



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MÉXICO

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

“Evaluación de las Cargas Ambientales en los
Sistemas de Producción de Leche de Bovino a
Pequeña Escala en Texcoco, Estado de México”

Tesis

Para obtener el título de:

Médica Veterinaria Zootecnista

Presenta:

Yessenia Reyes Rodea

Asesores:

Dr. Manuel González Ronquillo

Dr. Francisco Ernesto Martínez Castañeda

Fecha: 01 de Septiembre de 2025



ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE CUADROS	4
I. INTRODUCCIÓN	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
II. I. PANORAMA INTERNACIONAL DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE	7
II. II. PANORAMA DE LA LECHE EN LATINOAMÉRICA	15
II. III. PANORAMA NACIONAL DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE EN MÉXICO	19
II. IV. PANORAMA ESTATAL DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE	25
II. V. CARGAS AMBIENTALES	27
II. VI. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	33
III. JUSTIFICACIÓN.....	38
IV. HIPÓTESIS	39
V. OBJETIVOS	39
VI. MATERIALES.....	40
VII. MÉTODOS	42
VIII. LÍMITE DE ESPACIO	46
IX. LÍMITE DE TIEMPO	47
X. RESULTADOS	48
XI. DISCUSIÓN	55
XII. CONCLUSIÓN.....	59
XIII. SUGERENCIAS	59
XIII. REFERENCIAS.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Muestra la evolución de la producción de leche en México de 1980 a 2023 de los 10 principales estados productores.	20
Figura 2. Cambio porcentual del valor producción de leche de bovino, en los principales estados de la República Mexicana (1980-2023).....	21
Figura 3. Evolución de la producción de leche de los principales municipios del Estado de México (2006-2023).	25
Figura 4. Cambio en el valor de la producción de los principales municipios productores de leche en el Estado de México 2006 a 2023	26
Figura 5. Límite del sistema e inventario del análisis de ciclo de vida en vacas lecheras a pequeña escala.	43
Figura 6. División municipal del Estado de México.....	46
Figura 7. Contribución de las categorías de impacto por 1kg LCGP: CG, ACO, RI, FO-SH, FMPF, FOET; del S1 y S2 en los tres establos (E1, E2, E3).	50
Figura 8. Análisis de las categorías de impacto ambiental: AT, EuAD, EuM, EcT, EcAD, EcM punto medio del S1 y S2.	52
Figura 9. Análisis de categorías de impacto ambiental: TCH, THNC, US, ERM, ERF, CA de punto medio del S1 y S2.	54

LISTA DE CUADROS

Cuadro1. Categorías de impacto y unidad de medida de acuerdo con el método ReCiPe.	36
Cuadro 2. Inventario del S1	44
Cuadro 3. Entradas conocidas desde la tecnosfera en S2.	45
Cuadro 4. Emisiones al aire unidad de medida kilogramo.	45
Cuadro 5. Categorías de impacto ambiental, punto medio por 1kg de LCGP: CG, ACO, RI, FO-SH, FMPF, FOET para los tres establos.....	49
Cuadro 6. Categorías de impacto, punto medio por 1kg LCGP: AT, EuAD, EuM, EcT, EcAD, EcM para los tres establos.....	51
Cuadro 7. Categorías de impacto, punto medio por 1kg: TCH, THNC, US, ERM, ERF, CA, para los tres establos.	53

I. INTRODUCCIÓN

La domesticación del ganado ha sido de gran importancia para la humanidad, fue una parte vital dentro de la etapa neolítica, ocurriendo diversos cambios, como pasar de la recolección a la agricultura, o de la caza a la domesticación; todo lo que se sabe del ancestro del *Bos Taurus* y *Bos Indicus*, conocido como el Uro (*Bos primigenius*) es por literatura muy antigua, huesos, cuernos y de las pinturas rupestres mostrando el vínculo entre ambas partes, una vez que se logró la domesticación del ganado dio origen a la selección con el fin de obtener ventajas sobre ellos, dando inicio a una mejora genética, mediante rasgos particulares con el fin de especializar la producción y sostener los rebaños (Wright, 2018).

Desde que el humano asimiló que los bovinos no resultaron ser una amenaza, puesto que estos no llegan a competir por el alimento (paja, malezas, pastos, forrajes y etc.) entonces aprovechó que de insumos simples se obtienen subproductos más complejos y de valor como: carne, leches, heces, pieles e incluso la fuerza física para las diversas actividades (Van Soest, 1994).

En los países desarrollados según la FAO (2024b) habrá cambios, por un lado, se disminuirá el número de cabezas de ganado y explotaciones lecheras, pero aumentará la productividad por vaca. La producción de leche para el 2033 alcanzará 1,085 toneladas métricas (Mt); Por otro lado, en América Latina, se espera que la producción aumente de 86.67 a 94.71 Mt (OECD-FAO, 2024), impulsado principalmente por el aumento del inventario lechero.

La producción a pequeña escala representa una serie de beneficios, sociales y económicos; con la organización de las cooperativas las cuales ofrecen ventajas que fortalecen a los productores como acceso al mercado, tecnologías, estabilidad económica y contribuir en el desarrollo de las comunidades (FEPALE, 2011; Dohmwirth y Liu, 2020). Según SAGARPA ahora SADER en México existían aproximadamente 300 mil pequeños y medianos productores de leche al corte estadístico de 2018 (SAGARPA, 2018).

Si bien los bovinos de leche proporcionan una serie de subproductos para beneficio de las poblaciones, hay otra parte que no lo es, llegando a ser perjudicial para la biosfera. Por ello se han desarrollado modelos que permiten

cuantificar el impacto ambiental que genera la producción de metano entérico, amoníaco, óxido nitroso, derivados de la gestión del estiércol, así como otros gases que están involucrados para la producción de leche (IPCC, 2019; Singaravadivelan et al., 2023). La ganadería representa el 14.5% de las emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en su cadena (FAO/LEAP, 2024). En 2019, el dióxido de carbono (CO₂) representó tres cuartas partes de las emisiones de gases de efecto invernadero. Se espera que para el 2050 haya una reducción del 20% en las emisiones y aumente la productividad (FAO, 2023). Las actividades que involucran la producción de leche van a repercutir en la atmósfera, hidrósfera, la temperatura, precipitación, aumento del nivel del mar (IPCC, 2019; FAO, 2023).

Para poder llevar a cabo la evaluación y análisis de impactos ambientales orientados en la producción de leche, se emplean modelos que permiten predecir el impacto ambiental, por ejemplo, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), gracias a su metodología permite cuantificar el ciclo de vida de los productos o actividades y su impacto ambiental (Huijbregts et al., 2016). En la producción de leche las categorías de impacto ambiental que más se han reportado con el ACV son: calentamiento global, escasez de recursos fósiles, eutrofización, acidificación, el uso de suelo agrícola, ecotoxicidad, formación fotoquímica de ozono, depleción de la capa de ozono y toxicidad humana (McClelland et al., 2018). En el marco normativo de las ISO-14040 (2006) y ISO-14044 (2006) se describen los principios y el marco de referencia para el ACV.

El presente estudio presenta un abordaje metodológico para evaluar las cargas ambientales en tres establos de leche de bovino a pequeña escala haciendo uso de la metodología de ACV, donde se abordarán por dos subsistemas, el agrícola y el pecuario en el municipio de Texcoco, Estado de México. Con el soporte del software SiMaPro, se empleará el método ReCiPe, este método permitirá conocer las cargas ambientales en 18 categorías, conocidas como “categorías de impacto punto medio”.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

II. I. PANORAMA INTERNACIONAL DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE

En el 2023 la tasa de crecimiento de la producción de leche fue de 1.5%, equivalente a 927 millones de Mt. Se estima que para el año 2033, la producción mundial de leche de vaca alcance 1,085 millones de Mt, un crecimiento más dinámico en comparación con otros productos agrícolas. Países como la India y Pakistán representarán el 30% de la producción mundial para el 2033. Se espera que en los siguientes años, China y países africanos tendrán crecimiento de la producción; la Unión Europea considerada la segunda región productora de leche, tendrá una disminución significativa debido principalmente al efecto de las políticas ambientales y la expansión de sistemas alternativos ya sea orgánicos o basados en pasturas, que en conjunto provocarán una disminución en el número de vacas, por ende, provocarán un crecimiento lento en la producción. En Oceanía, se espera que la producción continúe con un crecimiento moderado, orientados principalmente a las políticas de producción sostenible, la expansión de la producción orgánica y de los sistemas de producción basados en pasturas (OECD/FAO, 2024).

La Comisión Europea (2024) menciona que el rendimiento de leche en la Unión Europea fue de 7,611 kg por cabeza en el 2022 y en 2023 se tenían 19,447,000 cabezas de ganado. Sin embargo, en el período de 2002 a 2005 hubo grandes descensos en la producción que se recuperaron hasta después el año 2009 (Bórawski et al., 2020). Pero una vez que se dio la anulación de las cuotas de producción de leche en 2015, se causó una inestabilidad en los precios europeos, por el aumento de la producción y a la presión competitiva de los mercados externos; logrando un efecto positivo en las importaciones y el aumento persistente de la oferta de leche en varios miembros de la Unión Europea (Bórawski et al., 2020; Stoychev y Ivanov., 2021). La Unión Europea es el principal exportador de quesos, se espera que la tendencia se mantenga por los próximos años (OECD/FAO, 2024).

La producción de Nueva Zelanda del 2022 a 2023 fue de 20.7 mil millones de litros, con un incremento del 0.3% con respecto al 2021-2022. Nueva Zelanda en 2022– 2023 contó con 4.67 mil millones de cabezas de ganado, 3.46% menos con respecto al 2021-2022 (LIC, 2023). Nueva Zelanda fue el principal exportador de mantequilla y leche entera en polvo (OECD/FAO, 2024).

En Estados Unidos la producción de diciembre del 2023 fue de 18.1 millones de libras un 0.1% menos que en diciembre del 2022, con 8.90 millones de cabezas de ganado, con respecto al 2022 obtuvo 17,000 cabezas menos (USDA, 2024b). Estados Unidos seguirá siendo de los principales exportadores de productos lácteos procesados y se proyecta que representará casi el 70% de las exportaciones totales. En el 2021, Estados Unidos fue el principal exportador de leche desnatada en polvo (OECD/FAO, 2024).

Un estudio 2007 a 2018 evaluó el rendimiento comparativo de la industria láctea entre Unión Europea, Estados Unidos, Nueva Zelanda y Bulgaria. Demostró que Nueva Zelanda tiene el índice más alto de competitividad; tuvo los valores más altos de rendimiento del mercado, debido a mayores exportaciones en relación con la producción local de leche. Su producción per cápita supera la producción de los Estados Unidos y la Unión Europea (Stoychev y Ivanov, 2021). Por el contrario, China seguirá siendo el mayor importador mundial de productos lácteos, incluidos el queso, la mantequilla, la leche desnatada en polvo y la leche entera en polvo. Se espera que los volúmenes que importe sean menores, en respuesta a la acumulación en existencias (OECD/FAO, 2024). En 2008, China se enfrentó con problemas de leche adulterada, generando problemas de confianza en sus compradores, dando como resultado la disminución en la competitividad. Para que sea nuevamente competitivo, las empresas debían reestructurar sus sistemas de suministros de leche, garantizando la calidad y seguridad de los productos lácteos mediante la integración de cadenas de suministro lácteo, así como, la participación del gobierno en temas de transparencia e integración de normas de seguridad alimentaria. Por cada 1% en el aumento de la calidad de suministro, la ventaja de competitiva en la misma

cadena registró un aumento de 0.91% (Ding et al., 2019). Por ejemplo, en México, este mismo cambio de 1% de aumento en el stock de la oferta de leche, equivaldría a un incremento de 0.0014% del PIB, equivalente a 320 millones de pesos. Guo y Fu (2023) mencionaron que la industria láctea de China ha crecido gracias a la participación del consumidor, lo que provocó que aumentará de 8,274 millones de toneladas en 2000 a 34.4 millones de toneladas en 2020, y se incrementó la leche *per cápita* de 6.6 kg en 2000 a 24.4 kg en 2020.

En 1901 Rusia ocupó el segundo lugar en el mundo en exportación de mantequilla. Durante muchas décadas, la mantequilla en Rusia ha sido uno de los indicadores de riqueza y prosperidad (Novokshanova et al., 2023). La “Dairy Intelligence Agency” (2021) mencionó que la escasez de la leche cruda en el 2020 en Rusia fue de 4.2 millones de toneladas y el excedente de productos lácteos fue de 254.7 mil toneladas, sospechosamente por la introducción de productos falsificados, materias primas importadas y productos importados re-ensados. El consumo de leche *per cápita* en 2020 fue de 170,4 kg al año y la OECD/ FAO (2024) prevé que Rusia seguirá siendo un importador neto de productos lácteos.

De acuerdo con la USDA (2024a), México es el principal destino de las exportaciones de productos provenientes de Estados Unidos, con un valor de \$USD 2.32 billones de dólares en 2023. De 2014 a 2023 las exportaciones de lácteos de Estados Unidos a México crecieron 59%, esto fue por los acuerdos de T-MEC que, al ser remplazado por el TLCAN, aumentó significativamente las exportaciones de los lácteos, siendo poco menos de \$ 1,000 millones de libras (\$ 1,308 millones de dólares estadounidense) en 2024 a más de 1,600 millones de libras (\$21,080 millones de dólares estadounidense) (DIA, 2024).

De acuerdo con la FAO (2024a) la producción de leche a pequeña escala llegó a generar y a su vez mantener entre 4 y 17 empleos por cada 100 litros de leche producida en el establo, desde la recolección, la elaboración de subproductos y la comercialización. La producción en la India se basa en pequeños hogares asociados a cooperativas (OECD/FAO, 2024). Las cooperativas se distinguen por

partir de una organización horizontal de productores, que se integran verticalmente para negociar o industrializar su producción y conectar con el mercado (FAO, 2012). La cooperativa “Karnataka milk Federation” por ejemplo, incluye actividades de recolección de leche *In situ*, control de los estándares de calidad y la organización de su transporte y venta. Además de los ingresos por la venta de leche, los miembros de las cooperativas suelen recibir servicios técnicos o subsidios de insumos a través de la cooperativa (Dohmworth y Liu, 2020). En el 2022 (FAOSTAT, 2024) el inventario lechero de la India fue 11.77 veces más grande que el de Nueva Zelanda y 5.93 veces más el de Estados Unidos. Se espera, por lo tanto, que el crecimiento provenga de un mayor número de vacas y búfalas lecheras (OECD/FAO, 2024). Christie (2020) en su investigación mencionó que las cooperativas en la India son de trascendencia para reducir el hambre y la pobreza, si se establecen sistemas sólidos de seguimiento e implementación mediante instituciones que fomente el fortalecimiento de las cooperativas con el fin salvar la economía rural y asegurando a los agricultores pequeños y marginales. En el periodo de 2020-2021, el gobierno de la India introdujo el programa “Apoyo a las cooperativas lecheras y a las organizaciones de productores agrícolas” (SDCFPO) con un componente: “*Subvención de intereses en préstamos de capital de trabajo*” con un desembolso de \$203 millones de rupias (\$2,414,670.79 USD) para ayudar a las cooperativas lecheras que enfrentaron dificultades debido a las restricciones relacionadas con la

pandemia de COVID-19. El programa se amplió con un desembolso de \$500 millones de rupias (\$5,980,000 USD) para el período del año fiscal 2021-22 al año fiscal 2025-2026 (NDDB, 2023). La producción de leche es tan importante que forma parte de su día a día de los hogares rurales; los pequeños productores lecheros consideran la producción de leche como una fuente de ingresos estable en comparación con los ingresos agrícolas de los cultivos estacionales; favoreciendo el aumento de ingresos y disminuyendo el ciclo de deudas agrícolas (Christie 2020). Las cooperativas adquirieron un promedio de 58,900,000 kg de leche por día y comercializaron un promedio de 42,700,000 litros por día en el periodo 2022 a 2023. El 2022, fue complicado para el sector lechero Indú a causa

de las condiciones climáticas desfavorables, como olas de calor intensas y lluvias irregulares, sobre todo la incidencia de la enfermedad de la piel nodular en el ganado. No obstante, la industria láctea mostró resiliencia y obtuvieron una tasa de crecimiento constante en la producción de leche en comparación a los años anteriores. La producción de leche en la India continuó aumentando cerca del 6% anual, mientras que la disponibilidad per cápita registró un crecimiento de más del 4.5% en los últimos cinco años (NDDB, 2023).

Pakistán ocupó el cuarto lugar en producción de leche, casi el 97% de la leche consumida está en forma fresca, mientras que el 3% restante es procesada (TDAP, 2022). La producción de leche en Pakistán durante los últimos 10 años se ha mantenido alrededor de 50 millones de toneladas métricas (Mt). Sin embargo, se documenta un déficit de 4,570 millones de litros al año debido a la demanda interna (Usman, 2023). Las zonas con mayor producción son Punjab y Sindh, seguidas por KPK y Baluchistán. Se espera que la producción en Punjab representa el 63%, en Sindh el 23%, en KPK el 12% y en Baluchistán el 2%, respectivamente, de la producción total de leche en Pakistán (TDAP, 2022). La productividad en Pakistán se ha visto afectada por la falta de servicios de extensión veterinaria (nutrición, cría, salud), acceso limitado a vacunas (Zia y Mahmood, 2011) con grandes pérdidas económicas. El valor de la producción en 2022 fue de \$12,439,797 mil dólares.

Por otro lado, se espera un fuerte crecimiento de la producción en África debido a rebaños más grandes, donde el pastoreo adicional se produce en la misma pradera. Se proyecta que aproximadamente un tercio de la población mundial de animales lecheros estará en África y representará alrededor del 6% de la producción mundial de leche (OECD/FAO, 2024). La rentabilidad de los sistemas de producción lechera basados en pasturas de Sudáfrica está sometida a presión constante debido a los costos cada vez mayores de insumos como fertilizantes, electricidad, alimento, mano de obra y agroquímicos (Galloway et al., 2024). Para aumentar de manera sostenible los ingresos netos de la granja, los productores lecheros deben asegurarse de que los recursos se utilicen de manera óptima y

al mismo tiempo mejorar el impacto ambiental del sistema agrícola. Por lo tanto, es esencial considerar el vínculo entre la viabilidad económica y la conciencia ambiental en los sistemas de producción lechera basados en pasturas gestionados intensivamente, ya que ambos desempeñan un papel fundamental para asegurar la producción lechera continua para abordar las necesidades mundiales como locales. Vroegindewey et al. (2021) en su “análisis de un mercado lácteo urbano en África Occidental” destaca las empresas que compran leche fresca pagan un precio más alto por el insumo, causando mayores costos de transacción y dificultades en producción y distribución. La diferencia es que estas empresas es que distinguen de sus competidores por la creación de nuevos productos, mejoran la calidad, lo etiquetan en sus empaques; pero las empresas que trabajan con leche son propensas a provechar cada una de esta diferenciación.

OECD/FAO (2024) mencionan que hay más del 10% de las vacas lecheras se encuentran en sistemas orgánicos; ubicados en Austria, Dinamarca, Grecia, Letonia y Suecia. Durante 2014 y 2020, Alemania con un 74% y Francia con 115% aumentaron su producción orgánica (Vinci, 2024). Un sistema orgánico, en su conceptualización en la década de los años 90's se definió como: *“un sistema de gestión de producción ecológica que promueve y mejora la biodiversidad, los ciclos y la actividad biológicos del suelo”*. Es un sistema que comienza a considerar los posibles impactos ambientales y sociales eliminando el uso de insumos sintéticos. En 2002, el Programa Orgánico Nacional definió la agricultura orgánica: *“La producción orgánica es un sistema de producción que responde a condiciones específicas del lugar integrando prácticas culturales, biológicas y mecánicas que fomentan el ciclo de los recursos, promueven el equilibrio ecológico y conservan la diversidad biológica”* (USDA/ATTRA, 2012).

Los sistemas de producción orgánicos no son tan románticos como su nombre lo sugiere. Un sistema orgánico con rumiantes, por ejemplo, se caracteriza por acciones donde efectivamente se prohíbe el confinamiento total continuo, pero durante la temporada de pastoreo, los animales deben obtener como mínimo el

30% de su consumo de materia seca mediante el pastoreo de pasturas o pastizales orgánicos certificados y no el total de su vida como se pudiera imaginar; deben pastar al menos 120 días cada año y no es necesario que sea de manera continua. (USDA/ATTRA, 2012). Los sistemas orgánicos suelen tener otras series de retos, mismos que si no son atendidos, la producción y los ingresos pueden verse afectados, tal es el caso de la ganancia diaria de peso, el consumo de minerales, posibles parasitosis, externas e internas, entre otros (Hafla et al., 2013). Para el tratamiento de enfermedades se opta por sustancias naturales permitidas por el *Instituto de Revisión de Materiales Orgánicos y la Lista Nacional de Sustancias Permitidas y Prohibidas*, pero en caso de que veterinario a cargo no vea una respuesta favorable se opta por los tratamientos convencionales para evitar dolor o sufrimiento (USDA/ATTRA, 2012).

Los costos de producción en estos sistemas son mayores y su rendimiento suele ser más bajo que en los sistemas de producción convencionales. Según Vinci (2024) los rendimientos de las vacas en promedio fueron de 18% más bajos que en las granjas orgánicas, aunque esto se llega a compensar con una prima en los precios para los productores. Los precios aumentaron un 27% en el 2020 y en gastos veterinarios por vaca fueron de 20% más bajos. Las vaquillas criadas en estos sistemas orgánicos tienen tasas de crecimiento bajas en comparación con los sistemas no orgánicos en climas templados (Hadfield et al., 2021). Los productores de Unión Europea mencionaron que los beneficios económicos al pastoreo pueden llegar a ser la fuente de alimento más barato (Grodkowski et al., 2023).

En las próximas décadas a nivel mundial, alrededor del 30% de la leche se procesará para obtener productos como mantequilla, queso, leche desnatada en polvo, leche entera en polvo o suero en polvo. Con la demanda directa de la mantequilla y el queso representan una gran parte del consumo de sólidos lácteos en Europa y América del Norte. En 2015 el precio de la mantequilla aumento más en comparación con leche en polvo descremada. Esto sucedió por la demanda de grasa láctea que por los sólidos (OECD/FAO, 2024). Se debe a

que la grasa de la leche es un componente muy variable. Se presentan diversos factores que influyen en la composición de la grasa como es la raza, la etapa de lactancia, la salud del animal, el tipo de energía, carbohidratos y el consumo de grasa en la dieta, inclusive la hora del día; lo que provoque riesgos y oportunidades que el productor intente adaptar su producto a la demanda del consumidor, favoreciendo los ingresos del establo (Harvatine et al., 2022). Por ejemplo, los sistemas de pago por la leche van cambiando, dependiendo de la región como en Estado Unidos se basa principalmente en los componentes de la leche, incentivando principalmente la producción de grasa (Daley et al., 2022); aun así, se espera la posibilidad de que el precio de mantequilla y leche descremada en polvo aumente de forma gradual, debido la caída que ocurrió en el año 2023 (OECD/FAO, 2024).

II. II. PANORAMA DE LA LECHE EN LATINOAMÉRICA

El modelo principal en que se organiza Latino América al igual que el resto del mundo, es en sistemas tipo “familiar” una explotación administrada por el productor y la propia mano de obra familiar; los pequeños productores de América Latina se organizan por sistemas de “doble propósito”; se identifica por ser una explotación pequeña, sin un aporte tecnológico especializado, mediante la integración de razas no definidas, con el fin de brindar leche y carne, con una integración débil a los mercados formales (FEPALE, 2011).

De igual manera las cooperativas han sido de trascendencia para América Latina. Las cooperativas de producción contemporáneas se remontan en los siglos XIX y XX con la llegada de extranjeros asiáticos y europeos, con el propósito de la integración de sus propias formas de organización social y económica mientras permanecían separadas de las poblaciones y sistemas de gobierno locales (Vásquez-León, 2017). El principal propósito de las cooperativas era el desarrollo de una “buena gobernanza”; se caracterizaban por ser organizaciones dinámicas con una base comunitaria, mediante acciones colectivas, con el fin de obtener acceso a variedad de activos, proporcionando ventajas económicas, capital social, toma de decisiones de manera democrática y transparente, esto ha sido de importancia a Latino América para aquellos grupos marginados y socialmente excluidos, permitiéndoles ser escuchados, con el fin de que sus productos lleguen a ser competentes en el mercado. (Vásquez-León, 2017)

En el 2017 el consumo de leche iba de los 200 a menos de 50 litros de equivalente-leche por persona y por año, esta disparidad se debió al estado socioeconómico de la población. No todos los países contaron con buenas estadísticas de producción de leche (FEPALE, 2019). El aporte de la cadena láctea al PIB de los distintos países es muy significativo, con valores entre el 15% y 25% en el valor agregado agropecuario y entre el 1% y 3% en el valor agregado global; es lo que distingue la cadena de láctea a otras, el valor agregado

dependerá entre la finca y el consumo final por lo que tiende ser muy variable (FEPALE, 2024a).

Campos y Díaz (2024) mencionaron que Centro América puede llegar a tener la capacidad de producir leche a la preferencia del consumidor, pero hay diversos factores que la limitan, como el mercado informal que asciende a 55% de la producción en la región, los productos son identificados con bajos estándares de calidad destinados al mercado local y con nula o poca vigilancia de las autoridades.

Las cooperativas en Argentina de 2023-2024 conformaron un tercio de la producción total de leche, donde el 5% participó en la industrialización, esta es inferior en comparación con 1994 donde participaba con 35% de leche (OCLA, 2024). En el 2022 obtuvo 11,557,000 Mt, pese a diversos factores que hicieron que aumentara los costos de los insumos, logró mantener la producción con 0.04% respecto al 2021 (Yankelevich, 2023). Lazzarini et al. (2019), mencionan que los sistemas sin pastoreo tienen mayor producción de leche al igual que mayores costos de alimentación en comparación de los que pastorean. En las zonas templadas de América Lantina se han empleado sistemas basados en pastizales; donde más del 10% de la materia seca que consume el ganado se produce en la misma tierra y el promedio de cabezas por hectáreas es inferior a 10% (Seré y Steinfeld, 1995). Sin embargo, en Argentina ha optado por sistemas sin pastoreo con el propósito de mayor productividad de leche por vaca, mejor confort y menor uso de las tierras; las características de estos corrales es que son secos, donde las vaca se alojaron en lotes abiertos y en menor medida establos libres y corrales de “compost”, siendo el 1% del total de los establos en Argentina (Lazzarini et al., 2019).

Chile en el año 2023 contaba con 500,000 vacas lecheras, alcanzando una producción de 2,160 millones de litros en el año. Las regiones de Los Lagos y Los Ríos albergan la mayoría de las instalaciones de procesamiento y granjas lecheras y en el año 2024, los ingresos de leche se esperan aumenten 2% (Gonzalez, 2024). Moreira y Bravo-Ureta (2016) mencionaron un factor

importante del crecimiento de las explotaciones lecheras en la búsqueda de mayores ingresos en lugar de menores costos de producción, donde esperan que siga siendo competitivo gracias a los recursos naturales de Chile, la estabilidad política y la rápida infraestructura física.

Respecto a Brasil en el 2020 su producción nacional de leche fue de 35,4 mil millones de litros, obteniendo un aumento del 1.5% con respecto al 2019; en el mismo 2020 contó con 218,2 millones (IBGE, 2021). En su estudio de Martinelli et al. (2022), mencionaron que aquellos productores en tiene una organización horizontal (cooperativas, asociaciones de productores) tienen mayor capacidad competitiva en producción, permitiendo adaptarse a los cambios institucionales y al mercado. Pero hubo su excepción con determinada la región donde este modo de organización no influyó positivamente en la competitividad, esto pudo haber ocurrido por una mala gestión de asociaciones y cooperativa y falta de incentivos para con los productores.

Colombia en el 2023 registró una producción de 7,097 millones de litros, 724,000,000 menos que en el 2021 (FEDEGAN, 2024). De igual manera Colombia ha sido influenciada por la administración de las cooperativas, como el ejemplo de la cooperativa “Coocampo” en Boyacá, creada en el 2013, mismo año que atravesaba por un paro agrario, provocando que no sea recolectada la leche y si se realizaba la recolecta era muy mal pagada (Coocampo, 2024). Sims (2021) mencionó que la integración de esta cooperativa permitió que variedad activos, resiliencia ante problemas, transformó la sostenibilidad de los pequeños productores, seguridad alimentaria, adopción de nuevos aprendizajes agrícolas, trabajo colectivo, alivio de pobreza, equidad de género.

Fariña et al. (2024), compararon los principales indicadores de productividad, ambiental y socioeconómico de 9 países de América Latina y el Caribe y fueron clasificados en tres grupos por diferir en dimensiones de la sostenibilidad, el primer grupo fue Uruguay, Argentina, Costa Rica (C), el otro fue integrado Honduras, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Ecuador (A), mostrando similitudes entre países y Chile (B) fue el tercer grupo ya que mostró indicadores únicos.

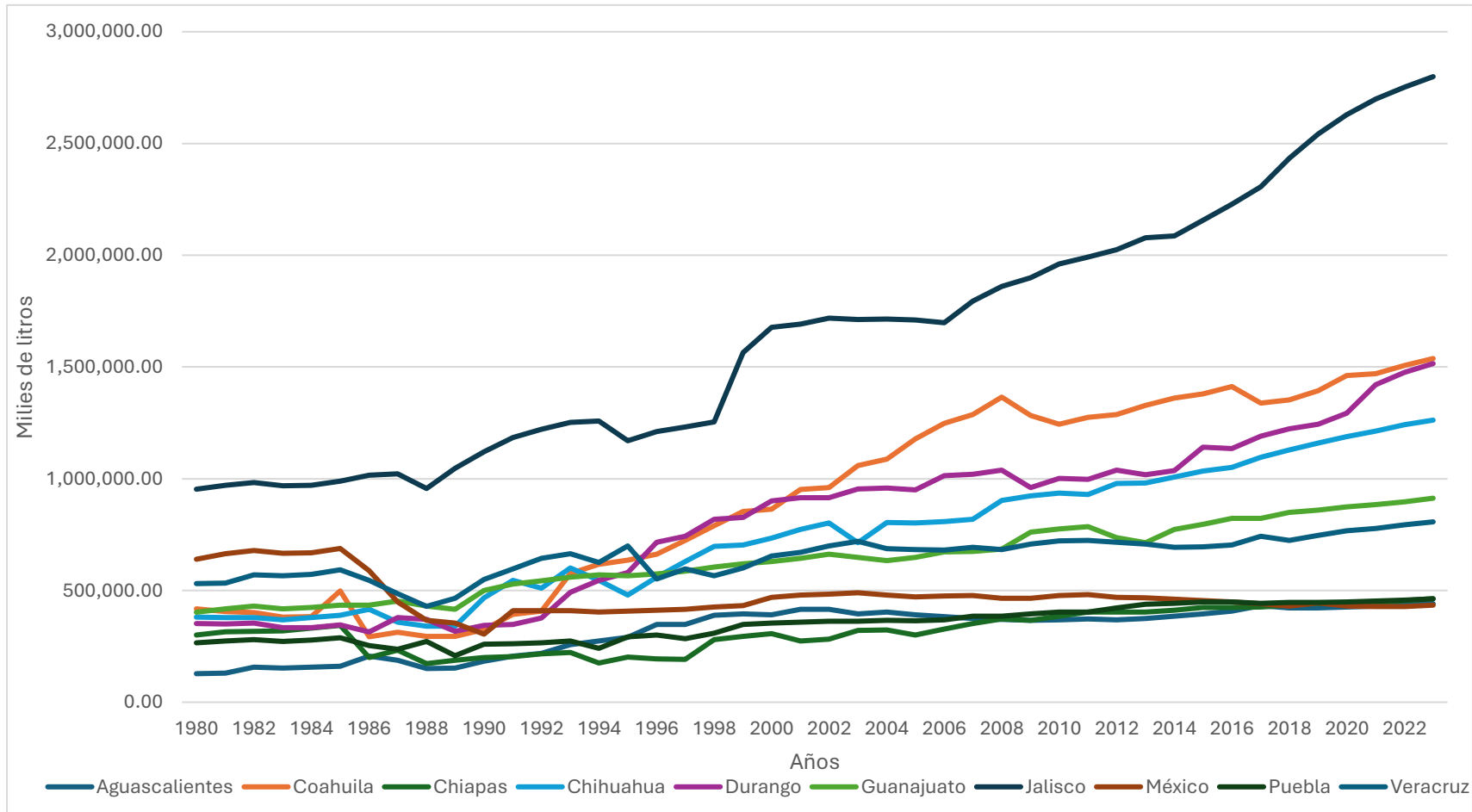
Entonces el grupo B y C su sistema son más intensivos lo que resulto mejor productividad, rentabilidad y eficiencia, aunque los países del grupo A mostraron potencial para mejorar la productividad. En lo que refiere a los efectos al ambiente el grupo A mostró menor impacto por unidad de producto, pero en términos de manejo de nutrientes y emisiones de gases de efecto invernadero influenciado por el pastoreo. Los indicadores sociales mostraron que el grupo B y C fueron los más altos con respecto a los ingresos familiares, de los trabajadores y eficiencia laboral, así mismo los grupos B y C mostraron un mayor porcentaje de vacas en ordeño, un menor porcentaje de área de reemplazo y un porcentaje ligeramente mayor de área de pastoreo que el grupo A.

II. III. PANORAMA NACIONAL DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE EN MÉXICO

En México los principales diez estados productores de leche de bovino en el año 2023 fueron, Jalisco, Coahuila, Durango, Chihuahua, Guanajuato, Veracruz, Chiapas, Puebla, Aguascalientes y México. La producción nacional fue de 13,332,738.061 miles de litros de leche (5.4% menos que lo estimado por SIAP para el año), con un precio promedio de \$8.46 MXN y un valor de la producción de \$112,820,105.27 miles de pesos. El número de cabezas de ganado de leche en el mismo año fue de 2,713,534. En el año 2022 México destinó 29,806,706 hectáreas al uso agrícola y 26,984,247 personas conformaron la mano de obra en las actividades agropecuarias donde el 84.8% correspondió a hombres y 15.2%, a mujeres (INEGI, 2023). De acuerdo con SIAP (2024), 751,437 personas se dedican a la ganadería y poco menos del 45% percibe hasta un salario mínimo. El consumo *per cápita* en 2023 fue de 133.9 Litros y el sector lechero de bovinos aportó el 54.6% de la participación nacional pecuaria.

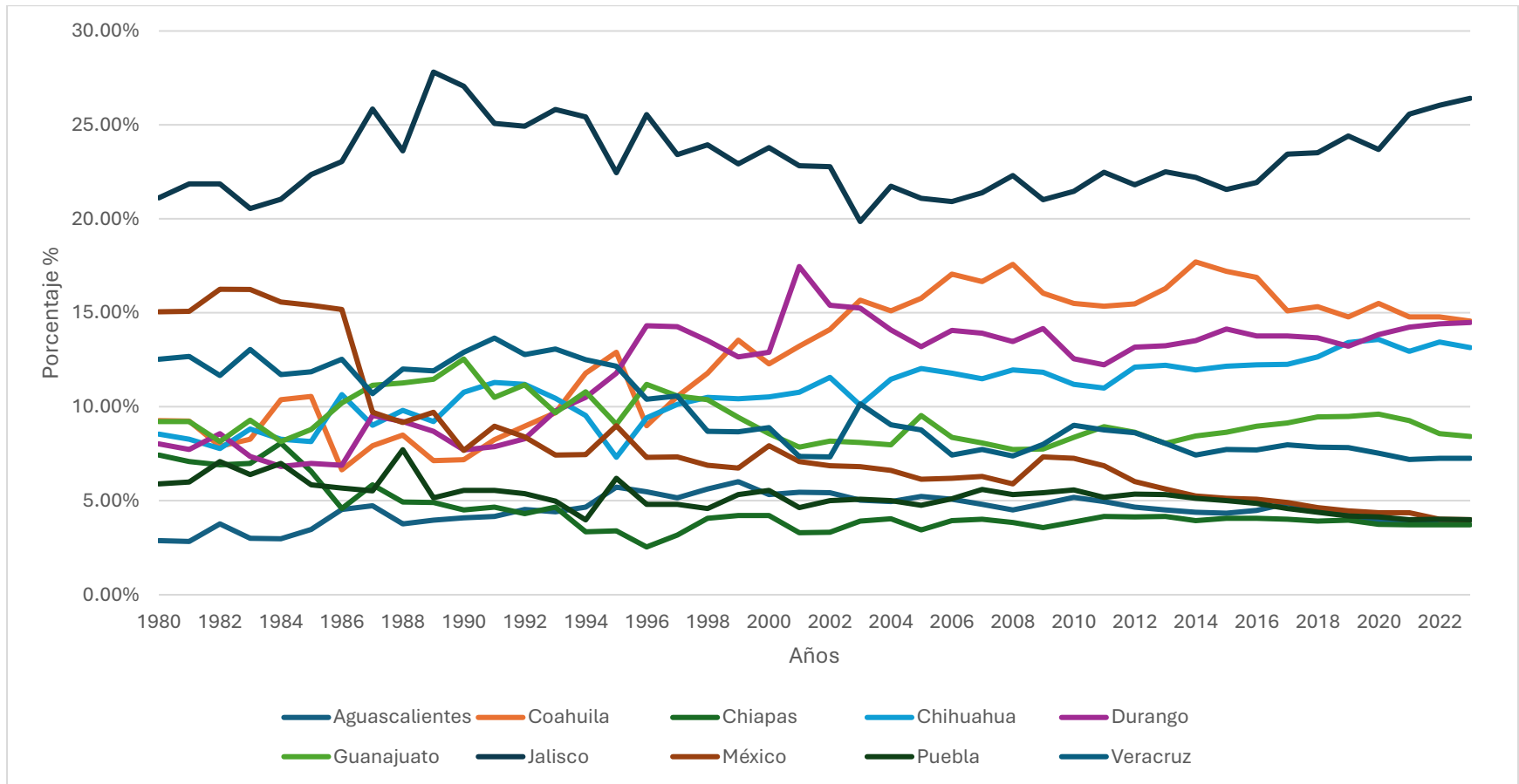
En la Figura 1 se muestran los cambios en el volumen de producción de leche, en el que el estado de Jalisco es más evidente en su crecimiento, el cual se ha sostenido a lo largo del periodo y ha sido acelerado, aunque en la mayoría de los estados se muestra un crecimiento constante, México a partir del año 1985 tuvo un descenso en la producción de leche para posteriormente de 1991 a 2023 adoptar una producción constante. Los estados de Puebla, Aguascalientes y Chiapas, si bien tuvo años con una mayor productividad en miles de litros se observó una constante en los 44 años. Los estados de Veracruz y Guanajuato su producción parece ser similar, pero obtuvo una diferencia de 1.81% en el que Veracruz destacó. Coahuila, Chihuahua, Durango su producción cada año va en aumento.

Figura 1. Muestra la evolución de la producción de leche en México de 1980 a 2023 de los 10 principales estados productores.



Fuente: SIACON, 2024

Figura 2. Cambio porcentual del valor producción de leche de bovino, en los principales estados de la República Mexicana (1980-2023).



Fuente: SIACON, 2024

La Figura 2 muestra el cambio en porcentaje en el valor de la producción de los primeros diez estados productores de leche de bovino en la República de 1980 a 2023; donde Jalisco se mantuvo en primer lugar con mayor participación. Durante seis años México tenía el segundo con una participación de 15.05%, pero los siguientes años fue disminuyendo su participación, donde en el año 2023 solo obtuvo el 3.99%; de igual manera Veracruz tuvo un descenso en el año 2023 fue de 7.26%. Coahuila, Durango, Chihuahua tuvieron un aumento gradual, con diversas fluctuaciones. Guanajuato en transcurso del periodo su participación fue de 9.28% en promedio. Mientras que Puebla, Aguascalientes y Chiapas son los estados que tuvieron una menor participación en comparación con los otros estados durante los 44 años evaluados; sin embargo, su participación más alta de Guanajuato fue en 1984 con 8.16%, de Puebla en 1988 donde tuvo 7.72% y Aguascalientes hasta 1999 con 6.02%.

La tasa de crecimiento media anual para en el estado de México fue de 16%, Chiapas, Puebla, Veracruz fue de 18%, Guanajuato tuvo 19%, Aguascalientes y Jalisco fue del 20% en Coahuila, Chihuahua, Durango fue 21%.

El país se divide por regiones climáticas; la Región Árida y Semiárida la constituyen, los estados de Baja California, Baja California Sur, Coahuila, Chihuahua, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas y Zacatecas; la Región Templada los estado de Aguascalientes, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Puebla, Querétaro, Tlaxcala y Distrito Federal (hoy Ciudad de México); y los Tropicales los estados de Campeche, Colima, Chiapas, Nayarit, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán (SAGARPA, 1997). Donde la producción nacional se distribuye de la siguiente manera: región norte 32%, región occidental 29%, centro-oriente 23%, trópico 11% y 5% distribuido entre el resto de los estados (Lara, 2024). Las razas lecheras que destacan en la producción de leche son Holstein Friesian y Pardo Suiza Americana (SADER, 2015).

Sin importar la región agroclimática, se distinguen tres sistemas de producción lechera en México con características particulares, desde pequeños productores

(Sistema Familiar-traspatio) totalmente basados en pasturas, Sistemas de Doble Propósito, hasta granjas lecheras de Sistemas Intensivos (Ávila Ruiz et al., 2024).

El Sistema Intensivo, se caracteriza su alto nivel productivo, genético, tecnológico en comparación con los otros dos sistemas, dado que habrá disparidades de establo a establo en cuanto el nivel de tecnificación de estos sistemas; la raza más empleada es Holstein (Avilés-Ruiz et al., 2024; Toledo-Alvarado et al., 2014), su principal mercado es la industria de leche fluida (Lara, 2024). Los altos volúmenes de producción de leche reducen los costos de producción y logrando ser competitivo en mercados nacionales e internacionales (Avilés-Ruiz et al., 2024). Este tipo de sistema se encuentra en las regiones semiáridas o desérticas (Vera-Ávila et al., 2009)

Los Sistemas Doble Propósito, se localizan en mayormente en las regiones del trópico del país (Vera-Ávila et al., 2009; REDGATRO, 2018), se caracterizan por cruzamiento *Bos Taurus* con *Bos Indicus* con el fin de obtener carne y leche (REDGATRO, 2018). El manejo de este tipo de sistema va de acuerdo con el valor de precio de la leche y precio del becerro al destete que se presente en el momento, si el precio de la leche bajo se permite que el becerro este con la vaca para que este adquiere mayor ganancia de peso de lo contrario se retira el becerro (Martínez-González et al., 2017). La infraestructura es mínima, bajo nivel de tecnología, el ordeño es estacional de manera manual y con el apoyo del becerro al pie (Martínez-González et al., 2017). La alimentación se basa primordialmente del pastoreo, en zonas tropicales los pastos son dependientes de las lluvias de temporal, pero hay productores que emplean el riego (REDGATRO, 2018).

En los sistemas familiar, se ubican mayormente en los estados de Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Querétaro (Avilés-Ruiz, 2024), su principal característica de estos sistemas es por el empleo de la mano de obra familiar (Posadas-Domínguez et al. 2014) tienden hacer dos veces al día el ordeño, uno por la mañana y otro por la tarde (Gómez-Miranda et al., 2019). El tamaño del hato suele ser entre 3 a 20 vacas (Celis-Álvarez et al., 2021) o bien de 4 a 11 en lactación (Rogers-Montoya et al., 2024) la cantidad de cabezas de ganado dependerá de la

zona geográfica. La alimentación se basa en praderas, pastos y forrajes a partir de gramíneas como: maíz, avena, trigo, triticale, cebada, centeno, rye grass, pastos nativos, leguminosas como: alfalfa, garbanzo, y en algunos productores emplean nopal, al igual que la alimentación con granos como sorgo, maíz, avena (Vera-Ávila et al., 2009; SADER, 2021). Durante la época de seca hacen uso de ensilaje como una alternativa frente a la escasez de alimento y la limitada provisión de pasturas de riego (Gómez-Miranda et al., 2019). El nivel tecnológico en su mayoría es bajo (Chávez-Pérez et al., 2021).

El valor agregado de la leche tiende a ser muy variable y esto dependerá de los niveles de procesamiento. González-Hernández et al. (2024), reportaron en promedio un total de 33,847.29 litros por año, por establo, equivalente a 92.73 litros por día, insuficiente para generar el número de trabajo que la FAO (2024), considera que se genera cuando en toda la cadena de producción láctea se manejan y comercializan 100 litros de leche. A pesar de lo anterior, este tipo de sistemas de producción de pequeña escala son fundamentales y contribuyen a los medios de vida de los pequeños productores brindándoles seguridad alimentaria, nutrición en los hogares; permitiendo ganancias relativamente rápidas y es una fuente de ingresos efectivo. (FAO, 2024b). Los costos totales de producción rondan el 70% de los ingresos (Rogers-Montoya et al., 2024).

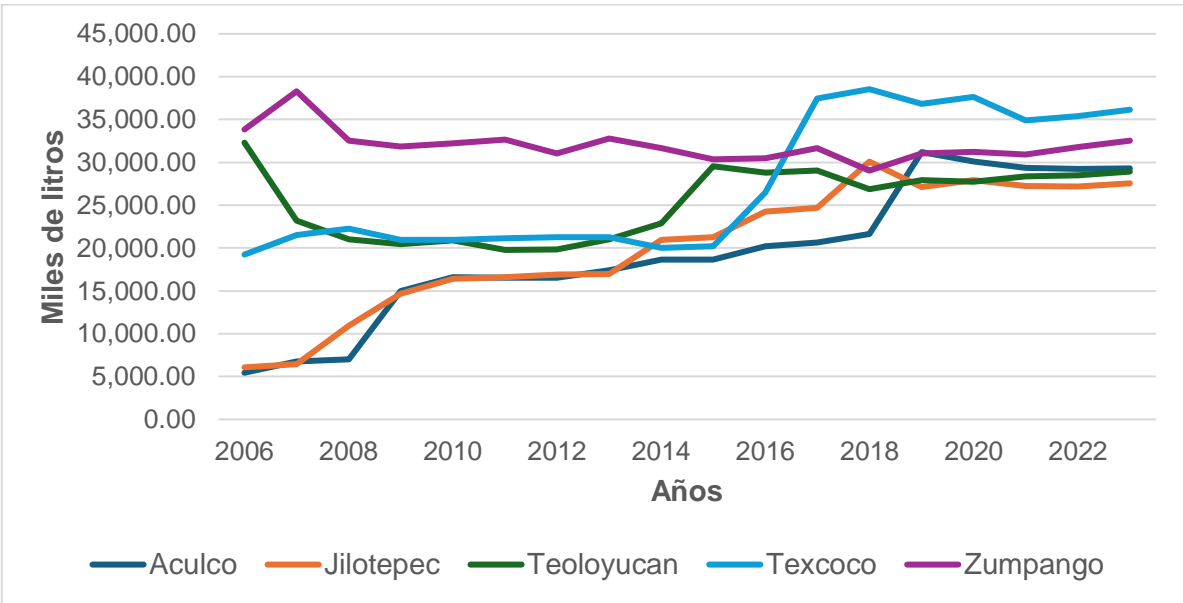
En México se cuenta con el programa Liconsa; dado que es una empresa de participación estatal mayoritaria, industrializa leche de elevada calidad y la distribuye a precio subsidiado en apoyo a la nutrición de millones de mexicanos que en el 2023 distribuyó 737,782,913 litros de leche y fueron 6,106,710 personas en promedio beneficiarias, de las cuales el 57.7% son mujeres y el 47% mayoritariamente de población indígena (LICONSA, 2024).

II. IV. PANORAMA ESTATAL DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE

Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023) reportó que la producción del estado de México del año 2023 fue de 432,769.042 en miles de litros de leche, teniendo con un valor de producción de \$3,593,947.56 miles de pesos mexicanos.

Los principales cinco municipios productores de leche de los 125 municipios presentes en el estado de México fueron: Texcoco, Zumpango, Aculco, Teoloyucan y Jilotepec. Donde Texcoco aporta el 8.33% de la producción y los municipios que tienen una menor participación en la producción de leche de bovino son San Simón de Guerrero y Villa Guerrero con el 0.03% respectivamente (SIAP, 2024).

Figura 3. Evolución de la producción de leche de los principales municipios del Estado de México (2006-2023).

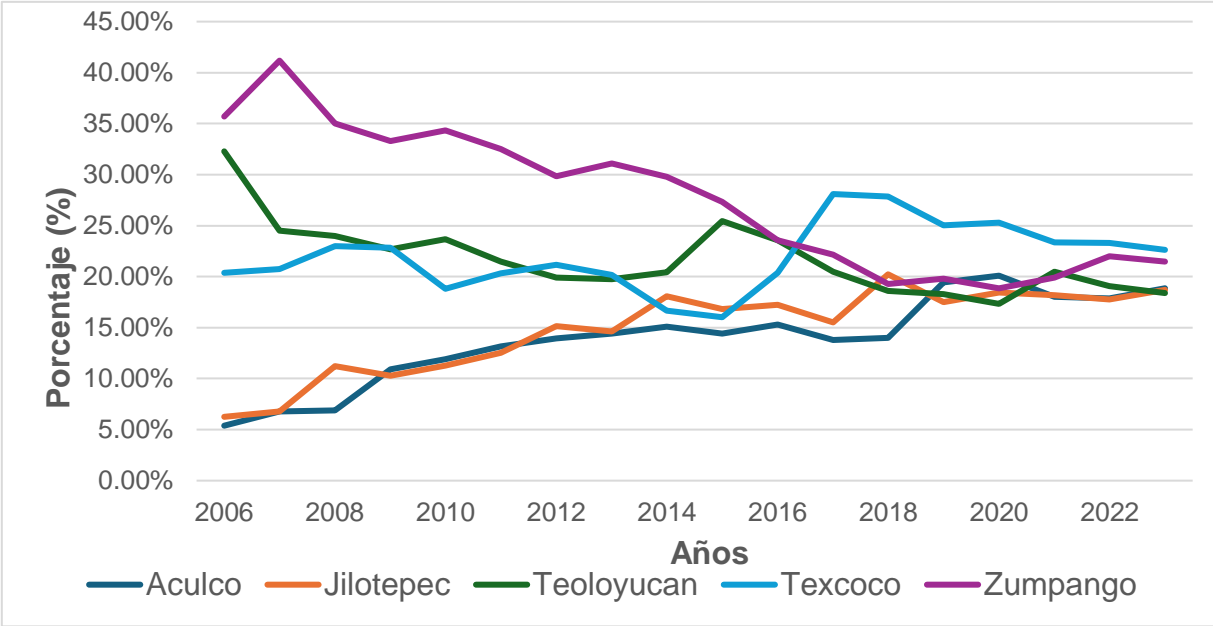


Fuente: SIACON, 2024.

En la figura 3 se observa el cambio en el volumen de producción de leche de los municipios; en el municipio de Zumpango desde el año 2008 se comenzó a ver un descenso en su producción posicionándose como segundo lugar, pero se mantuvo constante, sucedió lo mismo con Teoloyucan ocurrió un descenso en la producción de leche, hasta el año 2015 donde mostró una tendencia en crecimiento hasta el

2017, donde nuevamente su producción fue constante. Por otro lado, en el año 2017 al 2023 Texcoco se ha posicionado en el primer lugar como productor de leche en el estado de México. Mientras que Jilotepec y Aculco han mostrado un crecimiento variable entre sí, pero con una tendencia de crecimiento alcanzando niveles similares en su producción.

Figura 4. Cambio en el valor de la producción de los principales municipios productores de leche en el Estado de México 2006 a 2023.



Fuente: SIACON, 2024.

La Figura 4 muestra el cambio en porcentaje en el valor de la producción de cada municipio de 2006 a 2023; Teoloyucan como Zumpango en comparación con los otros municipios su participación ha disminuido progresivamente, a lo largo de 17 años, mientras que Texcoco se mantenido constante, en el 2017 logró incrementar su participación con 28.10% aunque ha sido el primero con buen desempeño en su productividad hubo una disminución ligera, sin embargo Aculco y Jilotepec su participación fue en aumento gradualmente, alcanzando niveles similares con un promedio de 13.90% y 14.81% respectivamente. No obstante, la tasa de Crecimiento Media Anual en Aculco fue de 16.43% y en Jilotepec fue de 15.35%, mayor en comparación con Texcoco de 8.82%, durante ese mismo tiempo Zumpango obtuvo 4.97% y Teoloyucan 4.64%.

II. V. CARGAS AMBIENTALES

Las categorías de impacto ambiental empleadas en ReCiPe (2016) son: calentamiento global; agotamiento de la capa de ozono; radiación ionizante; formación de ozono en la salud humana, formación de material particulado fino, formación de ozono y ecosistemas terrestres, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, eutrofización marina, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad del agua dulce, ecotoxicidad marina, toxicidad cancerígena para los seres humanos, toxicidad humana no cancerígena, uso del suelo, escasez de recursos minerales, escasez de recursos fósiles, consumo de agua.

El cambio climático es un tema de trascendencia para la humanidad. Puede presentarse por causas naturales o por actividades antropogénicas (INECC, 2018a). Provocando cambios generalizados e intensos en la atmósfera, criosfera, hidrosfera y la biosfera; pero el cambio climático causado por las personas específicamente está provocando fenómenos meteorológicos climáticos extremos en todo el mundo, generando impactos adversos generalizados, pérdidas, daños en las personas y la naturaleza; donde los más afectados son las comunidades vulnerables donde su impacto al cambio climático es menor y las emisiones continuas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) seguirán conduciendo a un aumento del calentamiento global (IPCC, 2023) .

El metano (CH_4), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O) y los halocarbonos son GEI que potencian los efectos de la radiación solar y térmica en las temperaturas superficiales y atmosféricas, se expresan como CO_2 equivalente. Los principales gases de efecto invernadero liberados en la producción animal son: CO_2 , CH_4 y N_2O (Knapp et al., 2014). En la ganadería el CH_4 contribuye con 54% de las emisiones ganaderas, el CO_2 con el 31% y 15% N_2O (FAO, 2023). Con el almacenamiento, el manejo del estiércol o el depositado en pasturas se producen emisiones de GEI como el metano y óxido nitroso pero las emisiones de CH_4 el almacenamiento la descomposición anaerobia emite cantidades significativas, en cambio cuando este es depositado directamente a las parcelas se descompone en condiciones aeróbicas y produce menos CH_4 ; la producción de N_2O requiere de la

producción de nitritos o nitratos en un ambiente anaeróbico, el CO₂ está asociado con el uso de energía, el transporte, el uso del suelo e incendios en parcelas (IPCC, 2019).

La fermentación entérica es el proceso digestivo fisiológico que implica la descomposición microbiana de carbohidratos complejos, principalmente celulosa, en compuestos más simples como ácidos grasos volátiles, CO₂ y CH₄, considerado un subproducto del proceso digestivo (FAO, 2023)

El metano (CH₄) es un contaminante climático de vida corta, siendo su vida útil de unos 12 años en la atmósfera, pero es 28 veces más potente que el dióxido de carbono (CO₂) como gas de efecto invernadero (IPCC, 2015), dado que un 1 kg de CH₄ genera 2.1 +/- 0.7 kg de CO₂ con un rendimiento del 75% (Forster y Storelmo, 2023). Impide la salida de los rayos del sol 20 veces más en comparación con el CO₂ (Gillman, 2015). De las actividades humanas los tres sectores generadores de metano son: combustibles fósiles 35%, residuos 20% y la agricultura 40% el cual es procedentes las emisiones de metano del estiércol y la fermentación entérica comprenden alrededor del 32% de las emisiones y el restante del cultivo de arroz (CCAC y UNEP, 2021). Desde la producción del pienso para alimentar al ganado hasta la llegada de los alimentos a las tiendas se generaron 6.2 gigatoneladas equivalente de CO₂ (FAO, 2023). Una vaca completamente desarrollada puede emitir hasta 500 litros de metano al día (Gillman, 2015). Pero la cantidad de metano producido por un rumiante está relacionada con la cantidad de materia orgánica digerida y la composición de la dieta: cuanto más alimento se consume o mayor es el contenido de fibra de la dieta, más metano se produce por día (Garnsworthy et al., 2019). A nivel mundial, los puntos críticos de emisiones de los sistemas ganaderos han sido en el sur de Asia, Europa y América del Norte y del Sur, donde se encuentra una concentración significativa de ganado rumiante, y las emisiones están dominadas por el CH₄ de la fermentación entérica. Al estudiar la economía por región se observó que el 42% de las emisiones ganaderas se originaron en las economías de ingresos medios altos, el 29% en las economías de ingresos medios bajos, el 21% en las economías de altos ingresos y el 7% en las economías de bajos

ingresos (FAO, 2023). En México en el año 2015, las emisiones de fermentación entérica de bovinos de leche fueron de 7,007.54 Gg de CO₂ eq., esa cantidad correspondió a 13.11% del total de emisiones de CH₄ por fermentación entérica ese año y a un incremento de 68.99% en las emisiones de GEI entre 1990 y 2015 (SEMARNAT, 2018).

El tomar acciones para reducir el metano disponible podrían disminuir en 45% para el año 2030, lo que evitaría 0.3°C de calentamiento global para el año 2040 y evitaría 26 millones de toneladas de pérdidas de cultivos a nivel mundial (CCAC, 2022). Las políticas e iniciativas ambientales, como “Pathways to Dairy Net Zero” lanzadas en septiembre de 2021 por el sector lácteo podrían verse afectadas a nivel de la producción láctea pero su fin es frenar las emisiones; la creciente tendencia hacia prácticas sostenibles, como las relacionadas con el acceso al agua y la gestión del estiércol son áreas asociadas a cambios de política, pero las emisiones de GEI dependerá de eficiencia de los países con grandes poblaciones de ganado (OECD/FAO 2024).

El consumo de agua ha sido un tema de inquietud. Según Wisser et al. (2024) realizó una comparación mundial del consumo per cápita de agua por día en bovinos dando como resultado 193 litros por cabeza, proveniente de alimento y del uso indirecto; entonces de los 3,670 km³ de agua extraídos cada año para el riego de cultivos y pastos, solo el 513 km³ o sea el 14% se destina para alimentar el ganado, 40 km³ se destina como agua potable y 13 km³ para agua de servicio; lo que concluye que más 90% de las extracciones de agua para la producción ganadera se atribuyen a usos indirectos, y el resto se emplea directamente.

La producción de leche también está asociada a la calidad del agua, esto por la gran cantidad de nutrientes (eutrofización) que se depositan en ella. Si bien la sobrecarga de nutrientes no es un riesgo en sí misma, es decir, el nitrógeno y el fósforo no son tóxicos para el medio ambiente, pero sobreestimula la producción primaria de microorganismos y especies vegetales en el agua y se manifiestan con elevadas concentraciones de clorofila y proliferaciones de macroalgas, lo que cambia la ecología del sistema causando riesgos para los ecosistemas y la calidad del agua

(Bricker et al., 2008; Biagini y Lazzaroni, 2018). Otra problemática proviene de la alimentación especializada y exceso de nutrientes otorgados para el ganado, dando como resultado altos residuos en las heces que van a aparar en el agua, la degradación y fermentación de la orina generadas por los animales produce gases como amoníaco y sulfuro de hidrógeno (Tan y Yin, 2017).

En Brasil en un sistema semi-intensivo con 128 cabezas de ganado, donde se evaluaron seis actividades: producción de concentrado, producción de sales minerales, producción de pastos, crianza de ganado, ordeño y enfriamiento de leche, producción de ensilaje, transporte; dentro de la categoría de eutrofización, la actividad que más contribuyó al ambiente fue el ordeño y enfriamiento de la leche, representando el 70.4% debido a uso indirecto de energía y aguas residuales, por la limpieza de utensilios, equipos y piso de la ordeña las emisiones de fosfato y fósforo fueron relevantes, seguido de la producción de ensilaje de maíz 12.8% y la producción de pastura 11.1% esto fue por el uso de semillas para el cultivo, fertilizantes nitrogenados, su impacto represento el $2.39 \text{ E-}04 \text{ kg PO}_4\text{-eq}$ por 1 kg leche corregida en grasa y proteína, también el uso de fertilizantes son tema de inquietud dado que por la lixiviación de nitratos llega hasta agua subterráneas (Santos-Carvalho et al., 2022). Asimismo, la eutrofización marina está asociada con el uso de fertilizantes y emisiones de nitrógeno, el limitante para los ecosistemas marinos es el nitrógeno (Henderson et al., 2023). En su estudio Henderson et al. (2023) obtuvo que la producción nacional de los E.E. U.U. causó 0.047 PDF (Fracción de especies que podrían desaparecer) m^2 año por kg de leche corregida en grasa y proteína y la ecotoxicidad del agua dulce mencionó que la producción de alimento para el ganado represento la mitad del impacto dentro de esta categoría, por emplear fertilizantes (atrazina, metolaclor); los pesticidas (ciflutrina) empleados dentro de la granja represento la otra mitad. De igual manera dentro de la categoría de ecotoxicidad marina, la producción de alimento, seguida de la producción de grano para el ganado tuvieron un impacto mayor (Entrena-Barbero et al., 2024).

El uso del suelo, de acuerdo con Santos-Carvalho et al., (2022) las 128 cabezas de ganado que se utilizaron en el estudio contribuyeron con el 0.64 m^2 año de cosecha

por 1kg de leche corregida en grasa y proteína, donde los impactos provenían de actividades como la producción de pastura con un 71.5% y el ensilaje de maíz 26% respectivamente (Santos-Carvalho et al., 2022).

La acidificación terrestre, las actividades que contribuyeron más en esta categoría fue la producción de maíz 34.4% a causa de la producción de granos para el alimento; siguió de la crianza de ganado, para ello se empleó sustituto de leche en la alimentación de terneros representando el 23.2% y la producción de pasturas con el 21.6%, contribuyó con el $1.11E-03\text{kg SO}_2\text{- eq}$, (Santos-Carvalho et al., 2022).

Formación de material particulado fino, Henderson et al. (2023) mencionó que este impacto recayó en la salud humana, debido la producción de alimento para el ganado, a causa del uso de amoníaco proveniente del estiércol y fertilizantes sintéticos, la combustión de los tractores generan compuestos como óxido de nitrógeno y partículas en suspensión de 2.5 micrómetros, todas estas actividades representaron 39%; con un 10% el trasportes de la leche por óxido de nitrógeno y partículas en suspensión de 2.5 micrómetros y las cargas provenientes del establo fueron debido a NH_3 *in situ* y del manejo de estiércol, representó el 31%.

Toxicidad humana no cancerígena, para esta categoría los impactos son causados por emisiones de amoníaco, dióxido de azufre, óxido nitroso y formación de partículas (PM) de 2.5 μm . Estos compuestos se generaron a partir de la producción del alimento para el ganado y el manejo de estiércol. Los óxidos de nitrógeno (NO_x) de las operaciones de los tractores, en el transporte de la leche, entre otras sustancias asociadas con el uso de combustible; obtuvo un valor de 1×10^{-6} Años de Vida Ajustados por Discapacidad o 1μ Años de Vida Ajustados por Discapacidad por kg de leche corregida en grasa y proteína consumida. La toxicidad cancerígena para los seres humanos, los impactos fueron relacionados con la electricidad se atribuyen a procesos indirectos a lo largo del ciclo de vida, son menores en comparación con las enfermedades respiratorias por compuestos inorgánicos y ambas categorías fueron representativas en la producción del alimento (Henderson et al., 2023).

La escasez de recurso fósiles, el proceso que más impactó fue la producción de ensilado de maíz con un 45.7% y la producción de pastura con un 34.3%; esto es debido a los fertilizantes a base de nitrógeno y fosfato, la refrigeración y transporte de la leche aportó el 10% de los impactos (Santos-Carvalho et al., 2022). Entrena-Barbero et al. (2024), comentan que la actividad que contribuyó más, fue la producción de alimento, seguida de la producción de los granos, los cuales fueron de relevancia dentro de esta categoría. Baldini et al. (2018), mencionan para la escasez de recursos minerales y fósiles variaron de 3.83 mg Sb eq (miligramos de antimonio equivalente) por leche corregida en grasa y proteína⁻¹ a 17.99 mg Sb eq. por leche corregida en grasa y proteína⁻¹; también se debe por la producción de alimento y fuera de la granja, representando el 91% al 99% respectivamente; de los tres establos que se analizaron la que contribuyó más en este impacto fue la que consumió alimento comprado, el que no se producía en el mismo establo.

El agotamiento de la capa de ozono, en la década de los años 80's se descubrió que las actividades antropogénicas que producen halocarbonos provocaron la degradación de esta, reconociendo que sin el ozono estratosférico el desarrollo sostenible de los seres vivos no se podría, contribuyendo en la protección de radiación ultravioleta solar, procesos atmosféricos, la variabilidad climática (Józefiak et al., 2023), entre los más importantes. Entrena-Barbero et al. (2024) en su estudio de 50 establos lecheros, demostraron que la fermentación entérica y las emisiones provenientes del campo fueron los que impactaron más en esta categoría, seguido de la producción de alimento para el ganado; de igual forma para la formación de ozono y ecosistemas terrestres la producción de alimento para el ganado, seguido de consumibles para el ganado y granos fueron los conceptos que más contribuyeron a dichas cargas. Para la formación de ozono en la salud humana, Baldini et al. (2018) analizaron tres hatos lecheros donde la formación fotoquímica de ozono varió entre 2.33 y 5.68 g compuesto orgánico volátiles no metánicos por leche corregida en grasa y proteína⁻¹; el alimento que se producía fuera de la granja fue el principal contribuyente dentro de esta categoría y de los principales compuestos para la formación de la fotoquímica de ozono fue los NO₂ con el 63%, seguido de los compuesto orgánico volátiles no metánicos 10%.

Entrena-Barbero et al. (2024), mencionan que, en la categoría de radiación ionizante, las actividades que contribuyeron más en esta categoría fue la energía para hato, alimento para el ganado y la producción de grano; esta categoría desempeñó un impacto inferior sobre la salud humana (Henderson et al., 2023).

II. VI. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Evaluación del ciclo de vida o Análisis del ciclo de Vida (ACV), por sus siglas en inglés LCA, es uno de los marcos metodológicos más empleados para evaluar cómo los productos, procesos y servicios afectan al medio ambiente, otras de sus aportaciones son como herramienta de apoyo para gestión ambiental (Singaravadivelan et al., 2023), aportaciones a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, la selección de los indicadores de desempeño ambiental pertinentes, desarrolladores de técnicas de medición y marketing en los esquemas de etiquetado ambiental (ISO,2006).

El ACV está bajo la estructura de la Norma Internacional ISO 14040 y la ISO 14044 la cual detalla los requisitos para efectuar un ACV; enfocándose en aspectos ambientales e impactos potenciales a lo largo de todo su ciclo de producción desde la materia prima, pasando por proceso de manufacturación, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final, en otras palabras, de “la cuna a la tumba” (ISO, 2006).

Para llevar a cabo un estudio de ACV se deben de realizar cuatro fases, que son definición de objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación de impacto ambiental y, por último, la interpretación (ISO, 2006).

El ACV se puede clasificar según el objetivo principal de estudio, ya sea en un estudio comparativo, como su nombre lo dice, realiza una comparación directa entre dos diferentes sistemas; mientras que en un estudio descriptivo identifica los impactos ambientales de un sistema elegido (Singaravadivelan et al., 2023).

Se comienza realizando la “Definición del objetivo y alcance”, especificar el marco para todo el análisis, el cual abarca el objetivo, el límite del sistema, los

componentes del ciclo de vida y la Unidad Funcional (UF) (Singaravadivelan et al., 2023). Romeiko et al. (2024) seleccionó las principales etapas: el alimento, la fermentación entérica y la gestión del estiércol, con el objetivo de cuantificar los GEI y la liberación de los nutrientes al agua asociadas en cada etapa en la producción lechera confinada los EE. UU.

La UF proporciona una representación cuantitativa de la función principal por el sistema bajo investigación como unidad de referencia (ISO, 2006) en los estudios de ACV emplean el peso (kilogramos LCGP) (Gallo et al. (2024) unidad animal o vegetal, incluso localidades y hasta regiones.

Aunque lo ideal en un ACV debería considerar "desde la cuna hasta la tumba"; pero en los estudios de industria láctea para reducir la complejidad y versatilidad del consumidor final, se puede llegar a restringir los protocolos de evaluación concentrándose únicamente en etapas particulares de la cadena de producción, este tipo de análisis, conocido como "desde la cuna hasta la puerta" (Singaravadivelan et al., 2023).

La segunda fase "Inventario del ciclo de vida" para la integración de los datos cualitativos y cuantitativos que se incluye dentro de los límites del sistema, esto se emplean para cuantificar las entradas y las salidas (ISO,2006). los materiales y la energía se incluyen del lado de las entradas y en la salida son todos aquellos productos, subproductos y todas las descargas a la atmósfera, a la tierra, el agua y como éstas interactúan con el medio ambiente. Para poder hacer esta recopilación de datos se consideran los límites del sistema, donde toda la información debe estar conectada a la unidad funcional (Singaravadivelan et al., 2023). conforme se analiza el sistema se puede identificar nuevos datos o limitantes que necesite un cambio, con el fin que los objetivos se cumplan (ISO, 2006)

Para describir los procesos unitarios de las entradas y salidas que serán modelados se hace uso de un diagrama de flujo de proceso y sus interrelaciones (ISO 14044, 2006). Permitiendo visualizar todas las tareas que deben completarse y los límites

del sistema, pero cada dato debe tener relación con la unidad funcional. (Singaravadivelan et al. 2023).

La evaluación del impacto del ciclo de vida en esta fase mediante el uso de factores de caracterización y permite comparar cuantitativamente los diferentes flujos elementales en términos de sus capacidad para contribuir al indicador de categoría de impacto los resultados del inventario del ciclo de vida se vinculan a categorías de impacto específicas, brindando una expresión relativa de la potencia de cada flujo elemental; estos factores de caracterización aumentarán dependiendo la cantidad de datos en el inventario y los resultados son expresados en una unidad común a todas las contribuciones dentro de la categoría de impacto (Hauschild et al., 2013). En la mayoría de los estudios de ACV de la producción de leche las categorías más analizadas para el sistema de producción de leche han sido calentamiento global, ocupación de suelo agrícola, eutroficación, acidificación terrestre y depleción fósil (Singaravadivelan et al., 2023).

Algunos de los métodos empleados para evaluar el ACV son: TRACI, CML-IA baseline, LC-IMPACT, ReCiPe, ILCD ente otros (SiMaPro, 2025a). Ecoindicator se divide en tres secciones: Producción de materias primas (por ejemplo, poliestireno), procesamiento y fabricación (por ejemplo, moldeo por inyección), transporte del producto (por ejemplo, envío), energía en uso (por ejemplo, electricidad) y consumibles en uso (por ejemplo, papel), Desecho y permite medir diversos impactos ambientales y muestra el resultado final en una sola puntuación (Mannan, 2012). Sistema internacional de datos sobre el ciclo de vida (ILCD) proporciona una base común para datos y estudios del ciclo de vida consistentes, robustos y garantizados en calidad, estos datos y estudios apoyan instrumentos de consumo y producción sostenibles coherentes, como el etiquetado ecológico, el ecodiseño, la huella de carbono y la contratación pública verde (European Commission, 2010).

El método ReCiPe, tiene como objetivo principal es transformar la larga lista de resultados del inventario del ciclo de vida en un número limitado de puntuaciones de indicadores, los cuales se determinan en dos niveles con 18 indicadores de caracterización: a) de punto medio; y b) tres indicadores de caracterización de punto

final (ReCiPe, 2016). En los indicadores de punto final se dividen el efecto a la salud humana, biodiversidad, escasez de recursos, esto es con el fin de simplificar la interpretación de los resultados del análisis de impacto ambiental o bien para caracterizar la gravedad del daño que se modela mediante el indicador del punto medio; dado que los indicadores de punto medio se centran en problemas ambientales individualistas (RIVM, 2024).

De acuerdo con el marco normativo ISO 14044 (2006) las categorías de impacto deben ser aceptados por organismos y acuerdos internacionales. ReCiPe (2016) toma 18 categorías de impacto al ambiente, en el Cuadro 1 se muestra las categorías con su respectiva unidad representativa.

Cuadro1. Categorías de impacto y unidad de medida de acuerdo con el método ReCiPe.

Categorías de Impacto Punto medio	Unidad	Expresión
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	kg dióxido de carbono equivalente
Agotamiento de la capa de Ozono	kg CFC11 eq	kg triclorofluorometano 11 equivalente
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq	kilobecquerel cobalto 60 equivalente
Formación de ozono, Salud humana	kg NO _x eq	kg óxidos de nitrógeno equivalente
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres	kg NO _x eq	
Formación de material particulado fino	kg PM 2.5 eq	kg de partícula 2.5 equivalente
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	kg dióxido de azufre eq
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	kg Fósforo eq
Eutrofización marina	kg N eq	kg nitrógeno eq
Ecotoxicidad terrestre	kg 1.4-DCB	
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1.4-DCB	kg 1.4 diclorobenceno
Ecotoxicidad marina	kg 1.4-DCB	
Toxicidad humana Cancerígena	kg 1.4-DCB	
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1.4-DCB	
Uso del suelo	m ² a crop eq	M cuadrados de cultivo equivalente
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	kg cobre eq
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	kg petróleo eq
Consumo de agua	m ³	metro cúbico de agua

Fuente: ReCiPe, 2016.

Debido a la incertidumbre y al horizonte temporal se han categorizado tres escenarios o perspectivas, de acuerdo con la “Teoría Cultural” de Thompson et al. (1990): a) Individualista; b) Jerárquico; y c) Igualitario. Estos escenarios no pretenden representar arquetipos del comportamiento humano, solo se emplean para agrupar tipos similares de supuestos y elecciones. En el escenario individualista se basa en el interés a corto plazo, los tipos de impacto evidente y el optimismo tecnológico con respecto a la adaptación humana. El escenario jerárquico, se basa en el conceso científico con respecto al marco temporal y plausibilidad de los mecanismos de impacto. Por último, el escenario igualitario es la perspectiva más precautoria, teniendo en cuenta el marco temporal más largo y todas las vías de impacto de los datos disponibles (Huijbregts et al., 2016).

El cuarto paso del análisis es el “Análisis e interpretación de los resultados”. Cuantifican, categorizan, verifican y evalúan los resultados de Inventario de ciclo de vida y la evaluación del impacto del ciclo de vida. Dependiendo de los resultados, se debe identificar el problema de más relevancia, evaluar el estudio, tomando en cuenta su exhaustividad, coherencia y sensibilidad, tener una conclusión, discutir de las limitaciones del estudio y hacer recomendaciones (Singaravadivelan et al., 2023).

En el ACV se han utilizado dos modelos, el atribucional, siendo este el más empleado por su simplicidad (Singaravadivelan et al., 2023), visto que su enfoque en la descripción de flujos físicos ambientalmente relevantes hacía y desde un ciclo de vida, con sus subsistemas (Finnveden y Potting, 2014) y el consecuencial, que ha sido empleado para analizar los patrones fluctuantes a partir de un sistema basado en pastos para estimar el cambio climático y los patrones uso de la tierra. (Singaravadivelan et al., 2023).

III. JUSTIFICACIÓN

Se han realizado una variedad de ACV en diversos procesos, empleando diferentes métodos. En Italia se realizó un estudio comparativo del impacto ambiental del estiércol, su límite de espacio fue del establo a las tierras, en tres establos con 450, 300 y 110 vacas en lactancia, su unidad funcional fue 1 kg de leche corregida en grasa y proteína, emplearon el método ILCD Handbook (Baldini et al. 2018). En Brasil, analizaron un sistema semi-intensivo con 128 vacas, donde su límite de espacio fueron los insumos para la alimentación del ganado, insumos en el establo, enfriamiento de la leche y transporte, su unidad funcional fue 1 kg de leche corregida en grasa y proteína, para ello emplearon el método ReCiPe (Santo Carvalho et al., 2022). En Estados Unidos evaluaron desde proceso de obtención de leche hasta el consumo, de manera subnacional, la unidad funcional empleada fue 1 kg de leche corregida en grasa y proteína, el método de evaluación base fue el IMPACT 2002+ (Henderson et al., 2023).

Pese a que ya existen otros estudios que han evaluado las cargas ambientales en bovinos productores de leche empleando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida; en el presente estudió se evaluaron tres establos a pequeña escala con 4 a 5 vacas en producción, con el fin de conocer su impacto ambiental al producir 1 kilogramo de leche, con el apoyo del método ReCiPe 2016 con los factores de caracterización de punto medio, en el presente estudio considera un menor número de vacas; el sector lechero ha tenido relevancia en términos impacto ambiental, por ello es de importancia tener otra perspectivas sobre las cargas ambientales en los sistemas de producción de leche a pequeña del municipio de Texcoco, Estado de México. Posadas-Domínguez et al. (2014; 2018), mencionan que de los sistemas lecheros en pequeña escala, los estratos de 3 a 9 vacas en línea de producción corresponden al 50% del total del inventario nacional.

IV. HIPÓTESIS

La emisión de cargas ambientales por efecto de tamaño y número de vacas de los establos sin similitudes entre ellas.

V. OBJETIVOS

General

Evaluar las cargas ambientales mediante el uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, en establos de pequeña escala en el municipio de Texcoco, Estado de México.

Específicos

Identificar los inventarios, entradas y salidas del subsistema agrícola encargado de generar los insumos alimenticios para la alimentación del ganado lechero de pequeña escala en el municipio de Texcoco, Estado de México.

Identificar los inventarios, entradas y salidas del subsistema pecuario encargado de generar la producción de leche del sistema lechero de pequeña escala en el municipio de Texcoco, Estado de México.

VI. MATERIALES

El trabajo se realizó con información de tres establos lecheros localizados en el municipio de Texcoco, Estado de México (Rogers-Montoya, 2024). El municipio se encuentra ubicado al norte con los municipios de Atenco, Chiconcuac, Chiautla, Papalotla y Tepetlaoxtoc; al este con el municipio de Tepetlaoxtoc y los Estados de Tlaxcala y Puebla; al sur con el Estado de Puebla y los municipios de Ixtapaluca, Chicoloapan, Chimalhuacán y Nezahualcóyotl; al oeste con los municipios de Nezahualcóyotl, Ecatepec de Morelos y Atenco (INEGI, 2010)

Material

Establos lecheros con vacas en línea de ordeña:

- Primer establo lechero cuenta con 4 vacas lecheras.
- Segundo establo lechero cuenta con 5 vacas lecheras.
- Tercer establo lechero cuenta con 4 vacas lecheras.

Softwares:

- Excel 365
- SiMaPro versión 9.601. Donde se empleó las bases de datos:

Agri-footprint versión 6.3

Ecoinvent versión 3.10

El software SiMaPro permite modelar los ACV, en el mismo programa se encuentra pasos para la elaboración de un ACV como lo indica las ISO 14040 y ISO 14044. (SiMaPro, 2016). SiMaPro está conformado por una herramienta de cálculo y una base de datos. En apartado de biblioteca se cuenta con las bases de datos que permiten realizar el inventario del ciclo de vida para las entradas y salidas, alguna de las bases con las que cuenta son: Ecoinvent LCI database, Industry data library, Agri-footprint, US Life Cycle Inventory Database, Agribalyse; en el mismo apartado lo conforma los métodos para evaluar los impactos ambientales donde considerara los datos del inventario como: IPCC 2013, ReCiPe 2016 Endpoint, ReCiPe 2016 Midpoint, TRACI 2.1, CML-IA baseline, LC-IMPACT ente otros (SiMaPro, 2025a).

La base de datos del inventario del ciclo de vida de Ecoinvent, es compatible para estudios y evaluaciones basados en las normas de ISO 14040 y 14044, tiene más

de 15,000 conjuntos de datos de ICV en las áreas de suministro de energía, agricultura, transporte, biocombustibles y biomateriales, productos químicos a granel, materiales de construcción, materiales de embalaje, textiles, metales básicos y preciosos, procesamiento de metales, TIC y electrónica, productos lácteos, madera y tratamiento de residuos (SiMaPro, 2025b).

Mientras que la base de agri-footprint indica el impacto del ciclo de vida sobre productos agrícolas como: pienso, alimentos, biomasa y la versión 6.3 incluye la relación con el agua, uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra, los fertilizantes y pesticidas; el contenido de la base de datos proporciona alrededor de 4. 800 productos y procesos específicos del ACV agrícola: cultivos, productos y productos intermedios, compuestos para piensos, productos alimenticios, sistemas de producción animal y procesos de fondo como el transporte, insumos auxiliares para el procesamiento, energía, pesticidas y fertilizantes. La base de datosecoinvent se ha utilizado como base de datos de fondo para los conjuntos de datos de fondo de energía y combustible (SiMaPro, 2025c)

Una vez identificado y realizado la selección de las bases de datos y métodos. El proyecto por modelar se guardará en la misma base de datos; se crea una carpeta para los procesos en un mismo apartado, después se crea una subcarpeta para los procesos o sistemas, se pasa al apartado de “entrada y salidas” donde se agregarán los insumos del inventario; en la sección de producto se agrega la cantidad de la UF, se realiza la asignación: a manera de ejemplo, en el presente estudio se considerará 1 kg de leche, la asignación del 100%. Después en el apartado de salidas, emisiones al aire, se agregan las salidas al aire que se desea modelar, en el estudio serían metano, dióxido de nitrógeno, metano biogénico y óxido de nitroso. Finalmente, SiMaPro analiza los datos del inventario de ciclo de vida empleando uno de los diferentes métodos de evaluación de impactos para obtener la huella ambiental; para ello se debe colocarse en el apartado de los procesos o sistemas para después seleccionarlos, se comparan, en el apartado métodos se realiza la acción “calcular”, evaluación del daño y nos proporcionan los valores.

Cuando se realiza selección de los insumos se proporciona las características del insumo, la región geográfica ejemplo: Estados Unidos (US), India (IN), China (CN), resto del mundo (RoW) y Global (GLO). También se tienen otras clasificaciones como, “allocation cut-off by classification” es atribucional, se basa en el enfoque de contenido reciclado o de corte, las cargas se asignan al primer producto de un material, si un material se recicla no recibe ningún crédito, “allocation at point of substitution” las cargas se atribuyen proporcionalmente a procesos específicos, las cargas de los residuos y subproductos van de acuerdo a los intercambios de mercado; “substitution, consequential, long term” considera los cambios en el sistema en un mercado saturado, cálculo en el consumo marginal, se consumen

todo el material disponible para fabricar el producto X, se considera usar el siguiente material disponible (SiMaPro, 2025a) . Para el caso del estudio se seleccionaría “allocation cut-off by classification”. A continuación, se elige un proceso “sistema o unidad” cual sea que se elija el resultado sería el mismo, pero si se elige “sistema” no se muestran demasiadas ramificaciones de un diagrama de Sankey, esto quiere decir que un proceso de sistema solo contiene entradas y salidas hacia y desde la biosfera por producto de referencia, es decir, por cada salida individual a la tecnosfera. Mientras que un proceso unitario contiene solo emisiones y entradas de recursos de un paso del proceso, más referencias a entradas de otros procesos. permitiendo la representación visual de los subprocesos de un modelo (SiMaPro, 2025a). En estudio se elegiría “unidad” para obtener una mejor visualización del proceso.

VII. MÉTODOS

Objetivos y Alcances:

El límite del sistema abarcó de “la cuna a la puerta”, para ello se dividió en dos subsistemas, donde los datos del inventario, conocidas como las entradas y salidas, de acuerdo con la “Teoría Cultural” de Thompson, se empleó un escenario jerárquico.

En el primer subsistema (S1) se cubrieron todos los insumos que se emplearon en la alimentación del ganado como: ensilado de maíz, alfalfa henificada, rastrojo de maíz, alfalfa, concentrados comerciales, maíz forrajero, sorgo.

En el segundo subsistema (S2) se consideraron aquellos insumos que se emplearon dentro del establo como: consumo de agua, electricidad, combustible y alimento consumido.

Salidas consideradas fueron, emisiones al aire: metano, dióxido de nitrógeno, metano biogénico, óxido de nitroso (Anexo 1)

Unidad funcional (UF) un kilogramo de leche.

Para la corrección de litros de leche a kilogramos de leche se utilizó la siguiente fórmula:

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

Fuente: IDF, 2015.

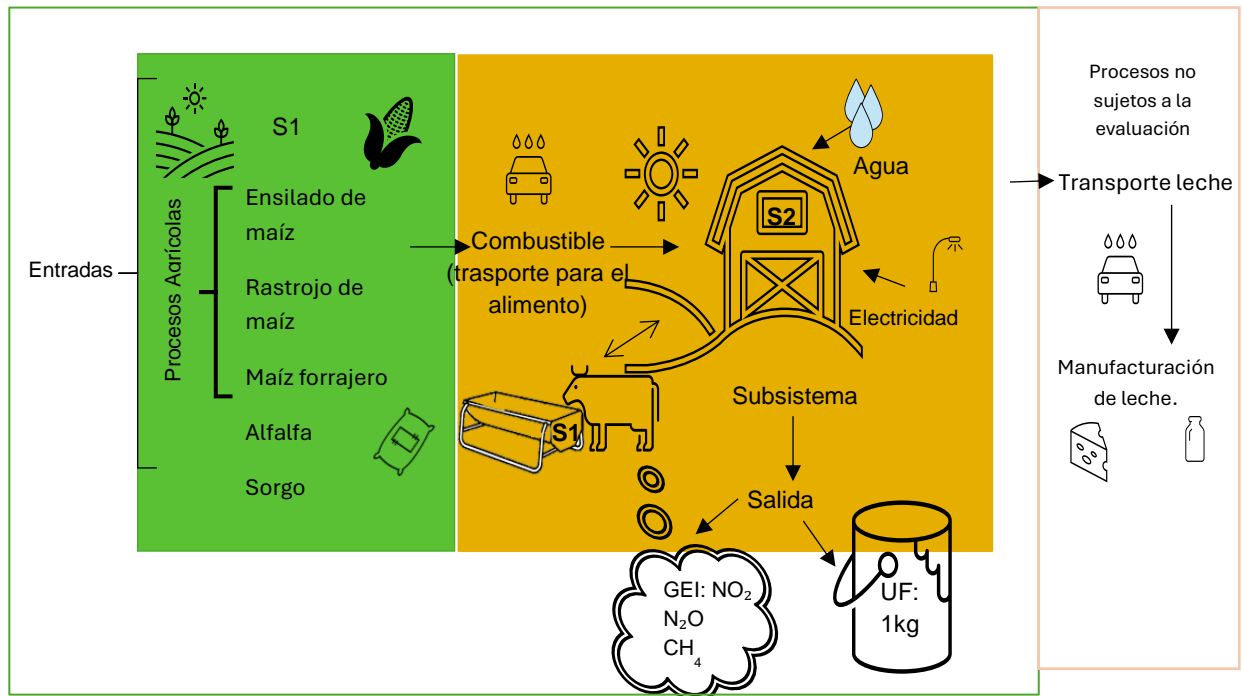
Donde LCGP, es leche corregida en grasa y proteína (kg/año), Producción de leche (kg de leche /año).

Se multiplica la producción de leche por el contenido energético estándar de la leche con un 4% de grasa y 3.3% de proteína (IDF, 2015) o Según Vera-Ávila et al. (2009) mencionó que leche en los sistemas familiares la compone por 4.5% de grasa y 3.5% de proteína.

La fórmula para leche corregida por grasa y proteína (LCGP) permite las comparaciones entre explotaciones, y es adecuada entre explotaciones con diferentes razas o regímenes de alimentación (IDF, 2015) para poder hacer un comparativo entre ellas.

El límite del sistema dentro del inventario del análisis del ciclo de vida se presenta en la Figura 5.

Figura 5. Límite del sistema e inventario del análisis de ciclo de vida en vacas lecheras a pequeña escala.



S1: primer sub-sistema, cubre procesos que se emplean en la alimentación del ganado lechero. S2: segundo sub-sistema se consideró los procesos se emplean dentro del establo (consumo de agua, electricidad, combustible y alimento consumido (S1)). UF: Unidad Funcional. GEI: los gases de efecto invernadero (metano biogénico, metano, dióxido nitrógeno, óxido de nitrógeno). Procesos no sujetos a la evaluación por la versatilidad del producto final.

Fuente: Elaboración propia

Inventario del ciclo de vida:

En el cuadro 2 se presentan las entradas conocidas desde la tecnosfera del S1, siendo la cantidad de alimento consumida entre la producción de leche durante un año.

Cuadro 2. Inventario del S1, cantidad de alimento (kg) por kilogramo de leche

Insumos primer sub-sistema (alimentación)	Base de datos de Ecoinvent 3.10 (2024) y agri-footprint 6.3 (2022)	Establo 1	Establo 2	Establo 3	Unidad
Ensilado de maíz	Maize silage, at farm Brasil {BR} Economic, U	1.2809	1.2267	1.6929	Kg
Rastrojo de maíz	Maize stover, at farm, México {MX} Economic, U	0.9277	0.8454	0.9083	Kg
Maíz forrajero	Maize, at farm {MX} Economic, U	0.0343	0.0296	0.0306	Kg
Alfalfa	Alfalfa-grass mixture, Swiss integrated production Suiza {CH} Cut-off, U	2.5554	1.9814	3.0931	Kg
Sorgo	Sorghum grain, at farm {MX} Economic, U	0.0417	0.0374	0.0321	Kg
Concentrado comercial	Dairy cow compound feed, at processing, Estado Unidos {US} Economic, U	0.0675	0.0706	0.0935	Kg

Fuente: Rogers-Montoya, 2024.

Consumo de combustible: fue el número de litros de combustible por kg de LCGP producido y 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 escala la ordeña se realizó de forma manual, por lo que se consideró únicamente la iluminación artificial del establo (SENASICA, 2019).

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 (Kononoff y Clark, 2017).

En el cuadro 3 se presentan las entradas conocidas desde la tecnosfera del S2 más la integración del S1.

Cuadro 3. Entradas conocidas desde la tecnosfera en S2.

Insumos Segundo subsistema (animal)	Base de datos de Ecoinvent 3.10 (2024) y agri-footprint 6.3 (2022)	Establo 1	Establo 2	Establo 3	Unidad
Agua	Tap water, Resto del Mundo {RoW} tap water production, conventional treatment Cut-off, U	5.95	4.23	4.55	Kg
Combustible	Naphtha {RoW} market for naphtha Cut-off, U	0.5	0.5	0.5	Kg
Electricidad	Electricity, low voltage {MX} market for electricity, low voltage Cut-off, U	0.01	0.01	0.01	kWh
S1		4.9075	4.1911	5.8897	Kg

S1: primer subsistema, Alimento consumido, kg. Fuente: Rogers-Montoya, 2024.

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 (INECC, 2018b), se representan en el cuadro 4.

Cuadro 4. Emisiones de GEI.

	Establo 1	Establo 2	Establo 3	Unidad
Metano biogénico	0.01613	0.01613	0.01613	Kg
Metano	0.01205	0.0201	0.015	Kg
Dióxido nitrógeno	0.0000748	0.0000748	0.0000748	Kg
Óxido de nitroso	0.0000008144	0.0000008144	0.0000008144	Kg

Fuente: INECC, 2018b.

VIII. LÍMITE DE ESPACIO

El municipio de Texcoco ha sido el principal productor de leche de bovino en el Estado de México (SIAP, 2024). Se sitúa al este del Estado de México y colinda al norte con los municipios de Atenco, Chiconcuac, Chiautla, Papalotla y Tepetlaoxtoc; al este con el municipio de Tepetlaoxtoc y los Estados de Tlaxcala y Puebla; al sur con el Estado de Puebla y los municipios de Ixtapaluca, Chicoloapan, Chimalhuacán y Nezahualcóyotl; al oeste con los municipios de Nezahualcóyotl, Ecatepec de Morelos y Atenco. Su coordenada geográfica se sitúan longitud 99°01'44.04" W, 98°38'04.92" W; latitud 19°23'41.28" N, 19°33'25.20" N (INEGI, 2010).

Figura 6. División municipal del Estado de México



Fuente: INEGI, 2024. El área de color amarillo corresponde a Texcoco.

IX. LÍMITE DE TIEMPO

El periodo de estudio comprendido del mes de septiembre de 2024 a mayo de 2025.

	Mes						
	1	2	3	4	5	6	7
Realización de protocolo	X	X	X				
Recolección de datos		X					
Análisis de datos		X	X	X	X		
Evaluación de datos				X	X	X	
Conclusión						X	X

X. RESULTADOS

Evaluación de impacto ambiental

En el cuadro 5, se muestran los resultados de los tres establos con seis categorías de punto medio, con su unidad de impacto de cada subsistema. En los tres establos el S2 la categoría con mayor impacto fue CG, en cambio las demás categorías como ACO, RI, FO-SH, FMPF, FOET, mostraron ser mayores en el S1.

La figura 5 muestra la distribución porcentual de cada proceso de seis categorías de impacto ambiental, mismas del cuadro 5. El S2 contribuyó significativamente el CG el E1 con 45.79%, el E2 con 54.6% y el E3 con 46.09%, esto se debió a las emisiones provenientes del metano entérico y estiércol (Knapp et al., 2014). En el resto de las categorías fue predominante el S1, a causa de la producción de los insumos para la alimentación del ganado, osciló entre 27.89% a 99.09%. El uso del combustible obtuvo relevancia en las categorías de CA, RI, FO-SH, FMPF, FOET.

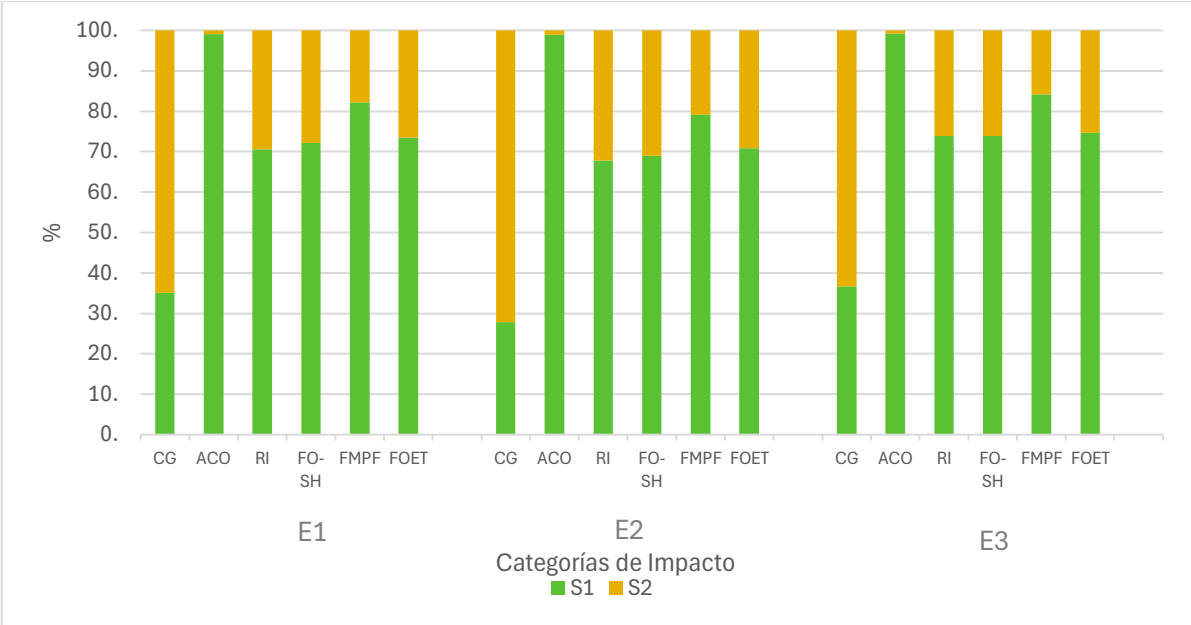
Cuadro 5. Categorías de impacto ambiental, punto medio por 1kg de LCGP: CG, ACO, RI, FO-SH, FMPF, FOET para los tres establos lecheros.

Establos	Siglas	Impactos Ambientales	Unidad	Total	S1	S2
1	CG	Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	2.119	0.744	1.375
	ACO	Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC11 eq	1.00E-05	9.94E-06	9.09E-08
	RI	Radiación Ionizante	kBq Co-60 eq	0.017	0.012	0.005
	FO-SH	Formación de Ozono, Salud Humana Formación de Material Particulado	kg NOx eq	0.004	0.003	0.001
	FMPF	Fino Formación de Ozono, Ecosistemas	kg PM2.5 eq	0.002	0.002	3.94E-04
	FOET	Terrestres	kg NOx eq	0.006	0.005	0.002
2	CG	Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	2.307	0.644	1.664
	ACO	Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC11 eq	8.56E-06	8.50E-06	9.07E-08
	RI	Radiación Ionizante	kBq Co-60 eq	0.015	0.010	0.005
	FO-SH	Formación de Ozono, Salud Humana Formación de Material Particulado	kg NOx eq	0.004	0.003	0.001
	FMPF	Fino Formación de Ozono, Ecosistemas	kg PM2.5 eq	0.002	0.001	3.92E-04
	FOET	Terrestres	kg NOx eq	0.006	0.004	0.002
3	CG	Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	2.335	0.855	1.481
	ACO	Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC11 eq	1.12E-05	1.11E-05	9.077E-08
	RI	Radiación Ionizante	kBq Co-60 eq	0.019	0.014	0.005
	FO-SH	Formación de Ozono, Salud Humana Formación de Material Particulado	kg NOx eq	0.005	0.004	0.001
	FMPF	Fino Formación de Ozono, Ecosistemas	kg PM2.5 eq	0.002	0.002	3.92E-04
	FOET	Terrestres	kg NOx eq	0.006	0.005	0.002

S1: subsistema 1, S2: subsistema 2. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5 se representa en porcentaje contribución de los impactos ambientales por 1kg de LCGP, donde CG osciló 63.39% a 72.11. En cambio, el S1 obtuvo un mayor porcentaje en el resto de las categorías.

Figura 7. Contribución de las categorías de impacto por 1kg LCGP: CG, ACO, RI, FO-SH, FMPF, FOET; del S1 y S2 en los tres establos (E1, E2, E3).



E1: establo 1, E2: establo 2, E3: establo 3. S1: primer subsistema, S2: segundo subsistema. CG: Calentamiento Global, ACO: Agotamiento de la Capa de Ozono, RI: Radiación Ionizante, FO-SH: Formación de Ozono, Salud Humana, FMPF: Formación de Material Particulado Fino, FOET: Formación de Ozono, Ecosistemas Terrestres. Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 6 se muestra que el S1 tuvo mayores cargas ambientales en todas las categorías en comparación del S2 y en la figura 6 se muestra de manera gráfica las variaciones de cada categoría de impacto, que fueron del 61.4% hasta 99.25%. El Establo 3 (E3) fue el que presento mayores cargas de CG, ACO, RI, FO-SH, FMPF, FOET.

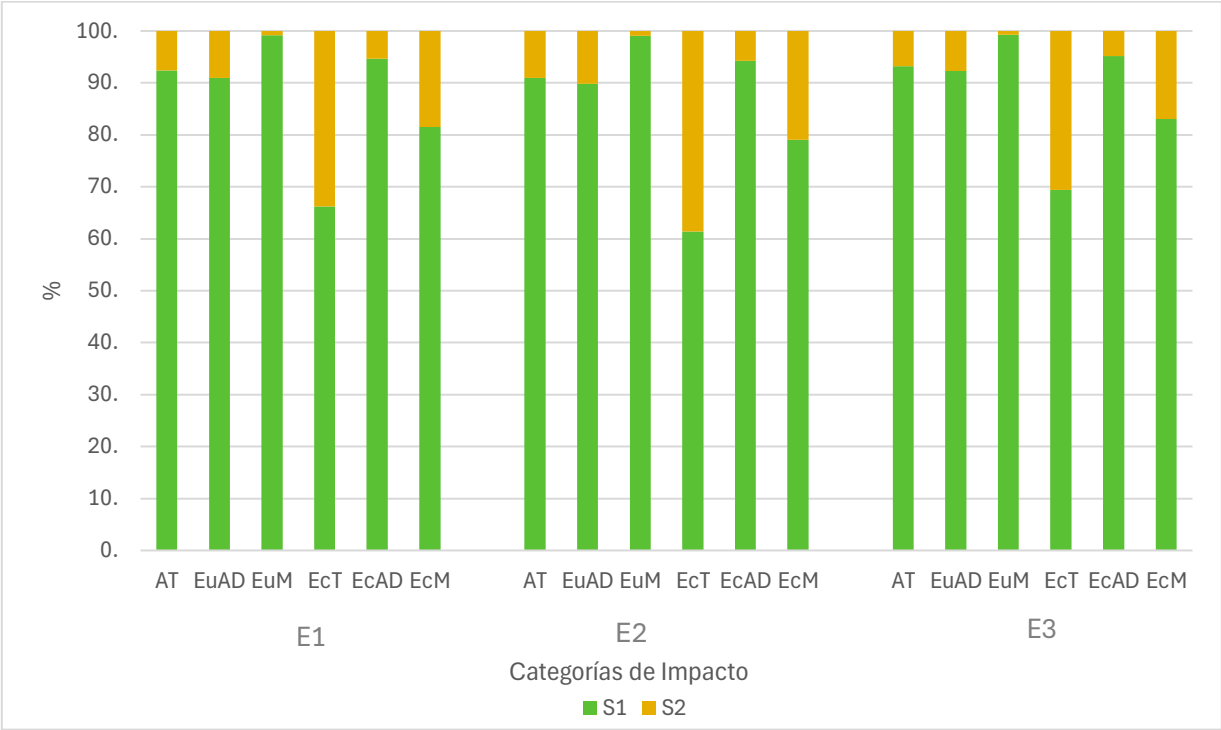
Cuadro 6. Categorías de impacto, punto medio por 1kg LCGP: AT, EuAD, EuM, EcT, EcAD, EcM para los tres establos.

Establos	siglas	Impactos Ambientales	Unidad	Total	S1	S2
E1	AT	Acidificación Terrestre	kg SO ₂ eq	0.013	0.012	0.001
	EuAD	Eutrofización de Agua Dulce	kg P eq	4.11E-04	3.74E-04	3.73E-05
	EuM	Eutrofización Marina	kg N eq	0.001	0.001	1.04E-05
	EcT	Ecotoxicidad Terrestre	kg 1.4-DCB	12.366	8.183	4.183
	EcAD	Ecotoxicidad del Agua Dulce	kg 1.4-DCB	0.084	0.080	0.004
	EcM	Ecotoxicidad Marina	kg 1.4-DCB	0.057	0.047	0.011
E2	AT	Acidificación Terrestre	kg SO ₂ eq	0.011	0.010	0.001
	EuAD	Eutrofización de Agua Dulce	kg P eq	3.63E-04	3.26E-04	3.96E-05
	EuM	Eutrofización Marina	kg N eq	0.001	0.001	1.03E-05
	EcT	Ecotoxicidad Terrestre	kg 1.4-DCB	10.824	6.646	4.179
	EcAD	Ecotoxicidad del Agua Dulce	kg 1.4-DCB	0.077	0.073	0.004
	EcM	Ecotoxicidad Marina	kg 1.4-DCB	0.050	0.040	0.011
E3	AT	Acidificación Terrestre	kg SO ₂ eq	0.015	0.014	0.001
	EuAD	Eutrofización de Agua Dulce	kg P eq	4.78E-04	4.41E-04	3.70E-05
	EuM	Eutrofización Marina	kg N eq	0.001	0.001	0.000
	EcT	Ecotoxicidad Terrestre	kg 1.4-DCB	13.656	9.477	4.179
	EcAD	Ecotoxicidad del Agua Dulce	kg 1.4-DCB	0.093	0.089	0.004
	EcM	Ecotoxicidad Marina	kg 1.4-DCB	0.062	0.052	0.011

S1: primer subsistema, S2: segundo subsistema

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Análisis de las categorías de impacto ambiental: AT, EuAD, EuM, EcT, EcAD, EcM punto medio del S1 y S2.



E1: estable 1, E2: estable 2, E3: estable 3. S1: primer subsistema, S2: segundo subsistema. AT: Acidificación Terrestre, EuAD: Eutrofización de Agua Dulce, EuM: Eutrofización Marina, EcT: Ecotoxicidad Terrestre, EcAD: Ecotoxicidad del Agua Dulce, EcM: Ecotoxicidad Marina. Fuente: Elaboración propia.

Para las categorías THC, THNC, US, ERM, ERM, CA, el S1 fue mayor en todas las cargas a excepción de ERF, donde el E1, E2, E3 obtuvieron 0.111 kg oil eq; esto se debió al uso de combustible como lo muestra la figura 7, osciló 82.15% a 85.91%. En el consumo de agua el E1 obtuvo 30.56%, el E2 25.42% y el E3 24.67% respectivamente (Cuadro 7).

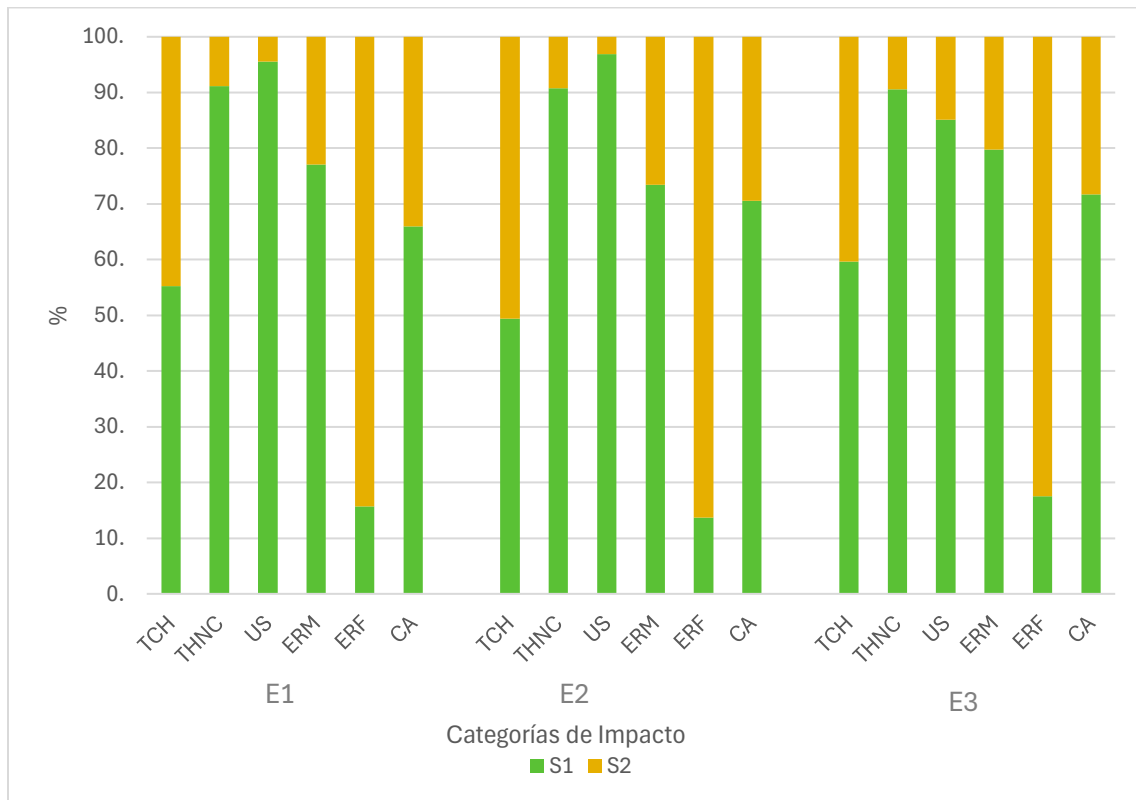
Cuadro 7. Categorías de impacto, punto medio por 1kg: TCH, THNC, US, ERM, ERF, CA, para los tres establos.

Establos	Siglas	Impactos Ambientales	Unidad	Total	S1	S2
E1	THC	Toxicidad Humana Cancerígena	kg 1.4-DCB	0.140	0.077	0.063
		Toxicidad Humana no				
	THNC	Cancerígena	kg 1.4-DCB	1.084	0.988	0.096
	US	Uso de suelo	m ² a crop eq	0.293	0.279	0.013
	ERM	Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	0.004	0.003	0.001
	ERF	Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	0.710	0.112	0.598
	CA	Consumo de agua	m ³	0.020	0.013	0.007
E2	THC	Toxicidad humana Cancerígena	kg 1.4-DCB	0.123	0.061	0.062
		Toxicidad humana no				
	THNC	Cancerígena	kg 1.4-DCB	1.029	0.934	0.095
	US	Uso de suelo	m ² a crop eq	0.424	0.411	0.013
	ERM	Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	0.003	0.002	0.001
	ERF	Escasez de recurso fósiles	kg oil eq	0.693	0.095	0.598
	CA	Consumo de agua	m ³	0.017	0.012	0.005
E3	THC	Toxicidad humana Cancerígena	kg 1.4-DCB	0.155	0.092	0.062
		Toxicidad humana no				
	THNC	Cancerígena	kg 1.4-DCB	1.011	0.916	0.095
	US	Uso de suelo	m ² a crop eq	0.088	0.075	0.013
	ERM	Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	0.004	0.003	0.001
	ERF	Escasez de recurso fósiles	kg oil eq	0.725	0.127	0.598
	CA	Consumo de agua	m ³	0.019	0.013	0.005

S1: primer subsistema, S2: segundo subsistema.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Análisis de categorías de impacto ambiental: TCH, THNC, US, ERM, ERF, CA de punto medio del S1 y S2.



E1: estable 1, E2: estable 2, E3: estable 3. S1: primer subsistema, S2: segundo subsistema. TCH: Toxicidad humana Cancerígena, THNC: Toxicidad humana no Cancerígena, US: Uso de suelo, ERM: Escasez de recursos minerales, ERF: Escasez de recurso fósiles, CA: Consumo de agua. Fuente: Elaboración propia.

Analizando los dos subsistemas, para el S2, las categorías que obtuvieron mayor ponderación fueron en ERF, CG por 1kg de LCGP; el resto de las categorías son representadas por el S1. También se observó que el E2 mostro menor impacto ambiental por 1kg de LCGP a excepción del US y THNC en comparación con el E1 y E3 respectivamente.

XI. DISCUSIÓN

Análisis e interpretación de los resultados

El Establo 2 tuvo el menor porcentaje en las cargas ambientales en comparación con los otros dos, a excepción del uso del suelo y calentamiento global. Esto se explica ya que a mayor número de vacas por unidad de leche producida mejor gestión de los recursos y tecnologías que se implementan dentro del establo (Vries y Boer, 2010), sin embargo, su valor medio de producción de leche estuvo por debajo de la media de los tres establos.

EL S1 estuvo involucrado en más categorías de impacto ambiental y con mayores porcentajes de contribución. Al igual que Entrena-Barbero et al. (2024), la alimentación de las vacas fue uno de los puntos que involucró a 11 categorías de impacto ambiental donde se superó 70%. Esto también fue observado en el estudio de Baldini et al. (2017) donde la escasez de recursos minerales, acidificación, formación de ozono fotoquímico, eutrofización marina y agua dulce fueron mayores. La alternativa es el manejo de la alimentación de ganado con productos locales, con el fin de reducir el consumo externo proporciona una producción más sostenible y circular (Entrena-Barbero et al., 2024), menos consumo de energía por efecto de transporte y menor emisión de contaminantes (Villavicencio-Gutiérrez et al., 2022).

Otra alternativa para la mitigación de los impactos ambientales es la integración de la genética como lo menciona Gallo et al. (2024), en su estudio que involucró a 564 vacas, entre estas Holstein-Friesian de raza pura y criollas, las vacas criollas tuvieron mayores emisiones nominales por vaca en toda su vida útil, emisiones similares por día de vida y ~3% menos calentamiento global, acidificación, eutrofización por kg LCGP producida en la vida útil y en uso del suelo también fue menor; resultó ser más eficiente en términos ambientales, mientras que los costos netos de alimentación por unidad de emisión fue 4% mayores.

En la categoría de CG el S2 fue el principal contribuyente, el E1 (54.9%), E2 (72.11%) y E3 (63.39%) por las emisiones del metano biogénico, metano, dióxido

de nitrógeno y óxido nitroso. En un estudio de producción lechera a pequeña escala en la India los valores para la asignación por concepto de masa fueron de 2.3 kg de CO₂-eq/kg de LCGP, 1.9 en la asignación económica y 2.0 en digestibilidad (Garg et al., 2016). En Irlanda donde se emplearon 221 establos lecheros, el valor fue el 1.20 kg CO₂-eq por kg LCGP, y varió de 0.60 a 2.13 por kg LCGP (O'Brien et al., 2015). En el presente estudio, el valor fue de 2.3 kg de CO₂-eq/kg de LCGP. El manejo del estiércol es la clave para mitigar emisiones, cuando el estiércol se almacena en condiciones anaerobias las lagunas tienen un factor de conversión de metano significativamente mayor (IPCC, 2019). Por otro lado, Battini et al. (2014), mostraron que un sistema de almacenamiento del estiércol hermético reduce los GEI. Según la FAO (2023), el CH₄ contribuye con 54% de las emisiones ganaderas, el CO₂ con el 31% y 15% N₂O. El uso de dietas que promuevan la disminución de CH₄ biogénico es otra alternativa puede contribuir positivamente en las emisiones (Knapp et al., 2014).

Los resultados obtenidos para EuAD fueron 4.17E-04 kg P eq/ kg de LCGP; 0.001 kg N eq/ kg de LCGP EuM; 0.002 kg PM 2.5 eq/ kg de LCGP para FMPF. Battini et al. (2014) reporta un valor de 1.23E-04 kg P eq/ kg de LCGP para EuAD, 9.37E-03 kg N eq/ kg de LCGP para EuM y de 4.15E-04 kg PM 2.5 eq/ kg de LCGP en FMPF, donde el principal aporte proviene de los procesos para alimentar al ganado. Este estudio se llevó a cabo en Italia y se empleó el software GaBi 6 de PE International. La eutrofización de agua dulce y marina implican un riesgo para los ecosistemas y la calidad del agua, resultado de inadecuado manejo de la alimentación (Tan y Yin, 2017). Se recomienda que la alimentación sea en función de la etapa fisiológica, ya que a un bovino de remplazo no sería idóneo brindarle la misma dieta que a un bovino en producción (Biagini et al., 2018).

Para las categorías de toxicidad humana cancerígena y no Cancerígena, el subsistema que representó un mayor porcentaje fue el S1, esto se debe a los insumos empleados para el cultivo de alimento para el ganado, como el uso de fertilizantes, pesticidas, minerales, compuestos inorgánicos -NO_x principalmente- (Henderson et al., 2023). Para THNC se obtuvo un valor de 1.041 kg1.4-DCB/ kg de

LCGP, Villavicencio-Gutiérrez et al., (2022) reportan un valor de 1.65 kg, pero de 1.4-DB eq/ kg de LCGP, no de DCB.

Los valores presentados en esta tesis para de formación de ozono hacia la salud Humana fue de 0.0043 kg NOx eq/ kg de LCGP, para la formación de ozono para los ecosistemas terrestres de 0.006 kg NOx eq/ kg de LCGP y 6.92E-06 kg CFC11 eq/ kg LCGP en agotamiento de capa ozono. La industria de fertilizantes utiliza mucha energía y genera cantidades significativas de CO₂ entre otros GEI, suelo agrícola es una fuente importante de N₂O, causando el deterioro de la capa de ozono (Singaravadivelan et al., 2023).

En la categoría de CA el resultado fue de 0.018 m³/ kg de LCGP; donde el mayor consumo se relaciona con el S1, que es la producción de alimento para el ganado. En un establo en Brasil con 128 animales y 52 vacas en producción, el consumo de agua fue de 5.87E-0.3 m³/ kg de LCGP (Santos-Carvalho, et al., 2022).

La ERF fue de 0.709 kg oil eq/ kg de LCGP incluyendo el S1 y S2. El S2 reflejó un mayor aporte dentro de esta categoría, debido al uso de combustibles dentro del establo, dando como resultado 0.595 kg oil eq/ kg de LCGP; mientras que Santos-Carvalho, et al., (2022) su impacto fue de 4,82E-02 kg de kg oil eq/ kg de LCGP, donde el transporte represento el 10.2%. pero la categoría. En ERM se obtuvo ~0.0036 kg Cu eq/ kg de LCGP, a causa del proceso de producción de alfalfa donde esta tiene un mayor aporte dentro de esta categoría.

En AT, el valor fue de 0.013 kg SO₂ eq/ kg de LCGP fue 0.01189 mayor que el reportado por Santos-Carvalho, et al., (2022) y las principales contribuciones se registraron en el S1.

En el uso del suelo agrícola fue de 0.268 m²a crop eq/ kg de LCGP, valor similar con Santos-Carvalho, et al. (2022) pero muy diferente con Rogers-Montoya et al. (2024) quienes reportan entre 5 y 6 m².

El S1 contribuyó más en la categoría de RI, por ambos sistemas el total fue de ~0.017 kBq Co-60 eq/ kg de LCGP, pero en el estudio Frolidi et al. (2022) con otras

unidades obtuvieron como resultado $1.52E-02$ kBqU²³⁵-eq/ kg de LCGP, en Radiación ionizante, salud humana en un escenario de bajo rendimiento (< 25.4 kg/vaca/día) utilizó el software SimaPro v9.0.0.35, estimando las emisiones de 19 categorías.

Las categorías de EcT, EcAD y EcM, en este sentido, el principal contribuyente fueron los procesos que involucraron la alimentación para el ganado (S1), lo mismo ocurrió con Entrena-Barbero et al. (2024).

Realizar una comparación de diversos estudios de ACV tiene que guardar criterios de calidad toda vez que existen diferentes librerías, los inventarios son casi siempre diferentes, las ponderaciones por tipo de software igualmente, los métodos, entre otros, pero es un ejercicio que se debe hacer continuamente a las acciones conducentes para la mitigación los efectos al cambio climático contemplados en la Ley General de Cambio Climático y las Acciones Nacionales de Apropriadadas de Mitigación entre otras cosas, el establecimiento de la línea base o año cero.

XII. CONCLUSIÓN

El uso de la metodología de ACV permitió identificar las cargas ambientales asociadas a los tres establos lecheros de pequeña escala los cuales contaban con 4 y 5 vacas en línea de ordeña en el municipio de Texcoco, Estado de México. Se logró identificar los inventarios para las entradas y salidas del subsistemas agrícola y pecuario, donde fue posible reconocer los puntos críticos por producir kg LCGP, con el fin de proponer estrategias de mitigación.

XIII. SUGERENCIAS

Futuras investigaciones podrán enfocarse en la optimización de los recursos, puesto que ambos subsistemas (S1y S2) presentan interacciones directas que influyen en las cargas ambientales.

Este trabajo aporta evidencia sobre las cargas ambientales en sistemas lecheros de pequeña escala y la importancia de adoptar tecnologías y practicas innovadoras para reducir el impacto ambiental en este tipo de sistemas productivos. Estas medidas no solo mitigarían las cargas ambientales, sino que fortalecerían la competitividad y resiliencia de los pequeños productores, de acuerdo con las tendencias globales a fin de tener una producción láctea más sostenible.

XIII. REFERENCIAS

- Baldini, C. Bava, L. Zucali M. Guarino, M. (2018) Milk production Life Cycle Assessment: A comparison between estimated and measured emission inventory for manure handling. *Science of the Total Environment*. Vol. 625. pp.209-219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.261>
- Battini F., Agostinib, A., Boulamanti, A.K., Giuntoli, J., Amaducci, S. (2014) Mitigating the environmental impacts of milk production via anaerobic digestion of manure: Case study of a dairy farm in the Po Valley. *Science of the Total Environment*. Vol. 481 pp.196–208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.038>.
- Biagini, D. Lazzaroni, C. (2018) Eutrophication risk arising from intensive dairy cattle rearing systems and assessment of the potential effect of mitigation strategies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 266, pp 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.026>
- Bórawski, P. Pawlewicz, A. Parzonko, A. Harper J. K. Holden, L. (2020) Factors Shaping Cow's Milk Production in the EU. *Sustainability*. 12(1), 420; <https://doi.org/10.3390/su12010420>
- Bricker, S.B. Longstaff, B. Dennison, W. Jones, A. Boicourt, K.C. Wicks, C. Woerner, J. (2008) Effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries: A decade of change. *Harmful Algae*, Vol.8, Issue 1, pp.21-32, <https://doi.org/10.1016/j.hal.2008.08.028>
- Campos-Azofeifa A., Díaz Rodríguez, A. PCIIR, PSAICA (2024) Informe del estado actual de los acuerdos comerciales vigentes de la región Centroamérica en el sector lácteo: oportunidades y retos para su mejor aprovechamiento. IICA. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/22025>
- Celis-Alvarez, M. D. López-González, F. Arriaga-Jordán, C.M. Robles-Jiménez, L.E. González-Ronquillo, M. (2021) Feeding Forage Mixtures of Ryegrass (*Lolium* spp.) with Clover (*Trifolium* spp.) Supplemented with Local Feed Diets to Reduce Enteric Methane Emission Efficiency in Small-Scale Dairy Systems: A Simulated Study. *Animals*, 11(4), 946; <https://doi.org/10.3390/ani11040946>
- Climate and Clean Air Coalition (CCAC) (2022) The Climate and Clean Air Coalition (CCAC) celebrates 10 years of supporting increased climate action and ambition in

the agriculture sector. <https://www.ccacoalition.org/news/decade-ccac-shows-agriculture-key-success-climate-change-and-air-pollution-solutions>. Obtenido 03 de octubre 2024.

Climate and Clean Air Coalition (CCAC)/ [United Nations Environment Programme \(UNEP\)](#) (2021) "Global Methane Assessment (summary for decision makers)", Reports, Case Studies & Assessments.

Cocampo (2024) Historia de cocampo, cooperativa multiactiva de campesinos emprendedores de boyacá <https://www.cocampo.com.co/historia-de-cocampo/>. Obtenido 27 de octubre de 2024.

Chávez-Pérez L Manuel, Soriano-Robles R., Espinosa-Ortiz V. E., Miguel-Estrada M., Rendón-Rendón M.C., Jiménez-Jiménez R.A. (2021) Does Small-Scale Livestock Production Use a High Technological Level to Survive? Evidence from Dairy Production in Northeast-ern Michoacán, Mexico. *Animals*, 11(9), 2546; <https://doi.org/10.3390/ani11092546>

Christie, N. (2020) Rethinking local institutional development in India: Theoretical perspectives and analysis of dairy cooperatives. *Journal of Public Affairs an International Journal*. Vol.21 (3). <https://doi.org/10.1002/pa.2230>.

Dairy Intelligence Agency (2021) milk shortage map- 2021. <https://dairynews.ru/news/rossiya-defitsit-moloka-i-profitsit-molochnoy-prod.html>. Obtenido 15 septiembre 2024.

Dairy Intelligence Agency (2024) How USMCA Increased U. S. Dairy Exports to Mexico by 59%. https://dairynews.ru/news/kak-usmca-velichila-eksport-molochnoy-produktsii-.html?sphrase_id=19906250. Obtenido 16 septiembre 2024.

Daley, V.L. Armentano, L.E. Hanigan, M.D. (2022) Models to predict milk fat concentration and yield of lactating dairy cows: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*. Vol. 105, Issue 10. pp. 8016-8035. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21777>.

Ding, H. Fu, Y. Zheng, L. Yan, Z. (2019) Determinants of the competitive advantage of dairy supply chains: Evidence from the Chinese dairy industry. *International Journal of Production Economics*. Vol. 209, pp 360–373. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.013>.

- Dohmwirth C., Liu, Z. (2020) Does cooperative membership matter for women's empowerment? Evidence from South Indian dairy producers. *Journal of Development Effectiveness*. Volume 12, Issue 2. <https://doi.org/10.1080/19439342.2020.1758749>
- Entrena-Barbero, E. Zepon-Tarpani, R.R. Fernández, M. Moreira T.M. Gallego-Schmid A. (2024) Integrating circularity as an essential pillar of dairy farm sustainability. *Journal of Cleaner Production*, Volume 458, 142508, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142508>.
- European Commission (2010) General guide for Life Cycle Assessment- Detailed guidance, ILCD handbook. First edition pp 4-5.
- European Commission (2024) EU yield of dairy cows, *Milk Market Observatory*, https://agriculture.ec.europa.eu/document/download/eb95217e-854e-433f-a9d0-5e03b527ffcb_en?filename=eu-milk-yield-herds_en.pdf&prefLang=es . Obtenido 22 de septiembre 2024.
- FAO (2012) “Experiencias Exitosas De Integración Asociativa De Productores Lecheros Familiares: Tres Estudios De Caso En Nicaragua, Ecuador Y Paraguay” *Producción y Sanidad animal* pp25. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/04cd0521-87ae-46b8-9527-74e7877a4700/content>.
- FAO (2023) Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. Rome <https://doi.org/10.4060/cc9029en>.
- FAO (2024a) Smallholders in the value chain. Gateway to dairy production and products. <https://www.fao.org/dairy-production-products/socio-economics/smallholders-in-the-value-chain/es> Obtenido 24 de septiembre de 2024.
- FAO (2024b) “Cattle” Gateway to dairy production and products: <https://www.fao.org/dairy-production-products/dairy/cattle/es>. Obtenido: 14 de noviembre de 2024.
- FAOSTAT (2024) Crops and livestock products. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL> Obtenido 24 de septiembre de 2024.

- Fariña, S. Moreno, O. Candiotti, F. Villanueva, C. Ledezma, W. Moscoso, C. Cajarville, C. Charlón V. Abaunza, L. Viteri, A. Chirife, S. Herrera, D. Stirling, S. (2024) Milk production systems in Latin America and the Caribbean: Biophysical, socio-economic, and environmental performance. *Agricultural Systems*, vol. 218. 103987 <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103987>.
- FEDEGA (2024) Inventario ganadero. Federación Colombiana de Ganaderos, Fondo Nacional del Ganado. <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/inventario-ganadero>. Obtenido 13 de octubre del 2024.
- FEPALE (2011) Situación de la Lechería en América Latina y el Caribe en 2011. Informe producido en el ámbito del Observatorio de la cadena láctea de América Latina y el Caribe, pp 20-43.
- FEPALE (2019) Informe: Situación de la cadena láctea en América Latina en el 2018. Federación Panamericana de Lechería.
- FEPALE (2024a) El Sector Lácteo de América Latina su Contribución Ambiental, Nutricional, Social y Económica, <https://fepale.org/site/2021/06/22/documento-el-sector-lacteo-de-america-latina-su-contribucion-ambiental-nutricional-social-y-economica/>. Obtenido 21-10-2024.
- Finnveden, G. Potting, J. (2014) Life Cycle Assessment. *Encyclopedia of Toxicology. Reference Module in Biomedical Sciences*. Tercera Ed. pp 74-77. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00627-8>.
- Forster, P. Storelvmo, T. (2023) The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. pp. 923 – 1054, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>.
- Froldi, F., Lamastra, L., Trevisan, M., Mambretti, D., Moschini, M. (2022) Environmental impacts of cow's milk in Northern Italy: Effects of farming performance. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 363, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132600>.

- Galloway, C. Swanepoel, P.A. Haarhoff, S.J. (2024) A carbon footprint assessment for pasture-based dairy farming systems in South Africa. *Climate Change, Variability and Sustainable Food Systems. Volume II. Frontiers in Sustainable Food Systems.* <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1333981>.
- Garnsworthy, P.C. Difford, G.F. Bell, M.J. Bayat, A.R. Huhtanen, P. Kuhla, B. Lassen, J. Peiren, N. Pszczola, M. Sordo, M. Visker, M.H. Yan, T. (2019) Comparison of Methods to Measure Methane for Use in Genetic Evaluation of Dairy Cattle. *Animals.* Vol. 9(10), 837. <https://doi.org/10.3390/ani9100837>.
- Gillman S. (2015) “Can we make cow burps climate-friendly?”, *Horizon The EU Research e Innovation Magazine.* European Commission. <https://projects.research-and-innovation.ec.europa.eu/en/horizon-magazine/can-we-make-cow-burps-climate-friendly>. Obtenido 03 de October del 2024.
- Gallo, L. Berton, M. Piazza M. Sturaro E. Schiavon, S. Bittante, G. (2024) Environmental impact of Holstein Friesian and 3-breed crossbred dairy cows using a life cycle assessment approach applied to individual animals. *Journal of Dairy Science* Volume 107. Issue 7. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24106>
- Gómez-Miranda, A. Estrada-Flores, J.G. Morales-Almaraz, E. López-González, F. Flores-Calvete, G. Arriaga-Jordán, C.M. (2019) Barley or black oat silages in feeding strategies for small-scale dairy systems in the highlands of Mexico. *Canadian Journal of Animal Science.* Vol. 100 (2). <https://doi.org/10.1139/cjas-2018-0237>.
- Gonzalez S. (2024) *Dairy and Products Annual.* United States Departmente of Agriculture, Foreign Agricultural Service. Global Agricultural Information Network. Report Number:CI2024-0025.
- González-Hernández, V. Callejas-Juárez, N. Rogers-Montoya, N. A. Martínez-García, C.G. Salinas-Martínez, J.A. Martínez-Castañeda, F.E. (2024) Economic and Financial Performance of Representative Small Scale Dairy Production Units To 2027, Tropical and Subtropical Agroecosystems. Vol. 27 (2). <http://doi.org/10.56369/tsaes.5174>.

- Grodkowski, G. Gołębiewski, M. Slószarz, J. Grodkowska, K. Kostusiak, P. Sakowski T. Puppel, K. (2023) Organic Milk Production and Dairy Farming Constraints and Prospects under the Laws of the European Union. *Animals*. Vol.13(9):1457 <https://doi.org/10.3390/ani13091457>
- Guo, J. Fu, Y. (2023) Green total factor productivity of dairy cows in China: essential facts from the perspective of regional heterogeneity. *Sec. Environmental Economics and Management. Front. Environ. Sci.* Vol.11 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1164770>.
- Hadfield, J. A. Waldron, B.L. Isom, S.C. Feuz, R. Creech, J.E. Rose, M.F. Long, J. Peel M.D. Miller R.L. Rood, K.A. Young, A. Stott, R. Sweat, A. Thornton K.J. (2021) The effects of organic grass and grass-birdsfoot trefoil pastures on Jersey heifer development: Heifer growth, performance, and economic impact. *Journal of Dairy Science*. Vol.104, Issue 10. pp.10863-10878. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19524>
- Hafla A. N., MacAdam J. W., Soder K. J. (2013) Sustainability of US Organic Beef and Dairy Production Systems: Soil, Plant and Cattle Interactions. *Sustainability*. Vol. 5(7) pp.3009-3034. <https://doi.org/10.3390/su5073009>.
- Harvatine, K. J. Bauman, D.E. McGuire, M.A. (2022) Mammary Gland, Milk Biosynthesis and Secretion: Milk Fat. *Encyclopedia of Dairy Sciences*. Academic press. Tercera Ed. pp 190-197. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00049-0>.
- Henderson, A.D. Asselin-Balençon, A. Heller, M.C. Burek, J. Kim, D. Lessard, L. Margini, M. Saad, R. Matlock, M.D. Thoma, G. Wang, Y. Jolliet, O. (2023) Spatialized Life Cycle Assessment of Fluid Milk Production and Consumption in the United States. *Sustainability*, vol. 15(3). pp.1890. <https://doi.org/10.3390/su15031890>.
- Huijbregts, M.A.J. Steinmann, Z.J.N. Elshout, P.M.F. Stam, G. Verones, F. Vieira, M.D.M. Hollander, A. Zijp, M. van Zelm, R. (2016) ReCiPe 2016 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization. National Institute for Public Health and the Environment. Ministry, Welfare and Sport. RIVM Report 2016-0104.

- IBGE (2021) PPM 2020: rebanho bovino cresce 1,5% e chega a 218,2 milhões de cabeças. Estatísticas Econômicas. <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/31722-ppm-2020-rebanho-bovino-cresce-1-5-e-chega-a-218-2-milhoes-de-cabecas>, obtenido 25 de octubre del 2024
- INECC (2018a) ¿Qué es el cambio climático? <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/que-es-el-cambio-climatico>. Obtenido 09 de noviembre de 2024
- INECC. (2018b) 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.
- INEGI (2010) Compendio de información geográfica municipal 2010, Texcoco- México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2023) Resultados Definitivos del Censo Agropecuario 2022. CENSO 2022 Agropecuario. Comunicado de prensa número 667/23. pp. 7-13.
- INEGI (2024) Texcoco, México. México en Cifras. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=070000150099#collapse-Resumen>. Obtenido 8 de diciembre de 2024.
- IPCC (2015) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Geneva, Switzerland, p. 151. ISBN 978-92-9169-143-2
- IPCC (2019) Chapter 10. Emissions From Livestock and Manure Management. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra, Suiza. pp.10-102.
- IPCC (2023) CLIMATE CHANGE 2023. Synthesis Report. Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change. pp.5-12. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- ISO (2006) ISO 14040 Gestión ambiental: evaluación del ciclo de vida: principios y marco. Organización Internacional de Normalización (ISO).

ISO (2006) ISO 14044 Gestión Ambiental Evaluación del ciclo de vida Requisitos y directrices. Organización Internacional de Normalización (ISO).

Józefiak, I. Sujodolov, T. Chiodo, G. Vargin, P. Kostykin, S. Smyshlyayev, S. Brönnimann, S. Yegorova, T. Peter, T. Rider, H. Sedlacek, J. Stenke, A. Rozanov, E. Koval, A. Razanov, E. et al., (2023) The Evolution of the Stratospheric Ozone - Volume II. *Frontiers in Earth Science, Atmospheric Science*: <https://www.frontiersin.org/research-topics/41402/the-evolution-of-the-stratospheric-ozone---volume-ii>.

Knapp, J.R. Laur, G.L. Vadas, P.A. Weiss, W.P. Tricarico, J.M. (2014) Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science* [Volume 97, Issue 6](#). pp.3231-3261. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7234>

Kononoff, P.J, Clark, K.J. (2017). Water Quality and requirements for dairy cattle. <https://extensionpublications.unl.edu/assets/html/g2292/build/g2292.htm>.

Lara G. (2024) Report Name: Dairy and Products Semi-annual. United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. Global Agricultural Information Network. Report number: MX2024-0026.

Lazzarini, B. Baudracco, J. Tuñón, G. Gastaldi, L. Lyons, N. Quattrochi, H. López-Villalobos N. (2019) Review: Milk production from dairy cows in Argentina: Current state and perspectives for the future. *Applied Animal Science*, Volume 35, Issue 4, pp 426-432, <https://doi.org/10.15232/aas.2019-01842>.

LICONSA (2024) Informe De Gestión Gubernamental 2018-2024. Liconsa, S.A. De C.V. Segalmex. Liconsa. pp 13.

Mannan, S. (2012) Chapter 40 - Sustainable Development, Lees' Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 2. Cuarta ed. pp 2507-2521. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397189-0.00040-9>.

- Martínez-González, J.C. Castillo-Rodríguez, S.P. Villalobos-Cortés, A. Hernández-Meléndez, J. (2017) Sistemas de Producción con Rumiantes en México. Ciencia Agropecuaria. Vol. 26. pp. 132-152.
- Moreira, V.H. Bravo-Ureta, B.E. (2016) Total factor productivity change in dairy farming: Empirical evidence from southern Chile. Journal of Dairy Science. Volume 99. Issue 10 pp. 8356-8364. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2016-11055>.
- National Dairy Development Board (NDDDB) (2023) Annual Report 2022-23. National Dairy Development Board. pp 15-60. https://www.nddb.coop/sites/default/files/pdfs/NDDDB_AR_2023_090124_Eng.pdf.
- Novokshanova, A. L. Matveeva, N. O. Nikityuk, D. B. (2023) Analysis of milk consumption and dairy products of the Russian population using an online survey. Food Science & Nutrition. Vol. 12, Issue 2 pp. 933-942. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3808>.
- OCLA (2024) ARGENTINA: Ranking de Industrias Lácteas 2023/2024. Informes-noticias. <https://www.ocla.org.ar/noticias/30761739>. obtenido 26 de octubre de 2024.
- O'Brien, D., Hennessy, T., Moran, B. Shalloo, L. (2015) Relating the carbon footprint of milk from Irish dairy farms to economic performance. Journal of Dairy Science. Vol. 98, Issue 10, pp. 7394-7407. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-9222>.
- OECD/Food and Agriculture Organization of the United Nations (2024) OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033. Paris and Roman. pp. 178-189. <https://doi.org/10.1787/4c5d2cfb-en>.
- Posada-Domínguez, R.R. Enrique del Razo -Rodríguez, O. Almaraz-Buendía, I. Pelaez-Acero, A. Espinosa-Muñoz, V. Rebollar-Rebollar, S. Salinas-Martínez, J.A. (2018). Evaluation of comparative advantages in the profitability and competitiveness of the small-scale dairy system of Tulancingo Valley, Mexico. Tropical Animal Health and Production, 50:947–956 –956 <https://doi.org/10.1007/s11250-018-1516-8>
- Posadas-Domínguez, R.R. Arriaga-Jordán, C.M. Martínez -Castañeda, F.E. (2014) Contribution of family labour to the profitability and competitiveness of small-scale

dairy production systems in central Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, Vol. 46. pp. 235–240. <https://doi.org/10.1007/s11250-013-0482-4>

ReCiPe (2016) Life cycle assessment. PRé Sustainability B.V. All rights reserved. <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/> obtenido 05 de noviembre del 2024.

REDGATRO (2018) Estado del Arte Sobre Investigación e Innovación Tecnológica en Ganadería Bovina Tropical. CONACYT, INIFAP; UNAM, 2da Edición, ISBN 978-607-37-1114-2.

RIVM (2024) LCIA: the ReCiPe model, National Institute for Public Health and the Environment. Ministry of Health, Welfare and Sport. <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>, obtenido 05 de noviembre de 2024

Romeiko, X.X. Zhang, W. Zhang, X. Choi J.K. (2024) Spatially Explicit Life Cycle Global Warming and Eutrophication Potentials of Confined Dairy Production in the Contiguous US. *Environments*. Vol. 11(11) pp. 230. <https://doi.org/10.3390/environments11110230>

Rogers -Montoya (2024) Evaluación de las Cargas Ambientales en la Lechería Semiespecializada en Pequeña escala en el municipio de Texcoco, Estado de México. Tesis de doctorado, Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México.

SADER (2015) Ganadería Bovina y sus Derivados. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/ganaderia-bovina-y-sus-derivados#:~:text=Y%20dentro%20de%20la%20producci%C3%B3n,Fresian%20y%20Pardo%20Suiza%20Americana>.

SADER (2021) ¿Qué come el ganado? Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/que-come-el-ganado>. obtenido 02 noviembre 2024.

SAGARPA (1997) “Programa de producción de leche y de sustitución de las importaciones”, SAGARPA-Dirección General de Ganadería.

- SAGARPA (2018) Crece la producción de leche en México: SAGARPA. Representación AGRICULTURA Colima: <https://www.gob.mx/agricultura/colima/articulos/crece-la-produccion-de-leche-en-mexico-sagarpa-158944?idiom=es>. Obtenido 15 de noviembre de 2024.
- Santos-Carvalho, L. Willers, C.D. Soares, B.B. Nogueira, A.R. Almeida-Neto J.A. Rodrigues, LB. (2022) Environmental life cycle assessment of cow milk in a conventional semi-intensive Brazilian production system. Environmental Science and Pollution Research. vol. 29:21259–21274. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17317-5>
- SEMARNAT (2018) Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. INEGYCEI. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático pp.129-197.
- SENASICA. (2019). Manual de buenas prácticas pecuarias en unidades de producción de leche bovina. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Gobierno de México. 2019.
- SIACON (2024) Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. Servicio de Información agroalimentaria y pesquera, <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>. Obtenido 25 de agosto 2024
- SIAP (2024) Avance anual de la producción pecuaria https://nube.siap.gob.mx/avance_pecuario/# Obtenido 5 de septiembre 2024.
- Sims (2021) How a dairy cooperative transformed a community: Learning results from a Colombian case study. Social Sciences & Humanities Open. Vol.4. Issue 1. 100205. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2021.100205>.
- SiMaPro (2025a) “database”, SiMaPro, <https://simapro.mx/datos.html> obtenido: 21 de enero de 2025
- SiMaPro (2025c) “Agri-footprint database”, SiMaPro, <https://simapro.com/products/agri-footprint-database/> obtenido: 21 de enero de 2025.
- SiMaPro, (2025b) ecoinvent LCI database, SimaPro <https://simapro.com/products/ecoinvent/> obtenido: 21 de enero de 2025.

- Singaravadivelan, A. Sachin, P.B. Harikumar, S. Vijayakumar, P. Vindhya, M.V. Beegum Farhana F.M. Rameesa, K. K. Mathew, J. (2023) Life cycle assessment of greenhouse gas emission from the dairy production system — review. *Tropical Animal Health and Production*. Vol. 55:320. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03748-4>.
- Stoychev V. Ivanov B. (2021) Comparison of Competitiveness Between Bulgaria, EU, USA, and New Zealand Dairy Sectors. *International Scientific Conference 'Economic Sciences for Agribusiness and Rural Economy*. No 5. pp.70–75. DOI: 10.22630/ESARE.2021.5.9.
- Tan, B. Yin, Y. (2017) Environmental Sustainability Analysis and Nutritional Strategies of Animal Production in China. *Annual Review of Animal Biosciences* Vol. 5. pp.171-184. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-022516-022935>
- Thompson, M. Ellis, R.J. Wildavsky, A. Wildavsky, M. (1990) *Cultural Theory*. Westview Press: Boulder, CO. Primera edición. ISBN 9780813378640.
- Toledo Alvarado, H.O. Ruiz López, F.J. Vázquez Peláez, C.G. Berruecos Villalobos, J.M. Elzo M.A. (2014) Parámetros genéticos para producción de leche de ganado Holstein en dos modalidades de control de producción. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, Vol. 5 Núm. 4: 443-457.
- Trade Development Authority of Pakistan (TDAP) (2022) *Pakistan Dairy Industry*, Ministry of Commerce. www.tdap.gov.pk. Obtenido 18 de September de 2024.
- USDA (2024a) U.S. Dairy Products Exports in 2023. *Dairy Products*. <https://fas.usda.gov/data/commodities/dairy-products>. Obtenido 19 de septiembre del 2024.
- USDA (2024b) *Milk Production*, National Agricultural Statistics Service (NASS), Agricultural Statistics Board. United States Department of Agriculture. National Agricultural Statistics Service.

- USDA/ ATTRA (2012) Guide for Organic Livestock Producers. National Center for Appropriate Technology (NCAT) Agriculture Specialists.
- Van Soest, P.J. (1994) Nutritional Ecology of the Ruminant. Cornell University Press. Comstock publishing associates. 2da ed. pp. 1-7.
- Vásquez- León, M. Burke, B.J. Finan, T.J. (2017). Cooperatives, grassroots development, and social change: Experiences from rural Latin America. The University of Arizona Press. ISBN-13: 978-0-8165-4172-0. pp. 4-8.
- Vera-Ávila, H. R. Hernández-Andrade L. Espinosa-García, J.A. Ortega-Reyes, L. Diaz-Aparicio, E. Román-Ponce, H. Núñez-Hernández, G. Medina-Cruz, M. Ruíz-López, F.J. (2009) Producción de Leche de Bovino en el Sistema Familiar. Centro de Investigación Regional Golfo Centro, INIFAP, I.S.B.N 978-607-425-269-9.
- Villavicencio-Gutiérrez, M.R., Rogers-Montoya, N.A., Martínez-Campos, R. et al. The environmental performance of different pork production scenarios: a life cycle assessment study. *Trop Anim Health Prod* 54, 44 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03045-6>
- Vinci, C. (2024) The EU dairy sector, Main features, challenges and prospects. *European Parliamentary Research Service*. Briefing. pp. 630.345.
- Vroegindewey, R. Richardson R.R. Chung, K. Theriault, V. Ramírez Ortega, D. (2021) “Competitive advantage and processor demand for local and imported food ingredients: analysis from an urban dairy market in West Africa. *The Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*. Vol. 11, Issue 2, pp 140 – 159, <https://doi.org/10.1108/JADEE-06-2020-0133>.
- de Vries. M., de Boer, I. J. M. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128(1–3), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>.
- Wisser, D. Grogan, D.S. Lanzoni, L. Tempio, G. Cinardi, G. Prusevich, A. Glidden, S. (2024) Water Use in Livestock Agri-Food Systems and Its Contribution to Local Water

Scarcity: A Spatially Distributed Global Analysis †. *Water*. Vol.16(12) pp.1681
<https://doi.org/10.3390/w16121681>.

Wright E. (2018) Cattle. *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*, Wiley Online Library. DOI: 10.1002/9781119188230.saseas0073

Yankelevich A. (2023) Report Name: Dairy and Products Annual. United States Departmente of Agriculture. Foreign Agricultural Service. Report number: AR2023-0017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117150>