura 21 y Figura 22**).

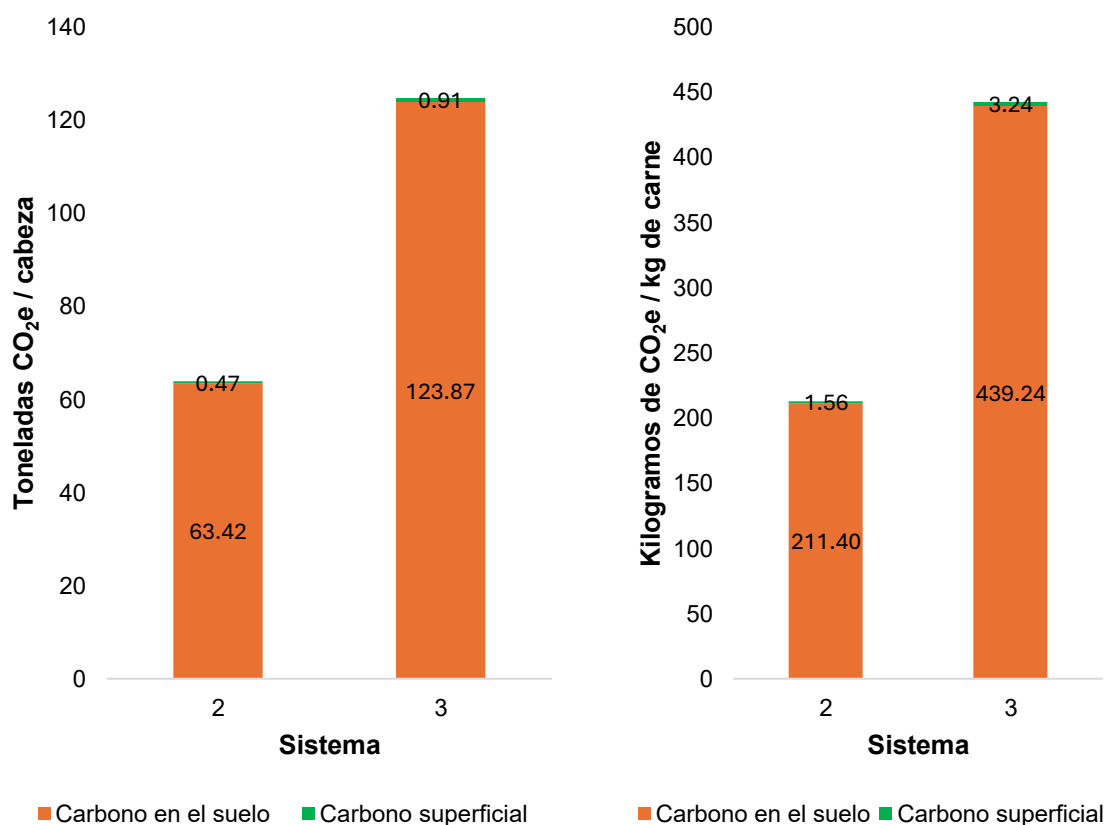


Figura 21. Captura por unidad animal. **Figura 22.** Captura por producto terminado.
Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

Desde la perspectiva de eficiencia el sistema 2 es más eficiente por unidad de producto, al requerir "menos inventario ecológico" (menos espacio/carbono retenido) para colocar un kilogramo de carne en el mercado, pero desde la óptica de mitigación, el sistema 3 funciona como un sumidero neto absoluto, por su gran extensión, pese a que sus indicadores por kilogramo son mayores, el predio en su totalidad retiene más del doble de carbono que el sistema 2, compensando su menor eficiencia ganadera con un mayor beneficio ambiental sistémico.

La capacidad de captura de carbono de los sistemas analizados se vincula con las estrategias de manejo y las características extensivas en donde capturan y almacenan carbono en la vegetación y el suelo, tal como sucede con los sistemas silvopastoriles, potreros convencionales, bancos de forraje, etc (Aryal et al., 2022). Del mismo modo, las labores culturales convencionales (labranza cero y el pastoreo rotacional controlado) influyen en el potencial de almacenamiento de carbono en el suelo al afectar la distribución de la materia orgánica y minerales.

Derivado de lo anterior se asume que los sistemas extensivos con mayor disponibilidad de área podrían desempeñar un papel relevante en la mitigación de emisiones, al generar reservas de carbono capaces de compensar parcialmente los gases de efecto invernadero emitidos durante la producción bovina.

4.3.4 Balance

El análisis del balance permite afirmar tres escenarios: 1) desde la óptica de las emisiones, el sistema 1 es el más eficiente requiriendo menor inventario ecológico de emisión directa por kilogramo de carne; 2) con la lógica de optimización de recursos el 2 es mejor en el uso del inventario de captura, requiere únicamente 213 kg de CO₂ retenido en su ecosistema por cada kilogramo de carne colocado en el mercado y, 3) desde la perspectiva de mitigación absoluta, el 3 es un sumidero altamente eficiente, su captura compensa con creces su mayor intensidad de emisión (**Figura 23**).



Figura 23. Emisiones de GEI y captura de carbono (kg de CO₂e) por kg carne producida (la distancia vertical representa el balance neto).
Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados, los sistemas 2 y 3 superan la neutralidad de carbono, por lo que pueden ser calificados como sistemas de carne carbono negativa, fenómeno que se basa en que la biomasa superficial y carbono orgánico en el suelo, neutralizan el metano emitido por el hato. Estos rendimientos se alcanzan y mejoran con el diseño agroforestal e intensificación sostenible como los sistemas silvopastoriles, pastoreo regenerativo de alta densidad y diversificación del paisaje (Botero, 2003; Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2018).

4.4 Conclusiones

Aunque la fermentación entérica es la principal fuente de emisiones a través del metano en la producción bovina, la eficiencia productiva puede alcanzarse por dos vías: en el sistema intensivo al optimizar la conversión alimenticia, reducir el tiempo de ciclo biológico y con ello las emisiones brutas de metano entérico por kilogramo de carne, mientras que el sistema extensivo sucede a nivel sistema, por su

capacidad de secuestro de carbono en el suelo y vegetación que supera las emisiones operativas, generando una huella de carbono negativa.

El uso integral de la metodología Tier 2 del IPCC (2019) y herramientas de percepción remota permitió cuantificar con precisión el balance de carbono, incorporando variables productivas locales y potencial de captura superficial-suelo, de modo que constituye una herramienta indispensable para modelar la sustentabilidad de los sistemas ganaderos. Sin embargo, limitaciones relacionadas con la resolución temporal de las imágenes satelitales y escasez de coeficientes de emisión empíricos para dietas locales dan pie a futuras investigaciones.

En futuras investigaciones se sugiere implementar mediciones directas en campo (como el uso de cámaras metabólicas), validación de modelos de dinámica de carbono en el suelo a largo plazo, así como, la evaluación del impacto de la inclusión de sistemas silvopastoriles (árboles y arbustos) para elevar el porcentaje de captura superficial actual (1%) y el monitoreo a largo plazo de la estabilidad del carbono almacenado en el suelo bajo diferentes intensidades de pastoreo rotacional.

4.5 Literatura citada

- 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(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21089-4>
- Bai, Y., & Cotrufo, M. F. (2022). *Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions*. *Science*, 377(6606), 603–608. <https://doi.org/10.1126/science.abo2380>
- Bongiovanni, R. G., & Tuninetti, L. (2023). Huella de Carbono de la carne: Un estudio de caso. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 31(1), 49–63. <https://doi.org/10.53588/alpa.310104>
- Botero, B. J. A. (2003). Contribución de los sistemas ganaderos tropicales al secuestro de Carbono. In Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Ed.), *Agroforestería para la Producción Animal en América Latina*.
- Broocks, A., Branham, K., Place, S., Rolf, M., & Calvo-Lorenzo, M. (2020). *Fact Sheet: Tough Questions about Beef Sustainability*.
- Cardenas, R. C., Gallardo, L. J. F., & Figueroa, O. O. (2026). Almacenamiento de carbono en plantaciones exóticas andinas: Eucalyptus globulus vs Pinus radiata. *Revista Alfa*, 10(28), 502–517. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.448>
- Carlson, Z. E., McPhillips, L. J., Stowell, R. R., Erickson, G. E., Drewnoski, M., & MacDonald, J. C. (2023). Evaluation of growth performance, carcass characteristics, and methane and CO₂ emissions of growing and finishing cattle raised in extensive or partial-intensive cow-calf production systems. *Journal of Animal Science*, 101. <https://doi.org/10.1093/jas/skac368>
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). (2018). *Potencial de los sistemas silvopastoriles en la mitigación al cambio climático y en la generación de múltiples beneficios en fincas ganaderas de Costa Rica*. CATIE.
- Desjardins, R. L., Worth, D. E., Vergé, X. P. C., Maxime, D., Dyer, J., & Cerkowniak, D. (2012). Carbon footprint of beef cattle. *Sustainability*, 4(12), 3279–3301. <https://doi.org/10.3390/su4123279>
- Eska, N., Lee, J. S., & Park, K. H. (2024). Greenhouse gas emissions from livestock: sources, estimation, and mitigation. In *Journal of Animal Science and Technology* (Vol. 66, Number 6, pp. 1083–1098). *Korean Society of Animal Sciences and Technology*. <https://doi.org/10.5187/jast.2024.e86>

- FAO. (2023). *Pathways towards lower emissions: A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/3/cc9029en/cc9029en.pdf>
- FAO. (2025). *Greenhouse gas emissions from agrifood systems Global , regional and country trends , 2001–2023*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/greenhouse-gas-emissions-from-agrifood-systems.-global--regional-and-country-trends--2001-2023>
- Gennari, L., D'orazio, F., & Cogliati, M. G. (2024). *Asociación Argentina de Agrometeorología*. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio->
- Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., & Nelson, S. G. (2008). Relationship between remotely sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8(4), 2136–2160. <https://doi.org/10.3390/s8042136>
- González-Quiroz, O., Centeno-González, G., Cerda Castillo, M. E., Alexander Reyes, A., Medrano Peralta, J. G., Rayo Ríos, T. E., Vallejos Pichardo, J. A., & López Rivas, G. S. (2025). Contribución de áreas verdes de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-León), en la captura de carbono atmosférico. *La Calera*, 25(45), 128–136. <https://doi.org/10.5377/calera.v25i45.21676>
- Herrero, M., Henderson, B., Havlík, P., Thornton, P. K., Conant, R. T., Smith, P., Wiersenius, S., Hristov, A. N., Gerber, P., & Gill, M. (2016). Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*, 6(5), 452–461. <https://doi.org/10.1038/nclimate2925>
- INEGI. (2024). *Geografía y Medio Ambiente*. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *Emissions from Livestock and Manure Management*. In *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. (Eds.) Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, & S. Federici.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1>
- Jaramillo, V. J. L., Rojas, J. L. A., & Vargas, L. S. (2023). Escala de la producción y eficiencia técnica de la ganadería bovina para carne en Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 14(1), 154–171. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v14i1.5537>
- Jiménez, C. V. E., & Jiménez, A. A. M. (2025). El estudio de caso en investigaciones de medicina. *Unida Salud*, 4(2), 79–82. <https://doi.org/10.69940/sld.20250807>

- Liu, L., Sayer, E. J., Deng, M., et al. (2023). *The grassland carbon cycle: Mechanisms, responses to global changes, and potential contribution to carbon neutrality. Fundamental Research*, 3(2), 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.09.028>
- Lynch, J. (2019). Availability of disaggregated greenhouse gas emissions from beef cattle production: A systematic review. In *Environmental Impact Assessment Review* (Vol. 76, pp. 69–78). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.02.003>
- Martínez, S. R. A., Cantú, S., I., Yáñez, D., M. I., González, R. H., & Bejar, P. S. J. (2023). Reservorio de carbono y nitrógeno en un suelo Cambisol bajo dos usos de suelo en Linares, Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(79), 4–30. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1339>
- Mcatee, T. B., Renter, D. G., Betts, N. B., & Cernicchiaro, N. (2025). Pens of commercial feedlot cattle with better health and performance have lower estimated greenhouse gas emissions intensity. *Translational Animal Science*, 9. <https://doi.org/10.1093/tas/txaf087>
- McGinn, S. M., & Flesch, T. K. (2018). Ammonia and greenhouse gas emissions at beef cattle feedlots in Alberta Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 258, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.024>
- Meo-Filho, P., Berndt, A., Pezzopane, J. R. M., Pedroso, A. F., Bernardi, A. C. C., Rodrigues, P. H. M., Bueno, I. C. S., Corte, R. R., & Oliveira, P. P. A. (2022). Can Intensified Pasture Systems Reduce Enteric Methane Emissions from Beef Cattle in the Atlantic Forest Biome. *Agronomy*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy12112738>
- Mogensen, L., Kristensen, T., Nielsen, N. I., Spleth, P., Henriksson, M., Swensson, C., Hesse, A., & Vestergaard, M. (2015). Greenhouse gas emissions from beef production systems in Denmark and Sweden. *Livestock Science*, 174, 126–143. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2015.01.021>
- Nasiru, A., Suleiman, M. S., Idris, A. A., Jinjiri, A., Aminu, M. U., Gilima, Z. S., & Jibrin, M. J. (2021). Nitrous oxide emission from livestock production. *Nig. J. Anim. Prod*, 2021(4), 165–175.
- Nogalski, Z., Pogorzelska-Przybyłek, P., Sobczuk-Szul, M., Purwin, C., & Modzelewska-Kapituła, M. (2018). Effects of rearing system and feeding intensity on the fattening performance and slaughter value of young crossbred bulls. *Annals of Animal Science*, 18(3), 835–847. <https://doi.org/10.2478/aoas-2018-0022>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Myrsetrud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>

- Polín-Raygoza, A. L., Rodríguez-Tenorio, D., Campos-Ramírez, G., Humberto Díaz-García, L., García-Cervantes, D., & Muro-Reyes, A. (2025). *Secuestro del carbono: un reto de la ganadería extensiva frente al cambio climático por gases de efecto invernadero*. <https://doi.org/10.30973/aap/2025.11.0111007>
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- Rich, K. M. (2024). *Resilience in conflict-affected livestock value chains*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://doi.org/10.4060/cd0599>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2022). Environmental Impacts of Food Production" Published online at OurWorldinData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food'.
- Rojo, M. G. E., Mata, J. J., & Velásquez, M. A. (2003). Las masas forestales como sumideros de co2 ante un cambio climático global. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62990106>
- Rouse, W., Haas, H., & Deering, W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with erts . In *Remote Sensing Center*. NASA.
- Rui, Y., Jackson, R. D., Cotrufo, M. F., Sanford, G. R., Spiesman, B. J., Deiss, L., Culman, S. W., Liang, C., & Ruark, M. D. (2022). *Persistent soil carbon enhanced in Mollisols by well-managed grasslands but not annual grain or dairy forage cropping systems*. <https://doi.org/10.1073/pnas.2118931119/-DCSupplemental>
- Symeon, G. K., Akamati, K., Dots, V., Karatosidi, D., Bizelis, I., & Laliotis, G. P. (2025). Manure Management as a Potential Mitigation Tool to Eliminate Greenhouse Gas Emissions in Livestock Systems. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 17, Number 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su17020586>
- Tseten, T., Sanjorjo, R. A., Kwon, M., & Kim, S. W. (2022). Strategies to Mitigate Enteric Methane Emissions from Ruminant Animals. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(3), 269–277. <https://doi.org/10.4014/jmb.2202.02019>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- Walker, W. S., Gorelik, S. R., Cook-Patton, S. C., Baccini, A., Farina, M. K., Solvik, K. K., Ellis, P. W., Sanderman, J., Houghton, R. A., Leavitt, S. M., Schwalm, C. R., & Griscom, B. W. (2022). *The global potential for increased storage of carbon on land*. <https://doi.org/10.1073/pnas>

- Wang, T., Kreuter, U., Davis, C., & Cheye, S. (2024). Climate impacts of alternative beef production systems depend on the functional unit used: Weight or monetary value. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(31). <https://doi.org/10.1073/pnas.2321245121>
- Witt, B., McDonald, S., Cowley, R., Cuddihy, J., Silcock, J., Duckett, N., & Burnside, D. (2024). Introduction to the Special Collection of The Rangeland Journal on carbon and environmental service markets in rangelands. *The Rangeland Journal*, 46(6). <https://doi.org/10.1071/rj24040>
- World Meteorological Organization (WMO). (2025). *WMO greenhouse gas*. <https://wmo.int/resources/publication-series/greenhouse-gas-bulletin/wmo-greenhouse-gas-bulletin-no-21>
- Zhang, L., Yin, G., Wei, Z., Li, W., Cui, C., Wang, M., Zhao, C., Zhao, H., & Xue, F. (2024). Potential and Pathways of Carbon Emission Reduction in China's Beef Production from the Supply Chain Perspective. *Agriculture (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/agriculture14071190>

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES

Existe una relación compleja entre la ganadería y el cambio climático, ya que la actividad ganadera depende de los factores climatológicos para su desarrollo. Si los patrones del clima son afectados consecuentemente las cadenas de suministro, principalmente de materias primas, sufrirán efectos adversos poniendo en riesgo la producción de proteínas de origen animal con alto valor biológico, los cuales son claves en la evolución del ser humano.

Derivado de la creciente presión sobre la ganadería para disminuir su huella de carbono, es crucial transitar hacia una actividad más sostenible, mediante la implementación de diferentes sistemas de producción capaces de contribuir a la mitigación del cambio climático y al mismo tiempo generar resiliencia ante los estragos ocasionados por este fenómeno. Esto se confirma con la integración de los grupos temáticos que van desde el análisis del cambio climático y agricultura, las prácticas agrícolas-ganaderas y emisiones de GEI, hasta la reducción de emisiones-captura de carbono.

El interés científico hasta la década pasada se centraba en la búsqueda de los principales emisores de los GEI dentro del sector pecuario, dejando de lado su potencial como posible aliado en la mitigación del cambio climático. Actualmente, los investigadores optan por encontrar en los sistemas ganaderos aquella parte del eslabón que puede jugar un papel central en la captura de carbono proponiendo técnicas productivas que aumenten esta condición como los sistemas silvopastoriles y el manejo de las praderas y pastizales, creando así líneas de investigación emergentes.

Pese a que la fermentación entérica es la principal fuente de emisiones a través del metano en la producción bovina, la eficiencia productiva puede alcanzarse por dos vías: en los sistemas intensivos, a través de la optimización de la conversión alimenticia, reduciendo el tiempo de ciclo biológico y con ello las emisiones brutas por kilogramo de carne, mientras que en sistemas extensivos sucede a nivel

sistema, por su capacidad de secuestro de carbono en el suelo y vegetación que supera las emisiones operativas, generando una huella de carbono negativa.

El uso integral de las herramientas metodológicas empleadas en esta investigación (Tier 2 y percepción remota) permitió cuantificar con precisión el balance de carbono, incorporando variables productivas locales y potencial de captura superficial-suelo, de modo que constituye una herramienta indispensable para modelar la sustentabilidad de los sistemas ganaderos. Sin embargo, presenta limitaciones relacionadas con la resolución temporal de las imágenes satelitales y escasez de coeficientes de emisión empíricos para dietas locales.

El balance de carbono analizado además de ser un producto ambiental representa un potencial activo económico para las unidades de producción, ya que, la reducción de emisiones y captura de carbono pueden influir en la disminución de costos de producción, diferenciación comercial de la carne y generación de ingresos adicionales a través de mecanismos de carbono y esquemas de pago por servicios ambientales, de modo que la transición hacia estos sistemas constituye una estrategia de mitigación climática y de diversificación de valor para los productores

En futuras investigaciones se sugiere implementar mediciones directas en campo (como el uso de cámaras metabólicas), validación de modelos de dinámica de carbono en el suelo a largo plazo, así como, la evaluación del impacto de la inclusión de sistemas silvopastoriles (árboles y arbustos) para elevar el porcentaje de captura superficial actual (1%) y el monitoreo a largo plazo de la estabilidad del carbono almacenado en el suelo bajo diferentes intensidades de pastoreo rotacional.