



Prospectiva ambiental al 2030 en sistemas de producción de leche de vaca en México



María del Rosario Villavicencio-Gutiérrez ^a

Nicolás Callejas-Juárez ^b

Nathaniel Alec Rogers-Montoya ^c

Vianey González-Hernández ^a

Rodrigo González-López ^d

Carlos Galdino Martínez-García ^a

Francisco Ernesto Martínez-Castañeda ^{a*}

^a Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales. Instituto Literario 100. Centro, 50000, Toluca, Estado de México. México.

^b Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Zootecnia y Ecología. Chihuahua, México.

^c Colegio de Postgraduados. Ganadería. Estado de México, México.

^d Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Ciudad de México, México.

* Autor de correspondencia: femartinezc@uaemex.mx

Resumen:

El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño ambiental de la producción de leche de vaca en sistema de pequeña y mediana escala en México, mediante análisis de ciclo de vida con un enfoque de la cuna a la puerta de la granja, para el periodo 2021-2030. Se estableció como unidad funcional 1 kg de leche corregida por grasa y proteína. La evaluación de impacto se realizó con el software OpenLCA 1.11.0, mediante el método ReCiPe, se

consideraron siete categorías de impacto: ocupación de suelo agrícola (ALO), ecotoxicidad marina (ME), toxicidad humana (TH), cambio climático (CC), agotamiento fósil (FD), acidificación terrestre (TA) y agotamiento de agua (WD). Como principales resultados de la investigación se identificó que la producción de alimento para el ganado es el principal contribuyente a las cargas ambientales en la mayoría de las categorías con porcentajes superiores al 71 %, mientras que las emisiones generadas en la granja contribuyen a las cargas ambientales para las categorías CC (28 %), FD (26 %) y TA (59 %). Se realizó una comparación entre escenarios pesimista, base y optimista para los años 2021 y 2030, lo que confirmó una mejora en la eficiencia ambiental en el escenario optimista prospectado, el incremento en el volumen de producción representó una disminución del 6 % y 5 % respectivamente, en las categorías de impacto evaluadas.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida, Impacto ambiental, Sostenibilidad.

Recibido: 07/02/2023

Aceptado: 04/09/2023

Introducción

La producción de leche a nivel mundial se desarrolla aproximadamente en 150 millones de hogares. En los países en desarrollo, la producción de leche es realizada por pequeños agricultores, esta actividad es una fuente importante tanto de nutrición como de ingresos para millones de hogares⁽¹⁾. De acuerdo con la FAO, entre el 80 y 90 % de la producción lechera en los países en desarrollo, se realiza en sistemas de producción de pequeña escala⁽²⁾. México es uno de los países en desarrollo que tiene una larga tradición de producción lechera, a nivel mundial ocupa el lugar número 15 dentro de los países productores de leche⁽³⁾.

En México, la leche de vaca es el tercer producto pecuario en importancia económica, en 2021, cerró con un volumen de 12,852 millones de litros y un valor económico de 90,823 millones de pesos⁽³⁾. El 85 % del hato lechero bovino corresponde al sistema familiar semi-intensivo⁽⁴⁾, este tipo de sistemas se caracteriza principalmente por tener un hato ganadero de raza Holstein, cuya alimentación integra cultivos forrajeros de temporal (maíz, avena, trigo, triticale, cebada, centeno, pasto ballico o rye grass, y pastos nativos e introducidos), leguminosas (alfalfa, ebo y garbanzo), y residuos de las parcelas agrícolas⁽⁵⁾.

La ganadería familiar semi – intensiva, es reconocida por su importancia socioeconómica, sin embargo, esta actividad enfrenta diferentes problemáticas, entre ellas bajos rendimientos en la producción de leche, derivados de factores como la genética, el ambiente, la alimentación⁽⁶⁾ y el cambio climático. La falta o el exceso de precipitación pluvial y las

temperaturas extremas⁽⁷⁾ provocan una disminución en la producción agrícola y a su vez la insuficiencia de condiciones para mantener la producción pecuaria⁽⁸⁾.

Por otro lado, la ganadería bovina mexicana está asociada a la generación del 13.2 % de las emisiones de GEI en el país, que en 2019 fueron de 736.6 millones de toneladas de CO₂ equivalente⁽⁹⁾, además es asociada con la degradación de los recursos naturales. La generación de emisiones de GEI es atribuida al bajo rendimiento de leche, prácticas de manejo y alimentación ineficientes, y una edad prolongada al primer parto⁽¹⁰⁾. La problemática ambiental ha aumentado el interés por identificar alternativas de mitigación en diferentes escenarios y sistemas productivos. Baldini *et al*⁽¹¹⁾ destacan el Análisis de Ciclo de Vida, como un método para identificar y evaluar las cargas ambientales asociadas a la producción de leche.

La evaluación de impactos ambientales de leche se ha realizado para sistemas de producción intensivos⁽¹²⁻¹⁵⁾ y semi intensivos⁽¹⁵⁻¹⁸⁾. Algunos autores indican que para reducir las emisiones de la producción de leche en granjas de pequeña escala es necesario aumentar la producción de leche^(17,19,20).

El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño ambiental de la producción de leche de vaca en sistema semi-intensivo en México, mediante análisis de ciclo de vida con un enfoque de la cuna a la puerta de la granja, para el periodo 2021-2030.

Material y métodos

Este estudio se realizó empelando la metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV), en el cumplimiento de los principios establecidos por la norma ISO 14040 y 14044^(21,22), que integra cuatro fases: definición de objetivos y alcance; análisis del inventario; evaluación de impacto; interpretación de resultados.

Sistema de producto

El sistema en estudio corresponde a la producción de leche en granjas de pequeña y mediana escala en México, considerados como sistema semi-intensivo cuyo inventario de producción, representa el 85 % del total nacional^(23,24). Es un sistema de producción muy heterogéneo respecto a su nivel tecnológico, agroecológico y socioeconómico⁽²⁵⁾. La ganadería lechera en pequeña y mediana escala se caracteriza por tener un pequeño número de animales en las unidades productivas⁽²⁶⁾. De un total de 257 mil productores de pequeña y mediana escala el 47.30 % tienen 30 vacas o menos⁽²⁷⁾, las razas productoras de leche son principalmente Holstein, la ordeña se realiza de forma manual⁽²⁸⁾.

En 2021 el sistema de producción semi-intensivo tuvo un inventario de 2'579,223 cabezas de ganado bovino lechero, y un volumen de producción de 11'046,795.96 litros de leche fluida. La productividad anual por vaca fue de 4,017 litros, y 13.17 L al día⁽²⁹⁾.

Definición objetivos y alcance

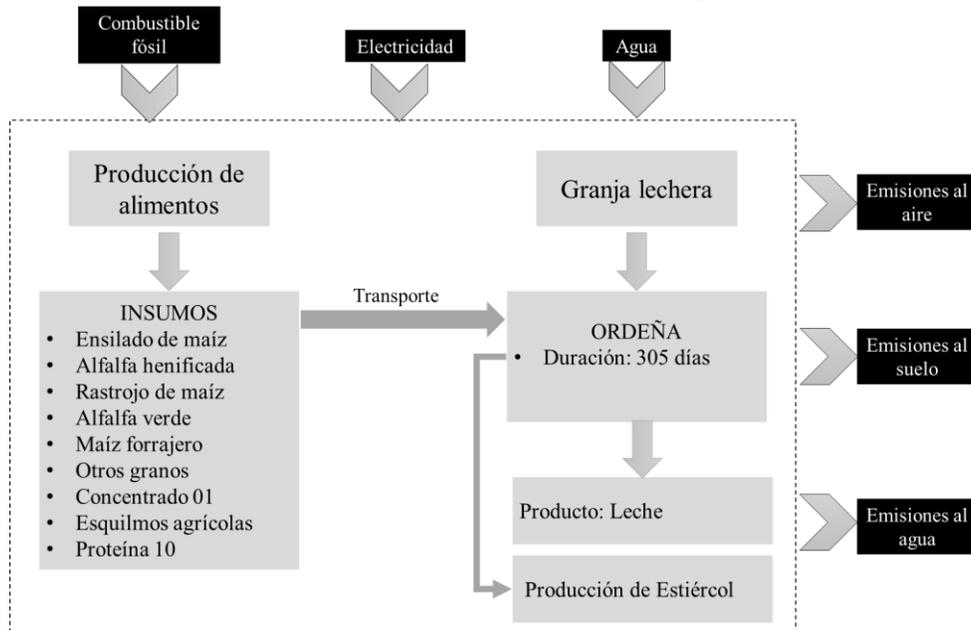
El objetivo del presente estudio fue evaluar el desempeño ambiental de la producción de leche de vaca en sistema familiar semi-intensivo en México al año 2030. La unidad funcional fue 1 kg de leche corregida por grasa y proteína (LCGP). De acuerdo con la International Dairy Federation (IDF), el uso la unidad de LCGP asegura una comparación justa con diferentes razas o regímenes de alimentación⁽³⁰⁾. El peso de la leche cruda se convirtió a LCGP mediante la siguiente ecuación:

$$\text{LCGP (kg/año)} = \text{Producción (kg/año)} * [0.1226 \text{ grasa\%} + 0.0776 \text{ proteína\%} + 0.2534]$$

Los contenidos de grasa y proteína se establecieron considerando el promedio de los valores establecidos en el libro de Producción de leche de bovino en el sistema familiar en México, siendo 4.5 % grasa y 3.5 % proteína⁽⁵⁾.

Límites del sistema

Los límites del sistema se establecieron considerando un enfoque de la cuna a la puerta de la granja (Figura 1), es decir, desde la extracción de materias primas empleadas en la alimentación del ganado hasta que la leche esta lista para salir de la granja. El sistema consideró dos subsistemas principales: 1) Producción de alimento para vacas: considera las actividades y procesos relacionados con el cultivo de forrajes y leguminosas. 2) Producción de leche: considera las actividades de transporte de alimento a la granja y la alimentación de las vacas durante 305 días correspondientes al periodo de ordeña⁽³¹⁾.

Figura 1: Esquema de los límites del sistema de la producción de leche

Análisis de inventario

El estudio consideró datos de fuentes secundarias de información. El volumen de producción y el inventario de cabezas a nivel nacional se obtuvieron de la base de datos del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta⁽²⁹⁾. Los insumos empleados en la alimentación de ganado se obtuvieron de libros científicos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias^(5,6).

Para conocer la producción de leche por vaca al año se obtuvieron los valores correspondientes al volumen de producción nacional y el inventario de cabezas nacional⁽²⁹⁾. Se realizó la prospectiva del volumen de producción de leche fluida (miles de litros) en México, para el periodo 2021-2030, para lo cual se empleó el método estadístico univariado de series (ARIMA)⁽³²⁾. Las pruebas estadísticas, estimación del modelo y pronósticos se realizaron con el software Simetar[®].

Se utilizó como factor de riesgo la distribución de probabilidad, y con ello se determinaron los mínimos y máximos de las series volumen y precio de la leche. Estos intervalos de confianza se utilizaron para construir el escenario pesimista (intervalo inferior), base (media) y optimista (intervalo superior). Los volúmenes de leche se calcularon por sistema productivo, establos con un promedio de 8 vacas, se consideró el volumen de producción por vaca al día y por año, considerando una lactancia de 305 días (Cuadro 1).

Cuadro 1: Parámetros productivos para el sistema semi-intensivo en los escenarios pesimista, base y optimista

	2021			2030		
	Pesimista	Base	Optimista	Pesimista	Base	Optimista
Litros de leche vaca/305 días	3,745	4,017	4,267	3,724	3,944	4,166
Litros de leche vaca/día	12.28	13.17	13.99	12.21	12.93	13.66
Kg de leche vaca/305 días (LCGP)	4,033	4,325	4,594	4,010	4,246	4,486
Kg de leche vaca/día (LCGP)	13.22	14.18	15.06	13.16	13.92	14.71

LCGP= leche corregida por grasa y proteína.

Las diferentes proporciones de los ingredientes de la dieta utilizada en la alimentación de las vacas se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Principales ingredientes de la dieta utilizada para la alimentación de las vacas en sistema semi-intensivo

Insumos	Ingredientes promedio año (kg)	%
Ensilado de Maíz	65,450	25.81
Alfalfa henificada	212	0.08
Rastrojo de maíz	34,277	13.52
Alfalfa verde	133,057	52.47
Maíz forrajero	2,399	0.95
Otros granos	1,938	0.76
Concentrado 01	5,021	1.98
Esquilmos agrícolas	8,445	3.33
Proteína 10	2,780	1.10
Total	253,579	100.00

Con la información anterior se obtuvieron los datos para integrar el inventario para la producción de 1 kg de leche – LCGP (Cuadro 3).

Cuadro 3: Inventario por 1 kg de leche -LCGP producida en sistema semi-intensivo

	2021			2030		
	Escenario pesimista	Escenario base	Escenario optimista	Escenario pesimista	Escenario base	Escenario optimista
S1						
Entradas						
Ensilado de maíz	1.96251	1.82989	1.72263	1.97376	1.86385	1.76424
Alfalfa henificada	0.00636	0.00593	0.00558	0.00639	0.00604	0.00571
Rastrojo de maíz	1.02778	0.95832	0.90215	1.03367	0.97611	0.92395
Alfalfa verde	3.98968	3.72007	3.50202	4.01255	3.78912	3.58662
Maíz forrajero	0.07194	0.06708	0.06315	0.07235	0.06832	0.06467
Otros granos	0.05812	0.05419	0.05102	0.05846	0.05520	0.05225
Concentrado 01	0.15055	0.14038	0.13215	0.15142	0.14299	0.13534
Esquilmos agrícolas	0.25321	0.23610	0.22226	0.25466	0.24048	0.22763
Proteína 10	0.08337	0.07773	0.07318	0.08385	0.07918	0.07495
Salidas						
Total, alimento	7.60352	7.08969	6.67414	7.64711	7.22129	6.83538
S2						
Entradas						
Ocupación de suelo (establo)	0.00216	0.00201	0.00190	0.00217	0.00205	0.00194
Combustible	0.01126	0.01050	0.00989	0.01133	0.01070	0.01012
Electricidad	0.00733	0.00683	0.00643	0.00737	0.00696	0.00659
Agua	7.56322	7.05212	6.63877	7.60658	7.18301	6.79915
Alimento	7.60352	7.08969	6.67414	7.64711	7.22129	6.83538

Salidas

Amoníaco	0.00991898	0.00924868	0.00870658	0.00997585	0.00942035	0.00891692
Metano por gestión de estiércol	0.01835012	0.01711005	0.01610718	0.01845532	0.01742764	0.01649630
Metano por fermentación entérica	0.02454948	0.02289048	0.02154879	0.02469022	0.02331536	0.02206937
Nitrógeno	0.00010911	0.00010174	0.00009577	0.00010973	0.00010362	0.00009809
Óxido nitroso	0.00000248	0.00000231	0.00000218	0.00000249	0.00000236	0.00000223

S1=subsistema de producción de alimentos, S2=subsistema de producción de leche.

El inventario para S1 fue integrado considerando el alimento suministrado a las vacas: ensilado de maíz, alfalfa henificada, rastrojo de maíz, alfalfa verde, maíz forrajero, concentrado 01, esquilmos agrícolas y proteína 10. Los datos se obtuvieron de la Base de Datos Agrícola y Alimentaria (AGRIBALYSE), Agencia de Medio Ambiente y Gestión de la Energía⁽³³⁾.

El inventario para S2 fue integrado considerando:

Ocupación de suelo del establo: la producción de leche de bovino en sistema semi-intensivo se realiza regularmente en cubículo individual de libre acceso en corral pavimentado de acuerdo con el manual de buenas prácticas pecuarias en unidades de producción de leche bovina⁽³⁴⁾, en estas condiciones el ganado lechero requiere una superficie de 9 m²/vaca.

Consumo de combustible: el número de litros de combustible por kg de LCGP producido se calculó en función del tipo de vehículo necesario para transportar los ingredientes, la eficiencia de combustible expresada en km/litro y la capacidad de carga, se realizó el ajuste en función de la unidad funcional.

Consumo de energía eléctrica: en los sistemas de producción de pequeña y mediana escala la ordeña se realiza de forma manual, por lo que se consideró únicamente la iluminación artificial del establo⁽³⁴⁾ y se ajustó en función del número de días (305) que permanecen las vacas en lactancia.

Consumo de agua: se obtuvo el consumo de agua por vaca durante el periodo de lactancia (305 días), las vacas lactantes consumieron en promedio 110 L de agua al día⁽³⁵⁾.

Las emisiones de metano (CH₄): por fermentación de estiércol y manejo de estiércol, de nitrógeno (N) y óxido nitroso (N₂O) por manejo de estiércol, se estimaron usando los factores de emisión establecidos para México por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático⁽³⁶⁾.

Evaluación de impacto ambiental

La evaluación de impacto se realizó en el software OpenLCA V.1.11.0, mediante el método ReCiPe 2008, para este estudio se consideraron siete categorías de punto medio: ocupación de suelo agrícola (ALO), cambio climático (CC), agotamiento fósil (FD), toxicidad humana (HT), ecotoxicidad marina (ME), acidificación terrestre (TA) y agotamiento de agua (WD)⁽³⁷⁾. Dichas categorías fueron seleccionadas por tener la mayor contribución relativa de los impactos ambientales y la frecuencia de uso en la literatura en investigaciones similares.

Resultados

Evaluación de impacto ambiental

Los resultados de caracterización para el escenario base permitieron identificar siete categorías (ALO, CC, FD, HT, ME, TA y WD) como las principales contribuyentes a los impactos ambientales en la producción de 1 kg de LCGP. En el Cuadro 4, se puede observar que el subsistema de producción de alimentos (S1) es el responsable de la mayor parte del impacto total, con porcentajes superiores al 71 % en las categorías CC, FD, HT, WD, ME y ALO. Mientras que el subsistema de producción de leche (S2) contribuye a las cargas ambientales en las categorías TA (58.94 %), CC (28.16 %) y FD (25.58 %).

Cuadro 4: Impactos de punto medio para 1 kg LCGP-Escenario Base 2021

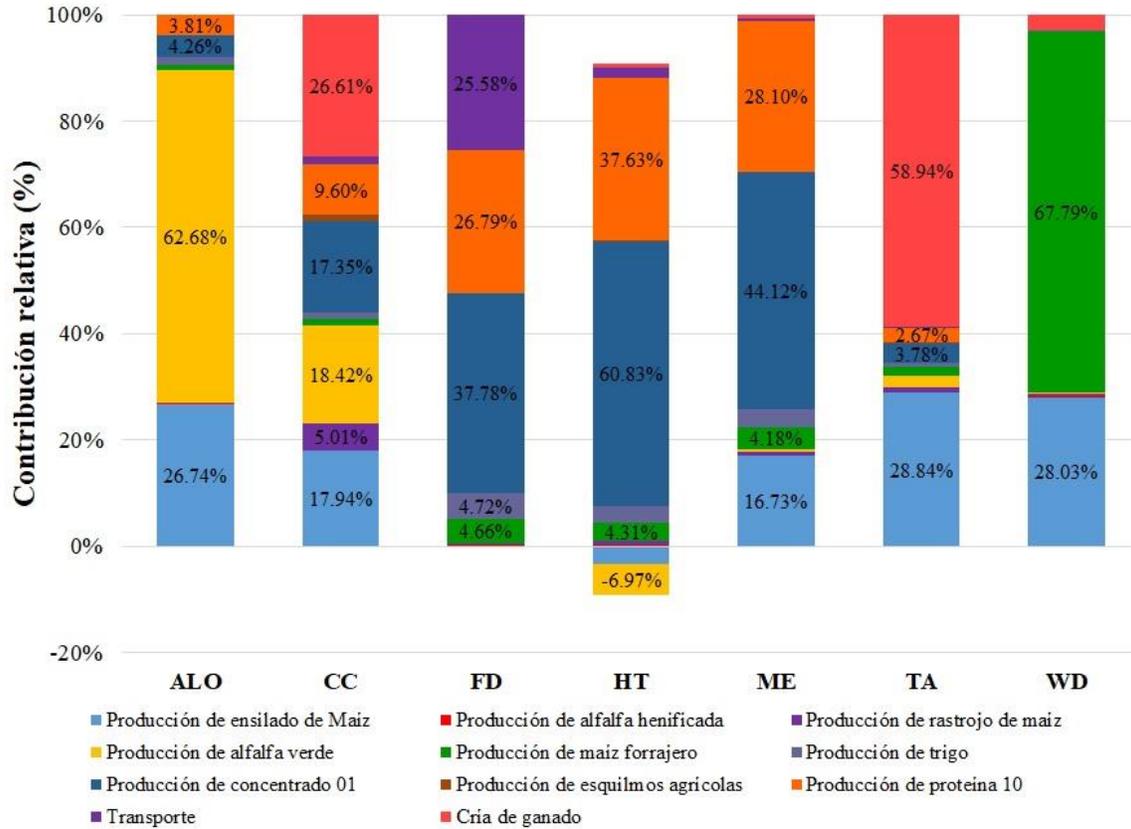
Categoría	S1	S2	Total	Unit
ALO	6.13494	0.00219	6.13713	m ² *a
CC	0.65082	0.25508	0.90590	kg CO ₂ eq
FD	0.03501	0.01203	0.04704	kg oil eq
HT	1.59909	0.05472	1.65381	kg 1,4-DB eq
ME	1.72146	0.01833	1.73979	kg 1,4-DB eq
TA	0.01867	0.02680	0.04547	kg SO ₂ eq
WD	0.04327	0.00131	0.04458	m ³

S1= subsistema de producción de alimentos, S2= subsistema de producción de leche, ALO= ocupación de suelo agrícola, CC= cambio climático, FD= agotamiento fósil, HT= toxicidad humana, ME= ecotoxicidad marina, TA= acidificación terrestre, WD= agotamiento de agua.

Los procesos de la producción de 1 kg LCGP involucrados en la generación de cargas ambientales se presentan en la Figura 2. En el subsistema 1, los principales contribuyentes son: la producción de concentrado 01 en las categorías HT (60.83 %), ME (44.12 %), FD (37.78 %) y CC (17.35 %), la producción del ensilado de maíz en las categorías TA (28.03 %), WD (26.74 %), ALO (26.74 %), CC (17.94 %) y ME (16.73 %), la producción de proteína 10 en las categorías HT (37.63 %), ME (28.10 %) y FD (26.79 %), la producción de maíz forrajero en la categoría WD (67.79 %) y la producción de alfalfa verde en las categorías ALO (62.68 %) y CC (18.42 %).

En el subsistema 2, la carga ambiental de la producción de 1 kg LCGP, es derivada de la cría de ganado principalmente para las categorías TA (58.94 %) y CC (26.61 %) y del transporte de insumos a la granja, específicamente en la categoría FD (25.58 %).

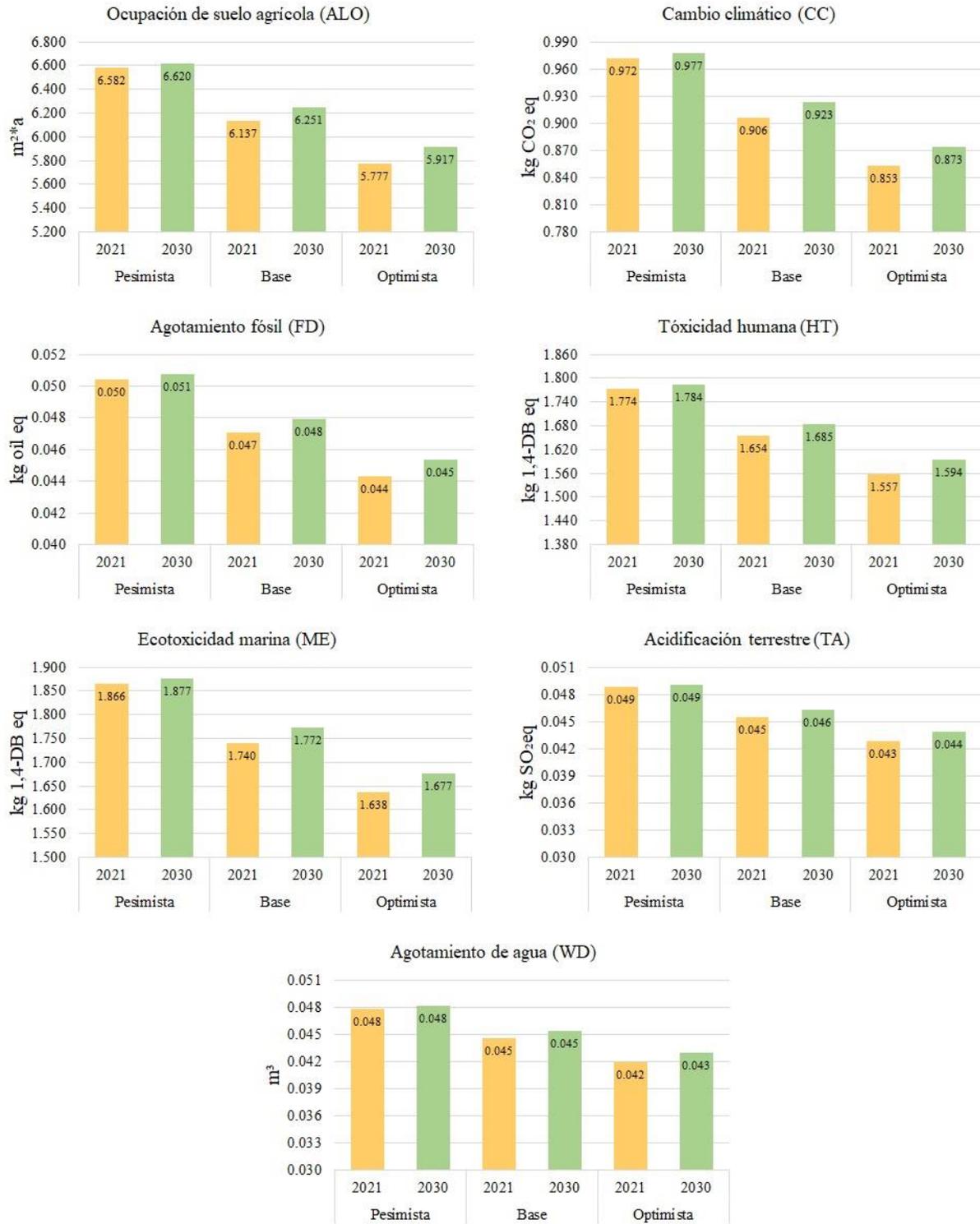
Figura 2: Contribución de los procesos involucrados a las diferentes categorías de impacto



Análisis comparativo de los escenarios para la producción de 1 kg LCGP

En la Figura 3 se presenta la comparación de los resultados ambientales en los escenarios base, optimista y pesimista para las siete categorías de impacto, en los años 2021 y 2030.

Figura 3: Análisis comparativo de las cargas ambientales entre los años 2021 y 2030, para los escenarios pesimista, base y optimista.



Los resultados comparativos entre los escenarios pesimista, base y optimista muestran que, tanto en el año 2021, como en el año 2030, el escenario optimista permite una reducción del 6 y 5 % respectivamente, de las cargas ambientales en todas las categorías de impacto, esto se debe al aumento en el volumen de producción y a la mejora de la eficiencia productiva permite reducir la intensidad de las emisiones⁽¹⁹⁾.

Para los años 2021 y 2030, en la categoría ALO, el escenario optimista presentó una reducción de 0.36 y 0.33 m² por kilo de LCGP, respectivamente. Mientras que, un escenario pesimista implicó el aumento de 0.44 y 0.37 m² por kilo de LCGP.

En la categoría CC, el escenario optimista permitió una disminución de 0.53 y 0.49 kg de CO₂ eq por kg de LCGP para los años 2021 y 2030 respectivamente. Por otro lado, la producción de 1 kg de LCGP en un escenario pesimista implicó un incremento de 0.066 y 0.045 kg de CO₂ eq por kilo de leche.

En el escenario optimista 2021 y 2030 se observó una disminución de 0.0027 y 0.0026 kg oil eq por kilo de LCGP, respectivamente, en la categoría FD. En el escenario pesimista se mostró un incremento de 0.0034 y 0.0028 kg oil eq por kilo de LCGP.

Para el año 2030 las categorías HT y ME en escenario el optimista presentó una reducción de 0.059 y 0.095 kg 1,4-DB eq por kilo de LCGP respectivamente, y en el escenario pesimista un incremento de 0.12 y 0.10 kg 1,4-DB eq por kilo de LCGP respectivamente.

En la categoría TA el escenario optimista para los años 2021 y 2030 permitió una reducción de 0.0027 y 0.0025 kg SO₂ eq mientras que el escenario pesimista implicó un incremento de 0.0033 y 0.0027 kg SO₂ eq por kg de LCGP.

Finalmente, en la categoría WD para los años 2021 y 2030 se presentó una reducción de 0.0026 y 0.0024 m³ de agua por kilo de LCGP respectivamente, en el escenario optimista y un incremento de 0.0032 y 0.0027 m³ de agua por kilo de LCGP respectivamente, en el escenario pesimista.

Discusión

Los resultados de caracterización del escenario base para la producción 1kg LCGP en sistema semi-intensivo, muestran las mayores cargas ambientales en el subsistema de producción de alimentos con porcentajes superiores al 71 % en las categorías ocupación de suelo agrícola (ALO), cambio climático (CC), agotamiento fósil (FD), agotamiento de agua (WD), toxicidad humana (HT) y ecotoxicidad marina (ME). Se encontraron resultados similares en el estudio realizado por Carvalho *et al*⁽¹⁸⁾, donde se identificó que la producción de cultivos para la alimentación del ganado fue uno de los principales contribuyentes en la producción de 1 kg de LCGP en un sistema semi-intensivo de Brasil, principalmente para las categorías, uso de suelo, agotamiento de recursos fósiles, consumo de agua y acidificación terrestre.

En comparación con estudios en sistema intensivo, la producción de alimentos representa también un impacto ambiental significativo. La producción de alimentos fue el principal contribuyente a las categorías calentamiento global, uso de energía, uso de la tierra y uso de agua⁽³⁸⁾.

Ocupación de suelo agrícola

La carga ambiental de la producción de 1 kg de LCGP en la categoría ALO fue de 6.14 m² en su escenario base 2021, los principales contribuyentes a esta categoría están relacionados al cultivo de alfalfa verde (62.68 %), seguido de ensilado de maíz (26.74 %). Estos resultados son superiores a 1.89 m²/año por kg de LCGP, presentados por Berton *et al*⁽¹⁶⁾, en donde, el uso de suelo fue destinado para la agricultura que produce los insumos requeridos en la alimentación del ganado en sistemas tradicionales de pequeña escala en Italia; y también superiores a los resultados presentados por Xiaoquin *et al*⁽³⁸⁾, en donde la producción por kilo de LCGP requiere una ocupación de 1.16 m² a 2.49 m², resaltando que el 98 % corresponde a ocupación de suelo por producción de alimento y 2 % corresponde a los establos. Por su parte Rivera *et al*⁽³⁹⁾ reportaron una ocupación de 1.33 m² por kilo de LCGP en un sistema de producción de leche convencional en Colombia.

Sin embargo, los resultados de este estudio fueron inferiores a los 8.8 a 11.2 m² de ocupación por kg de leche en Etiopia⁽⁴⁰⁾ y concuerda con que la producción de forrajes en suelos con bajos rendimientos de biomasa son determinantes para la contribución de impactos en la categoría ALO⁽¹⁸⁾, por lo que es posible utilizar 2.25 m² menos de suelo en sistemas intensivos en comparación con aquellos menos tecnificados⁽⁴¹⁾.

En el año 2021 el escenario optimista presentó una producción de 4,594 kg de leche por vaca (15.06 kg/día), siendo la producción más alta de los escenarios comparados, lo que significó la menor contribución en la categoría ALO con 5.78 m², mientras que en el escenario pesimista la producción de leche disminuyó a 4,010 kg vaca/año (13.16 kg/día); esto representó un incremento en la ocupación de suelo de 6.62 m² (Figura 3). Un aumento en la producción de leche por área de tierra agrícola se acompaña de una mejora en la eficiencia ambiental⁽⁴²⁾.

Cambio climático

En la categoría de impacto CC se generaron 0.85 kg CO₂ eq. por 1 kg de LCGP en su escenario base. Los principales contribuyentes para esta categoría están relacionados con la cría de ganado (26 %), seguida de la producción de alfalfa verde (18.32 %), ensilado de maíz (17.84 %) y la producción de concentrado 01 (17.26 %) (Figura 2). Las cargas ambientales de la cría de ganado son atribuidas principalmente a las emisiones de CH₄ provenientes de la

fermentación entérica y la gestión de estiércol, mientras que las cargas ambientales de la producción de forrajes y leguminosas se relacionan principalmente a las emisiones de N₂O generadas por el uso de agroquímicos empleados en las prácticas agrícolas.

El impacto ambiental de CC encontrado en este estudio está por debajo de 1.42 kg CO₂ eq por kilo de LCGP en sistema semi-intensivo⁽¹⁸⁾. Kim *et al*⁽⁴³⁾, compararon sistemas de pequeña escala (150 vacas) e intensivo (1,500 vacas) y reportaron valores de 1.22 y 0.98 kg CO₂ eq, respectivamente, demostrando que prácticas en la alimentación tales como una reducción en la proporción de forraje al 50 %, así como el uso de forrajes más digestibles, y una mayor suplementación de grasa pueden reducir hasta en un 7 % las contribuciones a CC. Con respecto a la producción de concentrados⁽⁴⁴⁾ indican que es posible relacionarlo con un incremento en la generación de GEI al modelar una reducción en el consumo de alimentos balanceados, atribuyendo el incremento a una disminución en los volúmenes de producción por vaca.

Los valores encontrados en los diferentes escenarios del estudio actual van desde 0.853 kg de CO₂ eq por kg de LCGP para establos con rendimiento de 4,594 kg de leche al año (15.06 litros/día) en un escenario optimista, hasta 0.977 kg de CO₂ eq por kg de LCGP para establos con rendimiento de 4,010 kg de leche al año (13.16 litros/día), 0.788 kg de CO₂ eq por kg de LCGP en un sistema semi estabulado en Brasil con rendimiento de 6,335 kg leche⁽⁴⁵⁾ donde los valores más bajos de CO₂ eq. pueden estar asociado a los altos niveles de producción de leche por vaca⁽¹⁸⁾.

Agotamiento fósil

El impacto ambiental para la categoría FD fue de 0.48 kg oil eq. para 1 kg de LCGP, las principales contribuciones corresponden al S1 por la producción de concentrado 01 (34.59 %) y proteína 10 (24.52 %). Mientras que el 25 % de las emisiones son generadas en el transporte de los insumos a la granja (Figura 2). Este valor se encuentra por debajo a los 4.82 kg oil eq.⁽¹⁸⁾, donde los procesos de mayor impacto fueron la producción de ensilaje de maíz (45.7 %), la producción de pastos (34.3 %) y el transporte de insumos a la granja (10 %). Ferreira *et al*⁽⁴⁶⁾ indican la importancia de conocer el origen de los insumos en la cadena de suministro para reducir los impactos derivados del transporte.

Los valores encontrados en los diferentes escenarios considerados en este estudio van desde 0.044 kg oil eq en un escenario optimista 2021 hasta 0.051 kg oil eq en un escenario pesimista 2030 (Figura 3), estas variaciones corresponden al aumento o disminución de la productividad de leche por vaca.

Acidificación terrestre

Para la categoría TA, 1 kg de LCGP generó un total de 0.043 kg SO₂ eq en su escenario base 2021, el principal generador de emisiones para esta categoría es la cría de ganado (58.75 %), seguido de la producción de ensilado de maíz (28.83 %), y las emisiones generadas por la cría de ganado por la volatilización de nitrógeno en forma de amoníaco (NH₃) (Figura 2). Las emisiones provenientes de la producción de ensilado de maíz son NH₃ y N₂O.

El total de emisiones generadas en esta categoría son superiores a los 0.001 kg SO₂ eq.⁽¹⁸⁾ y los 0.020 kg SO₂ eq atribuibles en su mayoría a las emisiones por la gestión del estiércol y al uso de fertilizantes nitrogenados reportados⁽⁴³⁾. En ambos estudios, el ensilado de maíz fue uno de los principales contribuyentes a la generación de emisiones para esta categoría de impacto. La literatura especializada ha demostrado como la dependencia de concentrados comerciales puede resultar en la contaminación de suelos y cuerpos de agua por exceso de nutrientes, además de competir directamente con la producción de otros alimentos para consumo humano.

El escenario optimista 2021 presenta el menor valor en la categoría TA con 0.043 kg de SO₂ mientras que el escenario pesimista 2021 y 2030 presenta el mayor valor con 0.049 kg de SO₂, el aumento en el volumen de producción permite la reducción del impacto ambiental en la categoría TA.

Agotamiento de agua

El agotamiento de agua por 1 kg de LCGP fue de 0.04225m³ en su escenario base 2021, el principal consumo fue para la producción de maíz forrajero (67.08 %) y del ensilado de maíz (27.74 %). El consumo de agua en este estudio es ligeramente superior a los 0.00587 m³⁽¹⁸⁾, que, en similitud con este estudio, el mayor consumo de agua se dio en los cultivos de maíz. Sin embargo, hay una alta variabilidad en la categoría WD con consumos de 0.02800 m³ hasta 0.09900 m³, que conforme el tamaño de las explotaciones aumenta, el consumo de agua disminuye, debido a que la mayor huella hídrica de la producción de leche corresponde al cultivo de forrajes para sostener los sistemas de producción de menor escala⁽⁴¹⁾.

Los valores presentados en los escenarios comparativos (Figura 3) presentan valores que van desde 0.042 m³ de agua para el escenario optimista hasta 0.048 m³ para el escenario pesimista. El agua es un insumo esencial para la limpieza y consumo de los animales⁽⁴⁷⁾, si bien, no hay forma de reducir la ingesta de agua, ya que los requisitos fisiológicos del animal y la producción de leche influyen en su consumo, la gestión adecuada del agua es una alternativa adecuada para minimizar las pérdidas de este líquido vital.

Toxicidad humana y ecotoxicidad marina

Las categorías relacionadas con toxicidad presentaron valores de 1.5 kg 1,4-DB eq para HT y 1.64 kg 1,4-DB eq para ME. Si bien estos valores no son considerados generalmente en la literatura, dado que no hay datos de referencia comparativos, en este estudio tienen una contribución relativa importante para las cargas ambientales, los principales contribuyentes son la producción de concentrado 01 y de proteína 10 (Figura 2) con porcentajes de 60.83 % y 37.63 % para HT y 44.12 % y 28.10 para ME. Los valores presentados en los escenarios comparativos (Figura 3) los menores valores se presentaron en el escenario optimista 2021 (1.56 kg 1,4-DB eq para HT y 1.64 kg 1,4-DB eq para ME), mientras que el mayor valor se presenta para el escenario pesimista 2030 (1.78 kg 1,4-DB eq para HT y 1.88 para ME).

Estrategias de mitigación de impactos ambientales

Los resultados de los escenarios evaluados presentan una gran oportunidad de acción, para posicionar a la ganadería lechera en un escenario positivo; se identificó que el incremento en los volúmenes de producción viene acompañado de una disminución de las cargas ambientales. Una estrategia para mejorar el desempeño ambiental de los sistemas de producción de leche semi-tecnificados es mejorar la productividad por vaca lactante⁽¹⁸⁾, de esta forma la mitigación de los impactos ambientales se podría lograr sin disminuir la producción de leche. Es posible incrementar el volumen de producción de la mano de más eficiencia con menos vacas. Esto no solo implica un beneficio ambiental, sino también económico y social que permite avanzar hacia la sostenibilidad de los sistemas de producción de leche.

Este estudio permitió identificar los principales procesos que contribuyen a la generación de impactos ambientales, en primer lugar, las actividades agrícolas relacionadas al cultivo requeridos en la alimentación del ganado y la gestión de estiércol. Esto da paso a la implementación de estrategias integrales como la transición hacia una economía circular mediante procesos regenerativos para eliminar pérdidas y desperdicios durante todo el ciclo biológico, como una oportunidad para cerrar el ciclo, las propias heces y orina del ganado pueden ser aprovechados como fertilizante natural, empleando buenas prácticas de manejo y con el monitoreo correspondiente, puede contribuir a la salud del suelo y reducir las emisiones de CH₄ a la atmósfera⁽⁴⁸⁾.

Conclusiones e implicaciones

El subsistema de producción de alimentos es el principal contribuyente a la generación de cargas ambientales en las categorías ALO, CC, FD, HT, ME y WD. Para la categoría ALO el insumo que utilizó mayor cantidad de suelo fue la alfalfa. Para las categorías CC, FD, HT

y ME, los insumos que tienen mayor contribución en la generación de emisiones fueron concentrado 01, proteína 10 y ensilado de maíz. En la categoría WD el mayor impacto se atribuye al cultivo de maíz forrajero. La cría de animales tiene su mayor contribución a las categorías TA, CC y FD, los procesos de fermentación entérica y gestión de estiércol contribuyen a la generación de emisiones como CH₄ y NH₃. Los escenarios comparativos permiten confirmar que el incremento en el volumen de producción representa una disminución del 5 y 6 % para los años 2021 y 2030 respectivamente, en las categorías de impacto evaluadas. Por lo que la mejora de la eficiencia productiva por vaca lactante, es una de las principales metas por establecer.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al CONAHCYT de México por el proyecto **F003-320069**, asignado a Francisco Ernesto Martínez Castañeda.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo informado en este documento.

Literatura citada:

1. FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Portal lácteo-Producción lechera. 2022. <https://www.fao.org/dairy-production-products/production/es/> Consultado Nov 16, 2022.
2. FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Portal lácteo-Sistemas de producción. 2022. <https://www.fao.org/dairy-production-products/production/production-systems/es/> Consultado Nov 20, 2022.
3. SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Panorama Agroalimentario. 2022.
4. Loera J, Banda J. Situación de la industria láctea en México: producción y comercialización. RumiNews LATAM 2022. <https://rumiantes.com/situacion-industria-lactea-mexico-produccion-comercializacion/> Consultado Dic 6, 2022.
5. Núñez G, Vera HR, Román H. Importancia y procesos en la producción de leche de bovino en México. En: Vera AH, *et al.*, editores. Producción de leche de bovino en el sistema familiar. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias - INIFAP. 2009.

6. Espinoza GJA. Variables del mercado de insumos y productos que inciden en la competitividad de la cadena de leche de bovino en México. En: Núñez HG *et al.*, (compiladores). Avances de investigación para la producción de la productividad, competitividad y sustentabilidad de la cadena productiva de leche de bovino en México. Libro Científico. INIFAP. 2012.
7. INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México. 1ª ed. México. 2019.
8. Sánchez B, Flores S, Rodríguez E, Anaya AM, Contreras EA. Causas y consecuencias del cambio climático en la producción pecuaria y salud animal. Revisión. Rev Mex Cienc Pecu 2020;11(Supl 2):126-145.
9. Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero 1990 – 2019. México. 2020.
10. Balcha E, Menghistu HT, Zenebe A, Hadush B. Carbon footprint of cows' milk: a case study of peri-urban and urban dairy farms within Mekelle milk-shed, Ethiopia. Carbon Manag 2022;(13):55–68.
11. Baldini C, Gardoni D, Guarino N. A critical review of the recent evolution of life cycle assessment applied to milk production. J Clean Produc 2017;140:421-435.
12. Rivera JE, Arenas FA, Rivera R, Benavides LM, Sánchez J, Barahona R. Life cycle assessment in milk production: Comparison of two specialized dairy herds. Livest Res Rural Dev 2014;26:1-9.
13. Battini F, Agostini A, Trabaglio V, Amaducci S. Environmental impacts of different dairy farming systems in the Po Valley. J Clean Produc 2016;(112):91-102.
14. Gilson G, Ferrero F, Bava L, Borreani G, Dall Prá A, Pacchioli MT, Sandrucci A, Zucali M, Tabacco E. Forage systems and sustainability of milk production: Feed efficiency, environmental impacts and soil carbon stocks. J Clean Produc 2020;(260):121012.
15. Mazzeto AM, Bishop G, Styles D, Arndt C, Brook R, Chadwick D. Comparing the environmental efficiency of milk and beef production through life cycle assessment of interconnected cattle systems. J Clean Produc 2020;(277):124108.
16. Berton M, Bittante G, Zendri F, Ramanzin M, Schiavon S, Sturaro E. Environmental impact and efficiency of use of resources of different mountain dairy farming systems. Agric Syst 2020;(181):102806.

17. De Vries M, Wouters AP, Vellinga TV. Environmental impacts of dairy farming in Lembang, West Java. Estimation of greenhouse gas emissions and effects of mitigation strategies. CCAFS Working Paper no. 221. Wageningen, the Netherlands: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). 2017. www.ccafs.cgiar.org.
18. Carvalho LS, Willers CD, Soares BB, Nogueira AR, Neto JA, Rodrigues LB. Environmental life cycle assessment of cow milk in a conventional semi-intensive Brazilian production system. *ESPR* 2022;(29):21259–21274.
19. Gerber P, Vellinga T, Opio C, Steinfeld H. Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Lives Sci* 2011;(139):100-108.
20. Wilkes A, Wassie S, Odhong' C, Fraval S, van Dijk S. Variation in the carbon footprint of milk production on smallholder dairy farms in central Kenya. *J Clean Prod* 2020;(265):121780.
21. ISO 14040. Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. International Organization for Standardization. Geneva. 2006.
22. ISO 14044. Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. International Organization for Standardization. Geneva. 2006.
23. INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2017: Conociendo el campo de México. Resultados. 2018. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ena/2017/doc/ena2017_pres.pdf Consultado Dic 2, 2022.
24. Loera J, Banda J. Situación de la industria láctea en México: producción y comercialización. *RumiNews LATAM*. 2019. <https://rumiantes.com/situacion-industria-lactea-mexico-produccion-comercializacion>. Consultado Dic 6, 2022.
25. Secretaría de Economía. Dirección General de Industrias Básicas. Análisis del Sector Lácteo en México. México. 2012.
26. Cano M, Ramírez B. Ganadería familiar en los municipios más pobres del estado de Hidalgo, México. En: Cavallotti V *et al.* editor. Globalización, seguridad alimentaria y ganadería familiar. Universidad Autónoma Chapingo. 2017.
27. SADER. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Crece la producción lechera, pero enfrenta retos, uno principal es la normatividad. 2022. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crece-la-produccion-lechera-pero-enfrenta-retos-uno-principal-esta-en-la-normatividad-322012>. Consultado Jul 20, 2023.

28. FINRURAL. Financiera Rural. Bovino y sus derivados. Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial. 2009.
29. SIACON-NR. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. Agricultura. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2022. México.
30. IDF. International Dairy Federation. A common carbon footprint approach for the dairy sector – the IDF guide to standard life cycle assessment methodology. Bulletin of International Dairy Federation 479/2015. 2015. 60pp <https://store.fil-idf.org/product/a-common-carbon-footprint-approach-for-the-dairy-sector-the-idf-guide-to-standard-life-cycle-assessment-methodology/> Accessed Dec 12, 2022.
31. Bretschneider G, Salado E, Cuatrín A, Arias D. Lactancia: Pico y persistencia. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 2015.
32. Box GE, Jenkins GM, Reinsel GC, Ljung GM. Time series analysis forecasting and control. 5 Ed. Wiley. 2015.
33. ADEME. French Environment and Energy Management. Agency, Agribalyse program V1.3. 2016.
34. SENASICA. Manual de buenas prácticas pecuarias en unidades de producción de leche bovina. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Gobierno de México. 2019.
35. Kononoff PJ, Clark KJ. Water Quality and requirements for dairy cattle. 2017. <https://extensionpublications.unl.edu/assets/html/g2292/build/g2292.htm>. Accessed Dec 2, 2022.
36. INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales. México. 2018.
37. Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, De Schryver A, Struijs J, Van Zelm R. ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition. Report I: Characterization. 2009.
38. Xiaoqin W, Leadgard S, Lou J, Guo Y, Zhao Z, Liangguo, Liu C, Zhang N, Duan X, Mac L. Environmental impacts and resource use of milk production on the North China Plain, based on life cycle assessment. *Sci Total Environ* 2018;(625):486-495.
39. Rivera J. Life cycle assessment for the production of cattle milk in an intensive silvopastoral system and a conventional system in Colombia. *Trop Subtrop Agroecosys* 2016;19:237-251.

40. Woldegebriel D, Udo H, Viets T, van der Harst E, Potting J. Environmental impact of milk production across an intensification gradient in Ethiopia. *Livest Sci* 2017;(206):28-36.
41. Brizga J, Kurppa S, Heusala H. Environmental impacts of milking cows in Latvia. *Sustain* 2021;(13):1-12.
42. Drews J, Czycholl I, Krieter J. A life cycle assessment study of dairy farms in northern Germany: the influence of performance parameters on environmental efficiency. *J Environ Manag* 2020;273:111127.
43. Kim D, Stoddart N, Rotz C, Veltman K, Chase L, Cooper J, *et al.* Analysis of beneficial management practices to mitigate environmental impacts in dairy production systems around the Great Lakes. *Agric Syst* 2019;(176):102660.
44. Berton M, Bovolenta S, Gallo L, Ramanzin M, Corazzin M, Sturaro E. Consequential-based life cycle assessment of reducing the concentrates supply level in the diet fed to lactating cows in the alpine dairy farming system. *Ital J Anim Sci* 2023;(22):1-13.
45. de Léis C, Cherubini E, Ruviaro C, da Silva V, do Nascimento Lampert V, Spies A, Soares S. Carbon footprint of milk production in Brazil: a comparative case study. *Int J Life Cycle Assess* 2015;(20):46-60.
46. Ferreira FU, Robra S, Ribeiro PCC, Gomes CFS, Almeida Neto JA, Rodrigues LB. Towards a contribution to sustainable management of a dairy supply chain. *Production* 2020;30:e20190019 2020.
47. Palhares JCP, Novelli TI, Morelli M. Best practice production to reduce the water footprint of dairy milk. *Revi Ambien Agua* 2020;15(1).
48. Villavicencio MR, Salazar MP, Meléndez J. Adaptación al cambio climático con enfoque de economía circular para reducir la vulnerabilidad del sector ganadero extensivo en México: estado del arte. *Reg Des Sust* 2023;XXIII:44.