

ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LAS GANADERÍAS DE LECHE DE LA ZONA ANDINA DEL ECUADOR

AN ESTIMATE OF THE CARBON FOOTPRINT OF DAIRY FARMS IN THE ANDEAN REGION OF ECUADOR

Francisco Adolfo Gutiérrez-León^{1a}, Xavier Bolívar Lastra-Bravo^{1b*} y Vladimir Alexander Cali Aguirre^{1c}

^{1a} Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas. Jerónimo Leiton y Gatto Sobral s/n. Ciudadela Universitaria. CP 170521, Quito, Ecuador
<https://orcid.org/00000-0002-9749-3467>

^{1b} Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas. Jerónimo Leiton y Gatto Sobral s/n. Ciudadela Universitaria. CP 170521, Quito, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0001-6167-6942>

^{1c} Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas. Jerónimo Leiton y Gatto Sobral s/n. Ciudadela Universitaria. CP 170521, Quito, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0001-9135-2578>

* Autor para correspondencia: xblastra@uce.edu.ec

RESUMEN

El sector lácteo es responsable de aproximadamente el 3,3% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI), pero tiene potencial para desempeñar un papel importante en la mitigación del cambio climático mediante cambios en su gestión. Por ello, esta investigación tuvo como objetivo estimar las emisiones de GEI de las ganaderías de leche de dos provincias de la Sierra centro norte del Ecuador, por tipo y fuentes. La investigación se desarrolló en 24 ganaderías, agrupadas mediante un análisis de conglomerados en tres tipos (grandes, pequeñas y medianas), en función de sus características productivas. Para cuantificar y analizar las emisiones se utilizó el Programa Cool Farm Tool, y la información requerida se levantó mediante visitas en campo y entrevistas a los productores. Los resultados se analizaron de acuerdo con un diseño completamente al azar, mediante la prueba paramétrica de Fisher ($p < 0,05$). Los resultados indican que la fermentación entérica es la mayor fuente de emisiones de GEI (5,27 Ton de CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹, 43,39%). Las ganaderías medianas emiten la mayor cantidad de emisiones por litro de leche producida (2,3 CO₂-eq L⁻¹ leche FPCM), siendo 50% y 84% mayores que aquellas producidas por ganaderías pequeñas y grandes, respectivamente. Se concluye que las ganaderías grandes son las más eficientes, mientras que las pequeñas son las más resilientes, ya que producen una menor cantidad de emisiones de GEI.

Palabras clave: huella de carbono, gases de efecto invernadero, ganadería lechera, Región andina, Ecuador.

ABSTRACT

The dairy sector is responsible for approximately 3.3% of global greenhouse gas (GHG) emissions, but it has potential to play an important role in climate change mitigation through management changes. Therefore, this research aimed to estimate GHG emissions from dairy farms in two provinces of the north-central Highlands of Ecuador, by type and source. The research was carried out on 24 dairy farms, grouped by means of a cluster analysis into three types (large, small, and medium), according to their production characteristics. The Cool Farm Tool program was used to quantify and analyze emissions, and the required information was collected through field visits and interviews with producers. The results were analyzed according to a completely randomized design, using Fisher's parametric test ($p < 0.05$). The results indicate that enteric fermentation is the greatest source of GHG emissions (5.27 Ton CO₂-eq ha⁻¹ yr⁻¹, 43.39%). Medium-sized dairy farms generate the greatest amount of emissions per liter of milk produced (2.3 CO₂-eq L⁻¹ milk FPCM), being 50% and 84 % higher compared to small farms and large farms, respectively. It is concluded that large dairy farms are the most efficient, while small dairy farms are the most resilient since they produce fewer GHG emissions.

Key words: Carbon footprint, greenhouse emissions, dairy farming, Andean region, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

El término Huella de Carbono (HC), hace referencia a la cantidad de Gases de Efecto Invernadero (GEI) emitidas a la atmósfera, que son producto de las actividades antrópicas (por un individuo, organización, proceso, producto o evento) dentro de un límite especificado, medida en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq) (Faverín et al., 2019; Pandey et al., 2011). Su medición ha cobrado importancia en los últimos años, principalmente por su relación con el cambio climático y el consumo de recursos (Ramachandra y Mahapatra, 2016; Wiedmann y Minx, 2007). El CO₂, el vapor de agua (H₂O), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y algunos otros gases son considerados GEI, ya que son moléculas capaces de absorber calor (Kweku et al., 2018). El CH₄ y el N₂O tienen un potencial de calentamiento global para 100 años de 27,9 y 273 veces mayor que el del CO₂, respectivamente (IPCC, 2022). Pandey et al. (2011) plantean que la HC pretende ser una herramienta para orientar la producción y posibles recortes de emisiones de los GEI.

Guarduño (2005) menciona que la temperatura efectiva de la Tierra sería de -18 °C, pero la presencia de una atmósfera y de los GEI mantienen a la temperatura alrededor de 15 °C, y en consecuencia la vida. No obstante, el incremento en la producción de GEI, producto del uso de combustibles fósiles, carbón y gas, y de otras actividades antropogénicas, han causado un calentamiento global de aproximadamente 1,0 °C con respecto a los niveles preindustriales (Catalán, 2020). Es probable que el calentamiento global llegue a 1,5 °C entre 2030 y 2052 si continúa

umentando al ritmo actual le emisión de GEI. Los riesgos futuros relacionados con el clima del ritmo, el pico y la duración del calentamiento (IPCC, 2018). Desde hace 20 años, Wackernagel et al. (2002) alertaron que la demanda de la humanidad sobre el planeta se ha duplicado, producto del crecimiento de la población y del consumo individual. Las actividades humanas excedieron la biocapacidad total de la Tierra por primera vez principio de los años ochenta, manteniéndose desde entonces la tendencia al alza.

Los GEI generan impactos negativos sobre el ambiente, pero también a nivel político y social (Franchetti y Apul, 2012). Es así que, la preocupación internacional por las consecuencias adversas del cambio climático ha motivado a las organizaciones e instituciones a tomar medidas para conocer a fondo la dinámica de los GEI, siendo la HC uno de los indicadores reconocidos (Schneider y Samaniego, 2010).

Prenafeta and Fernández (2022) señalan que el sector lácteo genera aproximadamente el 3,3% de todas las emisiones antropogénicas mundiales de GEI. Pero, la producción agrícola y pecuaria tiene el potencial de desempeñar un papel importante en la mitigación del cambio climático mediante la reducción de los GEI (Holka et al., 2022). Cabe mencionar que, si bien los vacunos son los mayores productores de GEI dentro del sector pecuario, al comparar los kg CO₂-eq emitidos al producir un kg de proteína en la leche, poseen uno de los niveles más bajos (menor a 100 kg CO₂-eq kg_{proteína}⁻¹), comparable a lo que producen otras fuentes de proteína animal alternativa (Prenafeta y Fernández, 2022).

Es así que la ganadería de leche requiere

realizar cambios en su gestión para alcanzar este objetivo (Henriksson et al., 2011). Cecchini et al. (2018) mencionan que un reto que se enfrenta el sector es el de aumentar la ganancia económica de los productores sin entrar en conflicto con la reducción de las emisiones de GEI.

En el caso de Ecuador, la medición de la HC y de la producción de GEI en las ganaderías lecheras es algo relativamente nuevo, existiendo solo una ganadería que ha certificado su producción como carbono neutro (Dávalos, 2019). Y se destaca que hay otras ganaderías que están en proceso de certificación, y que varias empresas lácteas están midiendo su generación de GEI como una herramienta para la toma de decisiones, y para el manejo de sus proveedores, obteniendo como resultado una disminución del 10 al 15% en distintos rubros de producción (Centro de la Industria Láctea del Ecuador, 2020).

De acuerdo con las cifras de la última Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), 2023), en Ecuador existen 5,2 millones de hectáreas que se usan para labor agropecuaria, de las cuales el 57% se destinan a la producción de pasturas. La actividad agropecuaria predominante es la producción de ganado bovino con 3,9 millones de cabezas, de estas se ordeñan diariamente 816 mil cabezas a nivel nacional, alcanzando una producción de leche de 5,5 millones de litros de leche. La región sierra tiene la mayor producción con 4,4 millones de litros, no obstante, la producción de leche por vaca es de solo 8 litros. Cabe destacar que

el sector lácteo representa una participación del 0,34% sobre el PIB Total (Corporación Financiera Nacional (CFN), 2023)

Con el objetivo de aumentar el conocimiento sobre las emisiones de GEI producto de la ganadería de leche, y que los resultados sirvan para la toma de decisiones proambientales en el sector lechero ecuatoriano, en este trabajo se realiza una estimación de la huella de carbono y se cuantifican las emisiones de los GEI en las ganaderías de leche de la Sierra centro norte del Ecuador, así como la cantidad y el tipo de GEI que se producen en las diferentes actividades que se realizan, obteniendo la cantidad de CO₂-equivalente que se produce.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en las provincias de Pichincha (parroquias de Pintag, Amaguaña, Alóag, Sangolquí, Chaupi, Manuel Cornejo Astorga, Tambillo y Machachi) y Cotopaxi (parroquia de Sigchos) (Fig. 1), entre agosto 2020 y septiembre 2021. En la provincia de Pichincha se concentran el 40% de empresas productoras de leche (CFN, 2023), y en ella se produce el 18% de litros de leche a nivel nacional, mientras que en Cotopaxi se produce el 10,5%, siendo la primera y la tercera provincia productora de leche a nivel nacional, respectivamente (INEC, 2023).

Se cuantificaron las emisiones de GEI de 24 ganaderías, que representan aproximadamente el 10 % de las fincas proveedoras en el sector sur de la provincia de Pichincha de una de las

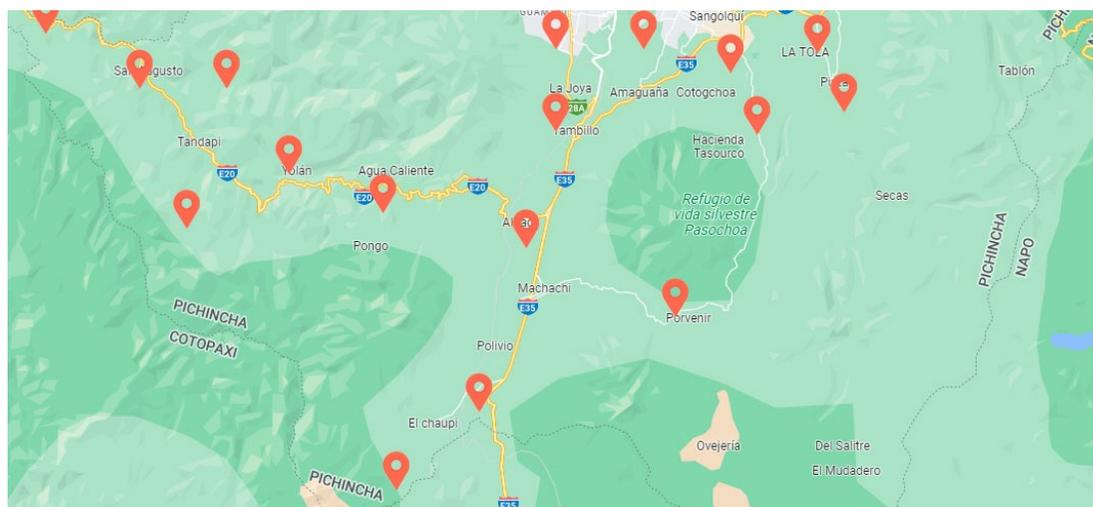


Fig. 1. Ubicación de las ganaderías de leche en las provincias de Pichincha y Cotopaxi. Fuente: Elaboración propia a partir de Google maps.

Fig. 1. Location of dairy farms in the provinces of Pichincha and Cotopaxi. Source: Own elaboration based on Google maps.

empresas lácteas más importantes de Ecuador, que aceptaron voluntariamente ser parte de esta investigación (Tabla 1), localizadas a una altitud entre los 2.500 y los 3.200 m.s.n.m. Las ganaderías se agruparon utilizando un análisis de conglomerados jerárquicos con el método Ward, realizado a través del programa INFOSTAT para clasificar y formar grupos relativamente homogéneos. Este análisis se hizo en función de las características: animales del hato, superficie de la finca, producción de leche anual, número de vacas en producción, y superficie de pastoreo. Como resultado se identificaron tres grupos: ganaderías grandes, ganaderías pequeñas y ganaderías medianas.

Se utilizó el Programa Cool Farm Tool (CFT) para realizar mediciones cuantitativas, creíbles y normalizadas de los GEI que se generan en las distintas actividades de las ganaderías de leche, las cuales se basan en las metodologías y los datos publicados del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (The Cool Farm, 2023). Alex Thumba et al. (2022) señalan que entre las ventajas de CFT destaca su adaptabilidad a todas las regiones geográficas y que está especializado en producción agropecuaria y biodiversidad, y como desventaja que no ofrece recomendaciones concretas para implementar estrategias metodológicas. Whittaker et al. (2013) consideran que CFT es la herramienta mejor valorada que está disponible de manera gratuita.

Esta herramienta calcula las emisiones a partir de variables relacionadas con tamaño del rebaño (terneras, terneros, novillos, vaconas, vacas en producción y vacas secas), alimentación (por pasturas, piensos, suplementos), manejo de estiércol, consumo de energía y transporte

interno (Tabla 2). Se estableció el límite de la cuna a la puerta de la finca para el cálculo de la HC. Se consideraron los tres alcances establecidos en el GHG Protocol: Alcance 1, emisiones directas del ganado y la producción de alimento en finca; Alcance 2, emisiones indirectas de la energía consumida en la finca; y, Alcance 3, otras emisiones indirectas por productos o servicios proporcionados por terceros.

La información requerida (Tabla 3) se levantó mediante visitas en campo, en la cuales se entrevistó individualmente a cada uno de los propietarios o técnicos encargados (cuestionario con preguntas semiestructuradas). Las respuestas de la entrevista fueron ingresadas en el programa CFT, que al ser procesadas arrojó como resultado los valores de emisiones de CO₂, N₂O y CH₄, principales gases emitidos por la actividad agropecuaria, para cada una de las fuentes señaladas en la Tabla 2. Los resultados se expresaron en CO₂ equivalente (CFA, 2018), utilizando los Potenciales de Calentamiento Global para 100 años para el metano (27,9) y el óxido nitroso (273) del 6° Informe de Evaluación del IPCC (Cool Farm Alliance, 2023), y en kg de leche corregida en grasa y proteína.

Para el cálculo del porcentaje de materia seca del alimento se tomaron muestras de las pasturas utilizando el método del cuadrante, en el cual se selecciona 1 m² al azar, donde se realiza un corte rasante y se recolecta la biomasa existente (Roza-Delgado et al., 2002). Esta muestra se secó en una estufa con ventilación forzada a 70 °C por 24 horas, y el porcentaje se obtuvo mediante la Ecuación 1.

$$\%MS = \frac{\text{Peso final (g)}}{\text{Peso inicial (g)}} * 100 \quad [1]$$

Tabla 1. Características de las ganaderías de leche evaluadas.

Table 1. Characteristics of the dairy farms evaluated.

Características	Tipo de Ganadería		
	Grande	Mediana	Pequeña
Número de ganaderías	2	5	17
Sistema de pastoreo	Semiestabulado	Pastoril	Pastoril
Superficie por ganadería (ha)	148,5	147,5	28,5
Superficie en pastoreo por ganadería (ha)	127,6	70,2	17,5
Promedio de vacas	850	132	68
Promedio de vacas en ordeño	474	58	31
Carga animal (Unidades Bovinas Adultas - UBA ha ⁻¹)	3.8	1.0	2.0
Producción de leche año (L año ⁻¹)	3.808.899,5	303.741,8	187.091,2
Producción de leche vaca ⁻¹ año (L año ⁻¹)	4.433,2	2.256,2	2.953,7
Litro leche por hectárea año (L ha ⁻¹ año ⁻¹)	26.132,9	2.085,8	7.898,5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Fuentes de GEI analizadas y sus características, requeridas en el programa CFT.
Table 2. Sources of GHG analyzed and their characteristics, required in the CFT program.

Alcance	Fuentes de GEI	Principales GEI emitidos	Características
Alcance 1:	Manejo del Pasto	N ₂ O	GEI que se liberan en el ciclo de cultivo de pasto donde está incluido los desechos de los animales que son excretados directo en las pasturas y los gases emitidos por microorganismos en el suelo.
Alcance 3	Fertilización de pastizales	CO ₂ , N ₂ O	GEI que se liberan en la utilización de fertilizantes químicos y orgánicos dentro de la ganadería.
Alcance 1 Alcance 3	Producción de alimento	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄	GEI que se liberan en la producción de alimento para los animales, dentro (materia seca) y fuera (pienso o balanceado) de la explotación.
Alcance 1	Fermentación entérica	CH ₄	GEI que se liberan durante la digestión del alimento en los animales dentro de la explotación.
Alcance 1	Manejo de estiércol	N ₂ O, CH ₄	GEI que se liberan durante el manejo del estiércol animal para su reutilización dentro de la explotación.
Alcance 2	Energía y procesamiento	CO ₂	GEI que se liberan al utilizar energías eléctricas, combustibles fósiles u otras fuentes de energía dentro de la explotación.
Alcance 3	Transporte	CO ₂	GEI que se liberan al utilizar transporte dentro de la explotación.

Fuente: Elaboración propia.

Además, la unidad funcional que utiliza CFT para ganadería de leche es 1 kg de leche corregida en grasa y proteína (FPCM - *fat- and protein-corrected milk*, por sus siglas en inglés), de acuerdo con lo establecido en la metodología de la Federación Internacional de Lechería (The International Dairy Federation (IDF), 2022), la cual permite una mejor comparación entre explotaciones con diferentes razas o tipos de alimentación, y considera que la leche estándar tiene un contenido de 4% de grasa y un 3,3% de proteína verdadera. La Ecuación 2 es la utilizada por CFT para calcular FPCM, con base en la producción de leche (P , kg año⁻¹), el contenido de grasa (M_{grasa} , %) y el contenido de proteína verdadera ($M_{proteína\ verdadera}$, %).

Para la comparación de resultados se utilizó un análisis de varianza paramétrica de Fisher al 0,05, donde cada factor se sometió a un análisis en un diseño completamente al azar (DCA), debido a que el factor "Fuentes de GEI" está anidado en el factor "Tipo de Finca"; se realizaron análisis de los supuestos para verificar el cumplimiento de los requisitos de normalidad (Shapiro Wilks).

RESULTADOS

Como resultado del cálculo de las emisiones de GEI en el programa CFT se obtuvo que la HC de las ganaderías de leche de la Sierra Centro del

$$FPCM = P * (0,1226 * M_{grasa} + 0,0776 * M_{proteína\ verdadera} + 0,2534) \quad [2]$$

Tabla 3. Información levantada a través de visitas de campo y entrevistas a productores.
Table 3. Data collected through field visits and interviews with producers.

Categoría	Datos obtenidos
Tamaño y tipo de rebaño	Raza bovina, número del hato, peso de los animales, animales comprados y vendidos, registro e información de los productores
Alimentación	Balanceado: cantidad suministrada como complemento al pasto. Pasturas: Superficie de la explotación, superficie en pastoreo, calidad del pasto, cantidad y tipo de fertilizantes, horas de pastoreo, días de pastoreo y porcentaje de heces que llegan al pasto. Cantidad de alimento y tipo de alimento que recibe el ganado, porcentaje de materia seca del alimento, y origen (dentro o fuera de la explotación).
Manejo del estiércol	Tipo de tratamiento de los desechos de los animales y porcentaje de desechos tratados.
Energía para producción	Tipo: electricidad, gas y combustibles fósiles. Cantidad utilizada.
Transporte	Tipo de transporte y km que recorre para actividades exclusivas de la finca.

Fuente: Elaboración propia.

Ecuador fue, en promedio por finca, de 760,90 Ton CO₂-eq (D.E. 1.428,91), 11,81 Ton CO₂-eq ha⁻¹ (D.E. 8,88) y 1,71 kg CO₂-eq kg⁻¹ leche corregida por grasa y proteína. Por tipo de ganadería, las emisiones totales de CO₂-eq en promedio por finca fue: para las grandes, 4.970,53 Ton CO₂-eq (D.E. 2.458,43), representando el 54,4% del total de las emisiones de todas las ganaderías del estudio, para las medianas, 706,05 Ton CO₂-eq (D.E. 572,26), representando el 19,3%, y para las pequeñas, 281,78 Ton CO₂-eq (D.E. 124,52), que representaron el 26,2%.

Se encontraron diferencias estadísticas ($p < 0,05$) por tipo de ganadería y tipo de GEI emitido (Tabla 4), observando que aproximadamente la mitad de las emisiones corresponde a las emisiones de CH₄ en los tres tipos de ganadería, y que del total de emisiones de CO₂-eq ha⁻¹, el CH₄ representa el 69,2%, el CO₂ el 22,6% y el N₂O el 8,2%.

Se encontraron diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre las fuentes de emisiones de GEI, siendo la fermentación entérica la actividad de mayor producción, seguido de la producción de alimento y del manejo de pasto (Fig. 2). El manejo del estiércol, la energía y procesamiento, y el transporte fueron las actividades de menor generación de emisiones de GEI por hectárea. La composición de las pasturas en los tres tipos de ganadería es similar dado que se localizan en zonas geográficas con características cercanas, siendo sus mezclas forrajeras características de

la zona (León et al., 2022), principalmente por gramíneas: kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), más común, raigrás perenne (*Lolium perenne*), y pasto azul (*Dactylis glomerata*); leguminosas: trébol blanco (*Trifolium repens*), trébol rojo (*Trifolium pratense*), y alfalfa (*Medicago sativa*); y, asteráceas: achicoria (*Cichorium intybus*) y llantén (*Plantago major*) (Tabla 5).

También se encontraron diferencias estadísticas ($p < 0,05$) en la cantidad de emisiones (Ton CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹) por tipo de ganadería, siendo las ganaderías Grandes las que mayor cantidad de GEI emiten (32,97), seguidas de las ganaderías Pequeñas (11,38) y de las Medianas (4,78). Las ganaderías grandes poseen un sistema de semiestabulación con una mayor carga animal (3,8 UBA ha⁻¹), por lo que requieren alimento externo para las raciones mixtas que se ofrecen a los animales, razón por la cual las emisiones en fincas grandes en la fuente Producción de alimentos son cuatro a cinco veces mayores. Las ganaderías medianas manejan un sistema de pastoreo con baja suplementación, pero con la menor carga animal de los tres tipos de ganaderías evaluadas (1,01 UBA ha⁻¹), siendo esta la razón por la que presenta el menor valor de emisiones por Producción de alimentos. Las ganaderías pequeñas mantienen un sistema de producción pastoril con baja suplementación y con una carga animal media de 1,98 UBA ha⁻¹, de manera que el tamaño de hato genera aproximadamente el doble de emisiones de las ganaderías medianas.

Tabla 4. Emisiones de GEI (ton) por hectárea generadas en diferentes tipos de ganaderías.
Table. GHG emissions (ton) per hectare generated from different types of dairy farms.

	CO ₂		N ₂ O		CH ₄		Total			
	CO ₂ -eq ha ⁻¹	%	CO ₂ -eq ha ⁻¹	%	CO ₂ -eq ha ⁻¹	%	CO ₂ -eq ha ⁻¹			
Grande	19,2	C	29,1	13,3	C	20,1	33,5	C	50,8	65,9
Mediana	6,8	A	28,5	7,1	A	29,8	10,0	A	41,7	23,9
Pequeña	57,5	B	28,5	54,4	B	27,0	89,8	B	44,5	201,7
Promedio	27,8		28,6	24,9		25,6	44,4		45,8	97,2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Composición química (%) de los pastos.
Table 5. Chemical composition (%) of grasses.

Especies	Proteína bruta	Extracto etéreo	Fibra bruta	Cenizas	Extractos libres de nitrógeno	Fibra neutro detergente	Fibra ácida detergente
Kikuyo	14,5	1,5	27,3	10,5	46,3	64,0	33,5
Raigrás perenne	15,1	2,3	23,7	11,5	47,4	51,9	30,7
Pasto azul	13,4	2,7	21,8	10,3	51,8	43,7	28,5
Trébol blanco	26,9	2,9	18,4	9,8	42,0	29,9	24,3
Trébol rojo	26,4	2,5	16,4	10,2	44,6	26,7	26,1
Alfalfa	29,7	2,0	18,0	13,8	36,5	31,2	26,8
Achicoria	17,4	2,1	24,5	18,2	37,8	36,8	25,1
Llantén	18,2	1,8	22,1	19,6	38,3	34,8	25,8

Fuente: Datos del Laboratorio de Nutrición de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador.

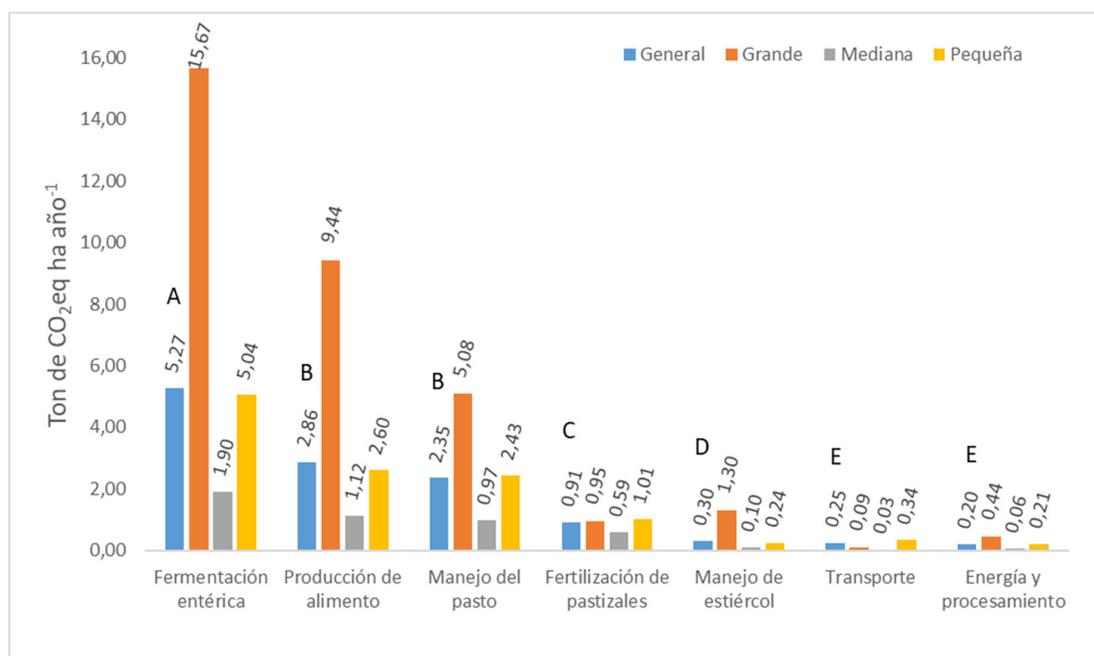


Fig. 2. Emisiones promedio por total y por tipo de ganadería de leche de CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹ por diferentes fuentes de GEI. Fuente: Elaboración propia.

Fig. 2. Overall average emissions and those generated from different types of dairy farms of CO₂-eq ha⁻¹ year⁻¹ by different GHG sources. Source: Own elaboration.

En promedio se obtuvo una emisión de 1,71 $\text{CO}_2\text{-eq kg}^{-1}$ leche FPCM. Al analizar la cantidad de $\text{CO}_2\text{-eq kg}^{-1}$ leche FPCM entre ganaderías se observó diferencias estadísticas ($p < 0,05$), siendo las ganaderías medianas las que emiten una mayor cantidad de GEI por cada kg de leche FPCM que producen (Fig. 3). Si bien las ganaderías grandes generan una mayor cantidad de $\text{Ton CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$ año $^{-1}$, también son las que producen una mayor cantidad de leche, por lo que al relacionar estos dos parámetros da como resultados bajas emisiones de $\text{CO}_2\text{-eq kg}^{-1}$ leche FPCM. Las ganaderías pequeñas generan aproximadamente una tercera parte de las emisiones de las ganaderías grandes y más del doble de las ganaderías medianas, pero son muy eficientes en la producción de $\text{kg leche FPCMha}^{-1}$, por lo que la relación de $\text{kg de CO}_2\text{-eq kg}^{-1}$ leche FPCM es baja. Por el contrario, las ganaderías medianas si bien emiten la menor cantidad de $\text{CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$ año $^{-1}$, tienen una baja carga animal y producción de L leche ha^{-1} , en comparación con las otras ganaderías del estudio, situación que da como resultado una mayor emisión de $\text{CO}_2\text{-eq kg}^{-1}$ leche FPCM. Al analizar los resultados por el tamaño del rebaño, no se observaron diferencias entre los tres tipos de ganadería, ya que las emisiones por vaca son similares, tanto al considerar todo el rebaño como solo las vacas en producción.

DISCUSIÓN

Se estima que las emisiones de GEI provenientes de la leche de vaca alcanzaron 1,6 GTon $\text{CO}_2\text{-eq}$ anuales a nivel mundial, que, si bien son altas, es una de las fuentes de

proteína animal relativamente más eficientes, con valores inferiores a los 100 $\text{kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1}$ proteína (Prenafeta y Fernández, 2022). Además, FAO y GDP (2019) señalan una reducción del 11% en las emisiones de GEI provenientes de la producción de la leche de vaca en el periodo 2005-2015, pasando de 2,8 a 2,5 $\text{kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1}$ de leche-FPCM. En Sudamérica, la intensidad de las emisiones, en promedio, fue de 3,36 $\text{kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1}$ de leche-FPCM en 2015. En el caso de las ganaderías lecheras en estudio, el valor obtenido para las emisiones de $\text{CO}_2\text{-eq kg}^{-1}$ leche FPCM fue mayor al promedio enunciado por FAO y GDP en los tres tipos de ganaderías, principalmente al considerar únicamente las vacas en producción. Esto pone de manifiesto que la intensidad de las emisiones es alta, por lo que las posibilidades de reducción son mayores.

Por tipo de emisiones de GEI, si bien las emisiones de N_2O representan menos del 1% de las emisiones totales de GEI por las ganaderías estudiadas, es importante considerar que el fertilizante nitrogenado aplicado es susceptible de perderse por lixiviación y desnitrificación antes de que el cultivo lo absorba y es una fuente de N_2O (Grossi et al., 2019). Por tanto, es fundamental que las cantidades apropiadas de nitrógeno lleguen al cultivo en crecimiento, siendo prácticas valiosas que podrían ayudar a optimizar la producción de biomasa y reducir las emisiones de GEI del suelo el evitar la aplicación en estaciones húmedas o antes de lluvias.

Por fuente de las emisiones, en el periodo 2005-2015, la composición no ha cambiado (FAO y GDP, 2019), representando el 58,5% de los GEI

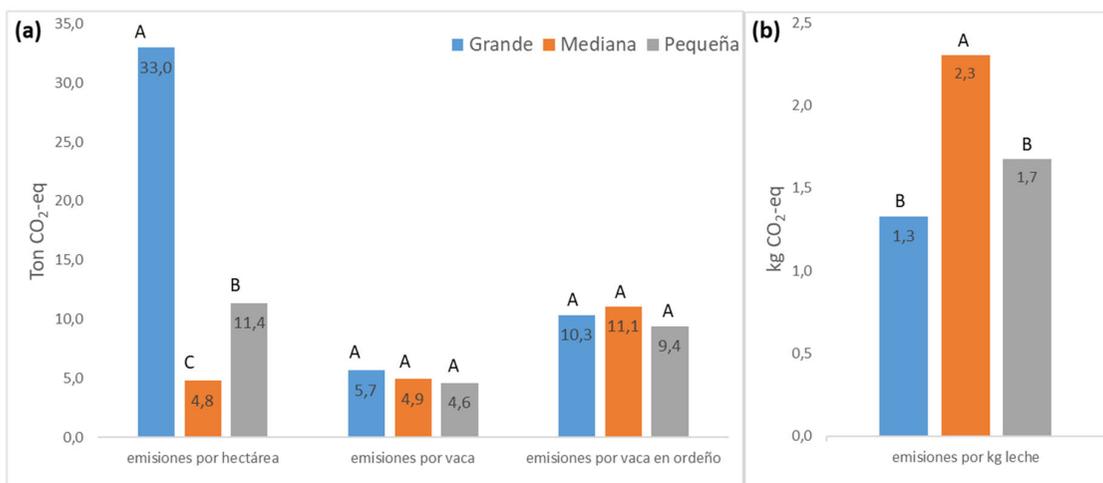


Fig. 3. (a) Emisiones generadas por diferentes tipos de ganadería por (a) hectárea, por vaca y por vaca en ordeño; y (b) por kg leche FPCM. Fuente: Elaboración propia
Fig. 3. (a) Emissions generated from different types of dairy farms per (a) hectare, per cow and per milking cow; and (b) per kg milk FPCM. Source: Own elaboration.

el CH_4 producto de la fermentación entérica. En segundo lugar, los gases generados en la producción de alimento (29,4%), el N_2O (20,0%) y el CO_2 (8,9%). Finalmente, el 9,3% proviene del CH_4 (4,8%) y N_2O (4,5%) generado por el manejo del estiércol. Thoma et al. (2013) señalan que la fermentación entérica, la producción de alimentos y el manejo del estiércol representan el 35, 32 y 26% de los GEI emitidos en una granja lechera, respectivamente. De igual manera, Chianese et al. (2009), mencionan que la fermentación entérica y el manejo del estiércol en ganaderías lechera son las actividades que más GEI emiten. Seó et al. (2017) señalan que los principales puntos críticos de la ganadería lechera son la fermentación entérica, la producción y uso de fertilizantes sintéticos, el uso de estiércol, la producción y transporte de balanceados y la baja productividad animal.

Los datos presentados por estos autores difieren de los obtenidos en esta investigación, donde el 45,2% del CH_4 es producto de la fermentación entérica, el 25,8% de las emisiones provienen de la producción de alimento (24% de CO_2 y 1,7% de N_2O), y el 17,1% del N_2O por el manejo del pasto; y, el manejo del estiércol representa solo el 3,3 % de las emisiones. Por el contrario, resultados similares fueron reportados por González-Quintero et al. (2021) para Colombia en ganaderías doble propósito en relación con el CH_4 (fermentación entérica) y el NO_2 (manejo de pastos y fertilización de pastizales). Y por De Léis et al. (2015) quienes obtuvieron resultados similares en ganaderías de leche en Brasil, con porcentajes de emisión de CH_4 del 57% para sistemas de pastoreo, siendo el 50% producto de la fermentación entérica. Estas diferencias, en especial del manejo del estiércol, pueden explicarse por el poco manejo que se le da, dejándolo principalmente en las pasturas. Esta forma de manejo del estiércol es típico de las explotaciones ganaderas extensivas en Latinoamérica (Mazzetto et al., 2020).

Los productos de desecho gaseosos de la fermentación entérica, como son el CO_2 y el CH_4 , se eliminan principalmente del rumen por eructos. La tasa de emisión de metano entérico varía según el consumo de alimento y la digestibilidad (McAllister y Newbold, 2008). Según Wattiaux et al. (2019), la calidad de la fibra y los lípidos en la dieta influyen en el CH_4 entérico, y las proteínas dietéticas influyen en el N_2O del estiércol. Es así que, dados los resultados obtenidos, la composición química de los pastos de los que se alimentan las vacas podría ser un factor importante para que la emisión de metano en las ganaderías estudiadas sea menor que el promedio mundial. Clariget et al. (2015) determinaron que

un aumento en la digestibilidad de la dieta (del 10% de praderas perennes) es la que repercute en mayor medida en la disminución de las emisiones, ya que logra disminuir en un 12% las emisiones entéricas de los bovinos, reduciendo en un 9% las emisiones totales del sistema. Es decir, el optimizar la nutrición en ruminantes representa una importante oportunidad para mitigar las emisiones de GEI generadas en las ganaderías lecheras (Prenafeta y Fernández, 2022). Bartl et al. (2011) señalan que para reducir las emisiones en la producción de leche en zonas Andinas es importante mejorar la dieta de los animales, de manera que se reduzcan las emisiones producto de la fermentación entérica.

Hagemann et al. (2012) señalan que la intensidad de emisiones por kg de leche corregida por grasa y proteína a nivel mundial está entre 0,98 y 2,69 kg de CO_2 , variando en función del nivel de tecnificación de las ganaderías y de los sistemas de manejo locales. Rivera et al. (2014) obtuvieron, para hatos ganaderos de leche de raza Holstein, menores valores de intensidad de emisiones, en comparación con hatos de vacas producto de cruces de Holstein con raza criolla en Colombia, 1,10 vs 1,18 kg CO_2 -eq kg^{-1} de leche-FPCM. En el caso de los valores obtenidos para las ganaderías de la Sierra centro del Ecuador, las ganaderías grandes son las que más se acercan a éstas, emisiones promedio, y en el caso de las ganaderías medianas el valor se duplica, siendo necesario implementar mayores medidas de mitigación en este tipo de ganaderías. Los valores obtenidos para las fincas medianas son similares a los obtenidos por Rivera et al. (2016) en su comparación entre un sistema silvopastoril intensivo y un sistema intensivo convencional en Colombia, 2,05 y 2,34 kg CO_2 -eq kg^{-1} de leche-FPCM, respectivamente.

Por otro lado, Todde et al. (2018) aseguran que las granjas que tienen más de 200 animales tienen menores emisiones de CO_2 -eq, en relación con la masa de leche producida. En el presente estudio se confirmó esta relación inversa entre la cantidad de animales y emisiones de CO_2 -eq.

En relación con el sistema de manejo del ganado, Dutreuil et al. (2014) determinaron que las ganaderías en confinamiento emitieron una mayor cantidad de GEI respecto a las ganaderías en pastoreo, y recomienda que el tiempo dedicado al pastoreo disminuye la cantidad de estiércol que debe almacenarse y manipularse, lo que reduce el costo de la gestión del estiércol. Situación similar se evidenció en este estudio, en el que las ganaderías grandes que aplican sistemas de semiestabulación emitieron la mayor cantidad de Ton CO_2 -eq ha^{-1} año^{-1} .

En el mismo sentido, FAO (2020) señala que los

sistemas pastoriles emiten 1,91 kg CO₂-eq L leche⁻¹, mientras que los sistemas semiestabulados 2,05 kg CO₂-eq L leche⁻¹. Así también, Ribeiro-Filho et al. (2020) señalan que una mayor inclusión de pastos en la dieta de las vacas ayuda a reducir la HC de las ganaderías lecheras. Seo et al. (2017) en su estudio en Brasil, señalan que la baja calidad nutricional y productividad de los pastos es un factor que contribuye al aumento de las emisiones de GEI y sus impactos potenciales.

Por su parte, Gross et al. (2022) encontraron que las explotaciones lecheras que no practican el pastoreo tienen una HC promedio más baja (0,90 kg CO₂-eq kg⁻¹ de ECM) que las explotaciones lecheras de régimen mixto (1,10 kg CO₂-eq kg⁻¹ de ECM). Así también que, las explotaciones intensivas presentan una HC media más baja (1,14 kg CO₂-eq kg⁻¹ de ECM), pero un porcentaje de emisiones fuera de la explotación significativamente mayor (27,5%) que las explotaciones extensivas (1,24 kg CO₂-eq kg⁻¹ de ECM y 5%, respectivamente). Similar fue el resultado en el presente estudio, ya que las fincas grandes, que tienen un sistema de pastoreo semiestabulado y una mayor carga animal, presentan la menor intensidad de emisiones.

A continuación, se presenta una serie de recomendaciones que podrían ser tomadas en cuenta por los ganaderos al momento de plantear estrategias de mitigación de GEI. En relación con los animales, aquellos que son de un genotipo particular seleccionados para aumentar la producción, solo podrán realizar este potencial en un sistema de altos insumos alimenticios, lo que es un factor limitante (Llonch et al., 2017). Por lo que, las nuevas razas y cruces pueden conducir a una reducción sustancial de los GEI, pero deben adaptarse a sistemas de producción más eficientes o climas, situación que debe realizarse sin descuidar el bienestar animal. Otro factor en los animales es la salud; estudios encontraron que las enfermedades del ganado pueden aumentar las emisiones de GEI hasta en un 24% por unidad de leche producida (Williams et al., 2015). La mejora de la fertilidad en el ganado lechero podría conducir a una reducción de las emisiones de metano entre un 10 y un 24% y una reducción del óxido nitroso entre un 9 y un 17%, esto se daría como un efecto de que no serían necesarios tantos animales reproductores y por tanto criar menos reemplazos (Thornton y Herrero, 2010).

En cuanto al manejo de pasturas, Alayón-Gamboa et al. (2018) señalan que los sistemas silvopastoriles son una de las mejores opciones, con árboles dispersos en los potreros es posible promover una captura de carbono de 88,9 Ton de CO₂-eq ha⁻¹, y con cercos vivos de 87,5 Ton de CO₂-eq ha⁻¹, mientras que con monocultivo

de pasturas solo se obtiene 60,6 Ton de CO₂-eq ha⁻¹. Oliveira et al. (2022) señalan también que la siembra de árboles en sistemas basados en pasturas es una opción para aumentar el secuestro de C del suelo y compensar las emisiones de GEI, principalmente de CH₄ entérico, así como obtener otros ingresos con especies comerciales. Brook et al. (2022) sugieren el reemplazo de cercas de postes y alambres por árboles para aumentar el secuestro de C, como una alternativa viable.

Medidas como implementación de sistemas silvo-pastoriles y cercas vivas pudieran ser una opción a corto plazo, para ser trabajada junto con la mejora genética del hato ganadero de manera de aumentar su eficiencia, tanto en producción como en calidad de la leche. Así también, los sistemas de pastoreo y cosecha de la biomasa producida también aportan a la mitigación de los GEI, los sistemas rotativos y por franjas mejoran la cosecha del pasto por los animales al pastorear espacios más pequeños, y también, mejoran la distribución de la orina y el estiércol (Eckard et al., 2010).

Gross et al. (2022) señalan en su estudio que en el proceso de conversión de un sistema de producción lechero tradicional a uno orgánico se pueden alcanzar reducciones en las emisiones de GEI si se mantiene alta la productividad en la producción de piensos, la cría y la explotación ganadera durante el proceso de conversión.

En cuanto al manejo del estiércol, Craggs et al. (2008) mencionan que los estanques anaeróbicos, que suelen utilizarse en las explotaciones ganaderas, se diseñaron como estanques de retención de sólidos de aguas residuales, más no para su tratamiento. Estos estanques descubiertos presentan digestión anaeróbica y liberan CH₄ a la atmósfera durante todo el año, por lo que los biodigestores y producción de biogás como fuente de energía son opciones más eficientes.

CONCLUSIONES

La mayor fuente de GEI, medido como CO₂-eq, es la fermentación entérica, seguido por producción de alimentos y pastos y fertilización de pastizales; y, en menor cantidad, el manejo del estiércol, la energía de procesamiento y el transporte. La implementación de medidas de mitigación orientadas a reducir las emisiones entéricas y la producción de alimentos será clave para reducir las emisiones en las fincas lecheras de la Sierra Central del Ecuador.

Las ganaderías que tienen sistemas semiestabulados producen una mayor de CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹, en relación con ganaderías medianas y pequeñas, pero al relacionar con la producción de leche las ganaderías grandes tienen una menor producción de CO₂-eq l de leche⁻¹. Es decir, se

evidencia un mejor manejo en este tema por parte de las ganaderías grandes, que presentan una mayor productividad y eficiencia. Por su parte, las ganaderías pequeñas presentan la mayor resiliencia, debido a la menor cantidad de emisiones y una eficiencia media en la relación emisiones-producción de leche.

Dada la diversidad climática que existe en Ecuador, se recomienda desarrollar un mayor número de estudios estratificados de huella carbono en la ganadería ecuatoriana en las distintas regiones, así como desarrollar estudios de caso con razas de ganado específicas y por mezclas forrajeras, de manera que se puedan realizar comparaciones a mayor profundidad. Esta información será de gran importancia para que tanto las ganaderías como a nivel gubernamental se puedan plantear acciones específicas para reducir las emisiones de GEI de este importante sector productivo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Central del Ecuador, a su Facultad de Ciencias Agrícolas, al Ing. Santiago Gordillo y al Dr. William Espín, quienes gestionaron el ingreso a las fincas, así como a los propietarios quienes facilitaron la información de sus ganaderías.

LITERATURA CITADA

Alayón-Gamboa, J.A., G. Jiménez-Ferrer, A.T. Piñeiro-Vázquez, J. Canul-Solís, S. Albores-Moreno, G. Villanueva-López, et al. 2018. Estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en la ganadería. *Agroproductividad* 11(2):9-15. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/112>

Alex Thumba, D., S. Lazarova-Molnar, and P. Niloofar. 2022. Comparative evaluation of data requirements and level of decision support provided by decision support tools for reducing livestock-related greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production* 373:133886. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133886>

Bartl, K., C.A. Gómez, and T. Nemecek. 2011. Life cycle assessment of milk produced in two smallholder dairy systems in the highlands and the coast of Peru. *Journal of Cleaner Production* 19(13):1494-1505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.010>

Brook, R., E. Forster, D. Styles, A.M. Mazzetto, C. Arndt, M.J. Esquivel, et al. 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):101. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00834-z>

Catalán, H. 2020. Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía* 52(204):59-83. <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2021.204.69611>

Cecchini, L., S. Venanzi, A. Pierri, and M. Chiorri. 2018. Environmental efficiency analysis and estimation of CO2 abatement costs in dairy cattle farms in Umbria (Italy): A SBM-DEA model with undesirable output. *Journal of Cleaner Production* 197:895-907. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.165>

Centro de la Industria Láctea del Ecuador. 2020. Industria lechera ecuatoriana: Referente de sostenibilidad. CIL Ecuador. <https://www.cil-ecuador.org/post/industria-lechera-ecuadoriana-referente-de-sostenibilidad>

CFA. 2018. Cool Farm Tool | An online greenhouse gas, water, and biodiversity calculator. Cool Farm Alliance. <https://coolfarmtool.org/>

Chianese, D.S., C.A. Rotz, and C.A. Richard. 2009. Whole-Farm Greenhouse Gas Emissions: A Review with Application to a Pennsylvania Dairy Farm. *Applied Engineering in Agriculture* 25(3):431-442. <https://doi.org/10.13031/2013.26895>

Clariget, J.M., F. Montossi, V. Ciganda, y A. La Manna. 2015. Emisiones de CO2 en la ganadería de Uruguay. Evolución e impacto de estrategias tecnológicas de mitigación. *Revista INIA* 40:57-60.

Cool Farm Alliance. 2023. Cool Farm Tool— Technical Method Description— Version CFT 2.5. <https://coolfarmtool.org>

Corporación Financiera Nacional (CFN). 2023. Fichas sectoriales I Trimestre 2023 | Leche y sus derivados. Biblioteca. <https://www.cfn.fin.ec/bibliotecainfo/>

Craggs, R., J. Park, and S. Heubeck. 2008. Methane emissions from anaerobic ponds on a piggery and a dairy farm in New Zealand. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48(1-2):142-146. <https://doi.org/10.1071/EA07255>

Dávalos, N. 2019. Hacienda de Chimborazo es la primera con huella de carbono neutro. *Primicias*. <https://www.primicias.ec/noticias/tecnologia/hacienda-chimborazo-primera-huella-carbono-neutro-pais/>

- De Léis, C.M., E. Cherubini, C.F. Ruviano, V. Prudêncio Da Silva, V. Do Nascimento Lampert, A. Spies, and S.R. Soares. 2015. Carbon footprint of milk production in Brazil: A comparative case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20(1):46-60. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0813-3>
- Dutreuil, M., M. Wattiaux, C.A. Hardie, and V.E. Cabrera. 2014. Feeding strategies and manure management for cost-effective mitigation of greenhouse gas emissions from dairy farms in Wisconsin. *Journal of Dairy Science* 97(9):5904-5917. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8082>
- Eckard, R.J., C. Grainger, and C.A.M. de Klein. 2010. Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock Science* 130(1-3):47-56. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.010>
- FAO. 2020. *Panel | Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM) I*. FAO. <https://www.fao.org/gleam/results/es/>
- FAO, and GDP. 2019. Climate change and the global dairy cattle sector – The role of the dairy sector in a low-carbon future. Food and Agriculture Organization of the United Nations; Global Dairy Platform Inc.
- Faverín, C., M.P. Tieri, y M.A. Herrero. 2019. Metodologías de cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero en ganadería Bovina. *Revista Argentina de Producción Animal* 39(2):87-104. <http://www.aapa.org.ar/rapa/39/2/16612-Faverin%20Cap%205.pdf>
- Franchetti, M.J., and D. Apul. 2012. Carbon footprint analysis: Concepts, methods, implementation, and case studies. (CRC press).
- Garduño, R. 2005. ¿Qué es el efecto invernadero? En J. Martínez y A. Fernández Bremauntz (eds.). *Cambio climático: Una visión desde México* (Primera reimpresión, p. 29-40). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- González-Quintero, R., T. Kristensen, M.S. Sánchez-Pinzón, D.M. Bolívar-Vergara, N. Chirinda, J. Arango, et al. 2021. Carbon footprint, non-renewable energy and land use of dual-purpose cattle systems in Colombia using a life cycle assessment approach. *Livestock Science*, 244:104330. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104330>
- Gross, A., T. Bromm, S. Polifka, and y F. Schierhorn. 2022. The carbon footprint of milk during the conversion from conventional to organic production on a dairy farm in central Germany. *Agronomy for Sustainable Development* 42(3):37. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00775-7>
- Grossi, G., P. Goglio, A. Vitali, and A.G. Williams. 2019. Livestock and climate change: Impact of livestock on climate and mitigation strategies. *Animal Frontiers* 9(1):69-76. <https://doi.org/10.1093/af/vfy034>
- Hagemann, M., A. Ndambi, T. Hemme, and U. Latacz-Lohmann. 2012. Contribution of milk production to global greenhouse gas emissions. An estimation based on typical farms. *Environmental Science and Pollution Research International* 19(2):390-402. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0571-8>
- Henriksson, M., A. Flysjö, C. Cederberg, and C. Swensson. 2011. Variation in carbon footprint of milk due to management differences between Swedish dairy farms. *Animal* 5(9):1474-1484. <https://doi.org/10.1017/S1751731111000437>
- Holka, M., J. Kowalska, and M. Jakubowska. 2022. Reducing Carbon Footprint of Agriculture—Can Organic Farming Help to Mitigate Climate Change. *Agriculture* 12(9):1383. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091383>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). 2023. Estadísticas Agropecuarias | Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC). <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- IPCC. 2018. Resumen para responsables de políticas. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, y T. Waterfield (eds.), *Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

- Kweku, D., O. Bismark, A. Maxwell, K. Desmond, K. Danso, E. Oti-Mensah, et al. 2018. Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. *Journal of Scientific Research and Reports* 17(6):1-9. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2017/39630>
- León, R., N. Bonifaz, y F. Gutiérrez. 2022. Pastos y forrajes del Ecuador. Siembra y producción de pasturas (1.ª ed.). Universidad Politécnica Salesiana. <https://abyayala.org.ec/producto/pastos-y-forrajes-del-ecuador/>
- Llonch, P., M.J. Haskell, R.J. Dewhurst, and S.P. Turner. 2017. Current available strategies to mitigate greenhouse gas emissions in livestock systems: An animal welfare perspective. *Animal* 11(2):274-284. <https://doi.org/10.1017/S1751731116001440>
- Mazzetto, A.M., G. Bishop, D. Styles, C. Arndt, R. Brook, and D. Chadwick. 2020. Comparing the environmental efficiency of milk and beef production through life cycle assessment of interconnected cattle systems. *Journal of Cleaner Production* 277:124108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124108>
- McAllister, T.A., and C.J. Newbold. 2008. Redirecting rumen fermentation to reduce methanogenesis. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48(1-2):7-13. <https://doi.org/10.1071/EA07218>
- Oliveira, P.P.A., A. Berndt, A. de F. Pedroso, T.C. Alves, A.P. Lemes, B.A. Oliveira, et al. 2022. Greenhouse gas balance and mitigation of pasture-based dairy production systems in the Brazilian Atlantic Forest Biome. *Frontiers in Veterinary Science* 9:958751. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.958751>
- Pandey, D., M. Agrawal, and J.S. Pandey. 2011. Carbon footprint: Current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment* 178(1):135-160. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>
- Prenafeta, F., y B. Fernández. 2022. Estudio sobre los gases de efecto invernadero en el sector lácteo (p. 120). Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentària; INLAC – Organización Interprofesional Láctea.
- Ramachandra, T.V., and D.N. Mahapatra. 2016. The Science of Carbon Footprint Assessment. En S. S. Muthu (ed.), *The Carbon Footprint Handbook* (p. 4-44). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Ribeiro-Filho, H.M.N., M. Civiero, and E. Kebreab. 2020. Potential to reduce greenhouse gas emissions through different dairy cattle systems in subtropical regions. *PLOS ONE* 15(6):e0234687. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234687>
- Rivera, J. 2014. Life cycle assessment in milk production: Comparison of two specialized dairy herds. *Livestock Research for Rural Development* 26(6):112. <http://www.lrrd.org/lrrd26/6/rive26112.htm>
- Rivera, J.E., J. Chará, y R. Barahona. 2016. Análisis del ciclo de vida para la producción de leche bovina en un sistema silvopastoril intensivo y un sistema convencional en Colombia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 19(3):237-251.
- Roza-Delgado, B.D.L., A.M. Fernández, y A.A. Gutiérrez. 2002. Determinación de materia seca en pastos y forrajes a partir de la temperatura de secado para análisis. *Pastos* 32(1):Article 1. <http://polired.upm.es/index.php/pastos/article/view/1308>
- Schneider, H., y J. Samaniego. 2010. La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios (Colección Documentos de proyectos, p. 46). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Seó, H.L.S., L.C.P. Machado, C.F. Ruviaro, e C.M. de Léis. 2017. Avaliação do Ciclo de Vida na bovinocultura leiteira e as oportunidades ao Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* 22:221-237. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016149096>
- The Cool Farm. 2023. An online greenhouse gas, water, and biodiversity calculator. The Tool – Cool Farm Tool. <https://coolfarm.org/the-tool/>
- The International Dairy Federation (IDF). 2022. The IDF global Carbon Footprint standard for the dairy sector (N°520/2022; Bulletin of the IDF). The International Dairy Federation (IDF). <https://shop.fil-idf.org/products/the-idf-global-carbon-footprint-standard-for-the-dairy-sector>
- Thoma, G., J. Popp, D. Nutter, D. Shonnard, R. Ulrich, M. Matlock, et al. 2013. Greenhouse gas emissions from milk production and consumption in the United States: A cradle-to-grave life cycle assessment circa 2008. *International Dairy Journal* 31(1):S3-S14. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2012.08.013>
- Thornton, P.K., and M. Herrero. 2010. Potential for reduced methane and carbon dioxide emissions from livestock and pasture management in the tropics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(46):19667-19672. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912890107>

- Todde, G., L. Murgia, M. Caria, and A. Pazzona. 2018. A comprehensive energy analysis and related carbon footprint of dairy farms, part 1: Direct energy requirements. *Energies* 11(2):451. <https://doi.org/10.3390/en11020451>
- Wackernagel, M., N.B. Schulz, D. Deumling, A.C. Linares, M. Jenkins, V. Kapos, et al. 2002. Tracking the ecological overshoot of the human economy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99(14):9266-9271. <https://doi.org/10.1073/pnas.142033699>
- Wattiaux, M.A., M.E. Uddin, P. Letelier, R.D. Jackson, and R.A. Larson. 2019. Invited Review: Emission and mitigation of greenhouse gases from dairy farms: The cow, the manure, and the field. *Applied Animal Science* 35(2):238-254. <https://doi.org/10.15232/aas.2018-01803>
- Whittaker, C., M.C. McManus, and P. Smith. 2013. A comparison of carbon accounting tools for arable crops in the United Kingdom. *Environmental Modelling & Software* 46:228-239. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.015>
- Wiedmann, T., and J. Minx. 2007. A definition of 'carbon footprint'. En C.C. Pertsova (ed.), *Ecological economics research trends* (p. 1-11). Nova Science Publishers.
- Williams, A., J. Chatterton, G. Hateley, A. Curwen, and J. Elliott. 2015. A systems-life cycle assessment approach to modelling the impact of improvements in cattle health on greenhouse gas emissions. *Advances in Animal Biosciences* 6(1):29-31. <https://doi.org/10.1017/s2040470014000478>