



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD XOCHIMILCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA Y ANIMAL
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL QUESO TIPO OAXACA
EN PRODUCTOS LÁCTEOS GALVÁN MEDIANTE
ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

T E S I S

(IDÓNEA COMUNICACIÓN DE RESULTADOS)

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS

PRESENTE

L.P.A. Yei Lolbe Villareal Castillo

CÓMITE TUTORAL

DIRECTOR

Dr. Ramón Soriano Robles

CODIRECTOR

Dr. Daniel Vega Martínez

ASESORA

Dra. Leidy Rivera Sánchez

No de acta: 281

Ciudad de México, febrero de 2025.

COMITÉ TUTORAL

DIRECTOR

Dr. Ramón Soriano Robles

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa
División de Ciencias Biológicas y de la Salud
Departamento de Biología de la Reproducción
Profesor Investigador Titular "C"

CODIRECTOR

Dr. Daniel Vega Martínez

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco
División de Ciencias Biológicas y de la Salud
Departamento de Producción Agrícola y Animal
Profesor Asociado "D"

ASESORA

Dra. Leidy Rivera Sánchez

Consultor independiente
Recursos socioambientales y pequeños rumiantes

Jurado designado por la Comisión académica de la Maestría en Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma Metropolitana para la tesis titulada: **Evaluación ambiental del queso tipo Oaxaca en Productos Lácteos Galván mediante Análisis del Ciclo de Vida.**

Que presentó: L.P.A. Yei Lolbe Villareal Castillo

JURADO DEL EXAMEN

PRESIDENTE

Dra. Beatriz Sofía Schettino Bermúdez

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco
División de Ciencias Biológicas y de la Salud
Departamento de Producción Agrícola y Animal
Profesor Investigador Titular A

SECRETARIO

Dr. Alejandro Avalos Rodríguez

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco
División de Ciencias Biológicas y de la Salud
Departamento de Producción Agrícola y Animal
Profesor Investigador Titular C

VOCAL

Dra. Leidy Rivera Sánchez

Consultor independiente
Recursos socioambientales y pequeños rumiantes

Agradecimientos

Agradezco el respaldo de CONAHCYT, el cual fue fundamental para mi desarrollo académico. Gracias a esta beca, pude participar en proyectos de investigación y adquirir conocimientos especializados que de otra manera hubieran sido difíciles de alcanzar.

Al mismo tiempo, agradezco el continuo apoyo, paciencia y motivación de mis asesores de tesis, los doctores: Ramón Soriano Robles y Daniel Vega Martínez quienes siempre estuvieron en la mejor disposición de apoyar y revisar este trabajo. De la misma manera, agradezco las aportaciones de la Dra. Leidy Rivera Sánchez para este trabajo.

Quiero externar mi agradecimiento a Productos Lácteos Galván por darme la confianza y abrirme las puertas de su microempresa, permitiéndome la continuación de esta investigación.

Agradezco a mi familia su apoyo incondicional, su paciencia y su constante motivación. Gracias a su amor he podido llegar hasta donde ahora me encuentro.

Finalmente, agradezco a cada uno de mis amigos, quienes me han acompañado a lo largo de los años, y a las nuevas amistades que formé en este trayecto. Gracias por aplaudir cada uno de mis logros y por siempre estar presentes.

Gracias al apoyo de cada uno de ustedes, he podido superar desafíos y alcanzar metas que en su momento eran inalcanzables.

Los autores del presente agradecen al Consejo Nacional de Humanidades
Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de Maestría otorgada a la
Licenciada en Producción Animal Yei Lolbe Villareal Castillo con número de CVU
1232241

Dedicatoria

A la Universidad Autónoma Metropolitana, institución que me ha acompañado durante más de siete años. Desde el inicio, la UAM me brindó la oportunidad de explorar y desarrollarme en áreas desconocidas, abriendo puertas a un crecimiento personal y profesional que hoy celebro.

A lo largo de mi trayectoria en esta casa abierta al tiempo, he sido beneficiaria de valiosas oportunidades, experiencias enriquecedoras y conexiones significativas que han dejado una huella imborrable en mi vida. Esta universidad no solo ha sido el escenario donde cultivé grandes amistades, sino también el lugar que me ofreció mi primera oportunidad para crecer y desempeñarme profesionalmente. A la UAM, mi eterno agradecimiento y amor.

Finalmente, dedico esta tesis a mis fieles compañeros de estudio: Yoko, Valentina, Oso, Martha y Lulú, quienes me acompañaron durante los largos días y las largas noches de estudio. Aunque algunos de ellos cruzaron el arcoíris durante esta etapa, su recuerdo y amor incondicional siguen presentes. A cada uno de ellos, les agradezco por haber estado a mi lado, sobre todo a lo largo de este camino.

Contenido

Agradecimientos	IV
Dedicatoria	VI
Resumen	XII
Abstract.....	XIII
Introducción	1
Pregunta de investigación	3
Hipótesis	3
Objetivos de la investigación.....	3
Estructura de la tesis.....	3
I. Marco Referencial	6
1.1 La agroindustria láctea	6
1.2 La agroindustria quesera	12
1.2.1 Situación mundial de la agroindustria quesera.....	13
1.2.2 Situación nacional de la agroindustria quesera.....	17
1.3 Queso Oaxaca	19
1.4 Impacto ambiental de la agroindustria quesera.....	23
II. Marco teórico	30
2.1 Elaboración del queso Oaxaca	30
2.2 Sostenibilidad	35
2.3 Herramientas de gestión ambiental.....	41
2.4 Análisis del ciclo de vida	47
2.4.1 Normativa del ACV	49
2.4.2 Tipos de ACV.....	51
2.4.3 Alcances del ACV	51
2.4.4 Etapas del ACV.....	53
2.4.5 Softwares para el ACV.....	61
III. Marco metodológico.....	64
3.1 Delimitación espacial y temporal.....	66
3.2 Tipo de investigación	67
3.3 Diseño estadístico.....	68

3.4 Etapas del Análisis del Ciclo de Vida	69
3.4.1 Etapa 1: Definición del alcance y objetivos	69
3.4.2 Etapa 2: Análisis del inventario del ciclo de vida	74
3.4.3 Etapa 3: Evaluación del impacto	75
3.4.4 Etapa 4: Interpretación.....	80
IV. Resultados y discusión	80
4.1 Proceso de elaboración	80
4.2 Inventario de ciclo de vida.....	84
4.2.1 Entradas del proceso de producción.....	85
4.2.2 Salidas del proceso de producción	86
4.3 Evaluación de los impactos ambientales.....	86
V. Conclusiones	92
VI. Literatura citada	94

Contenido de tablas

Tabla 1. Composición nutricional de la leche.....	6
Tabla 2. Composición de la leche de tres razas bovinas lecheras	7
Tabla 3. Componentes de la leche	10
Tabla 4. Clasificación y tipos de quesos	14
Tabla 5. Valor nutricional del queso	15
Tabla 6. Tabla nutricional del queso Oaxaca	23
Tabla 7. Efluentes líquidos generados por la agroindustria láctea	27
Tabla 8. Tipos de herramientas de gestión ambiental.....	43
Tabla 9. Análisis del ciclo de vida enfocado en la agroindustria quesera	45
Tabla 10. Categorías de impacto ambiental	59
Tabla 11. Software utilizado en el análisis del ciclo de vida	62
Tabla 12. Bases de datos del software	63
Tabla 13. Métodos para el análisis del ciclo de vida	64
Tabla 14. Inventario del ciclo de vida del queso tipo Oaxaca identificado	75
Tabla 15. Selección de las categorías de impacto	78
Tabla 16. Inventario del queso tipo Oaxaca.....	84
Tabla 17. Contribución de impacto ambiental	88

Contenido de figuras

Figura 1. Esquema de la investigación.....	5
Figura 2. Principales países productores de leche bovina.....	8
Figura 3. Principales estados productores de leche bovina.....	9
Figura 4. Producción mundial de productos lácteos	11
Figura 5. Producción nacional de productos lácteos	12
Figura 6. Consumo mundial de productos lácteos.....	17
Figura 7. Producción nacional de queso	18
Figura 8. Municipio de los Reyes ETLA, Oaxaca, México	20
Figura 9. Queso Oaxaca	21
Figura 10. Principales fuentes de GEI en la ganadería	25
Figura 11. Principales productos que contribuyen a emisiones de GEI	25
Figura 12. Uso de agua a nivel mundial	26
Figura 13. Aspectos ambientales de la elaboración del queso	28
Figura 14. Elaboración del queso Oaxaca por acidificación	34
Figura 15. Dimensiones de la sostenibilidad	38
Figura 16. Línea del tiempo de cumbres y reuniones mundiales	39
Figura 17. Objetivos del Desarrollo Sostenible 2030.....	40
Figura 18. Evolución del ACV.....	48
Figura 19. Primeras normas del ACV	50
Figura 20. Alcances del ACV.....	52
Figura 21. Esquema del ACV de acuerdo la norma ISO 14040.....	53
Figura 22. Elementos considerados para el ICV	55
Figura 23. Indicadores del ACV.....	58
Figura 24. Metodología del ACV para la elaboración del queso tipo Oaxaca	65
Figura 25. Ubicación de la microempresa Productos Lácteos Galván.....	66
Figura 26. Trabajo de campo	67
Figura 27. Clasificación de la investigación.....	68
Figura 28. Queso tipo Oaxaca Productos Lácteos Galván	72
Figura 29. Planta Productos Lácteos Galván	73
Figura 30. Dimensión geográfica del ACV.....	74

Figura 31. Método ReCiPe.....	77
Figura 32. Tina de proceso.....	80
Figura 33. Adición de ácido láctico	80
Figura 34. Cortado del gel con liras.....	81
Figura 35. Liberación del suero	81
Figura 36. Movimiento del grano	81
Figura 37. Asentado del grano	81
Figura 38. Molido de la masa	82
Figura 39. Fundido de la masa.....	82
Figura 40. Alargado de las correas.....	82
Figura 41. Salado por frotación	82
Figura 42. Límites del sistema y diagrama de bloques del ciclo de vida del queso tipo Oaxaca.....	83
Figura 43. Análisis de 1 kg de Queso tipo Oaxaca por el método ReCiPe	87

Resumen

La agroindustria quesera es una de las principales fuentes de impacto ambiental dentro del sector agroalimentario, debido a su elevado consumo de agua, el uso intensivo de energía y la generación de aguas residuales con alta carga orgánica y química. Este estudio evaluó los efectos ambientales de la producción de queso tipo Oaxaca en la microempresa *Productos Lácteos Galván* mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con el objetivo de identificar los procesos con mayor contribución negativa y proponer estrategias de mitigación.

Se adoptó un enfoque "de la puerta a la puerta", abarcando desde la recepción de la leche hasta la obtención del producto final. La evaluación se realizó con el software SimaPro y las bases de datos Agri-footprint y Ecoinvent. Los resultados señalaron al ácido láctico y la leche en polvo como los insumos con mayor contribución ambiental negativa. El ácido láctico representó más del 45% del impacto total, destacando en la escasez de recursos fósiles (81.1%) debido a su alto consumo de gas natural en la producción y contribuyendo en un 66.9% a la eutrofización. Por su parte, la leche en polvo destacó en la categoría de cambio climático, aportando el 30.1% del impacto total, principalmente por las emisiones de metano derivadas de la fermentación entérica del ganado lechero y las emisiones de dióxido de carbono provenientes del uso de combustibles fósiles en su producción y procesamiento.

Para reducir estos efectos, las estrategias de mitigación de impacto deben centrarse en la optimización del consumo de agua y energía, así como en la búsqueda de insumos con menor carga ambiental. Este estudio proporciona información clave para la implementación de prácticas más sostenibles en la industria quesera mexicana, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental en su producción

Abstract

The cheese agroindustry is one of the main sources of environmental impact within the agri-food sector due to its high water consumption, intensive use of energy and the generation of wastewater with a high organic and chemical loads. This study evaluated the environmental effects of Oaxaca-type cheese production at the small enterprise *Productos Lácteos Galván* using Life Cycle Assessment (LCA), with the objective of identifying the processes with the highest negative contributions and proposing mitigation strategies.

A “gate-to-gate” approach was adopted, covering everything from milk reception to the final product. The assessment was conducted using SimaPro software and the Agri-footprint and Ecoinvent databases. The results indicated lactic acid and powdered milk as the inputs with the greatest negative environmental contribution. Lactic acid accounted for more than 45% of the total impact, highlighting the scarcity of fossil resources (81.1%) due to its high consumption of natural gas in production and contributing 66.9% to eutrophication. Meanwhile, powdered milk was highlighted in the climate change category, contributing 30.1% of the total impact, mainly due to methane emissions derived from enteric fermentation of dairy cattle and carbon dioxide emissions from the use of fossil fuels in its production and processing.

To mitigate these effects, impact mitigation strategies should focus on optimizing water and energy consumption, as well as seeking inputs with a lower environmental burden. This study provides key information for the implementation of more sustainable practices in the Mexican cheese industry, contributing to the reduction of the environmental impact in its production.

Introducción

La agroindustria quesera destaca como una de las principales fuentes de contaminación en el sector agroalimentario, contribuyendo significativamente al estrés hídrico y al cambio climático (Bachmann et al., 2008; Rajeshwari et al., 2000). Problemas que se agravan debido al crecimiento poblacional y a los cambios en los patrones de producción (Palhares y Pezzopane, 2015; Pfister et al., 2009; Ridoutt et al., 2012).

A nivel global, la ganadería, base de la agroindustria quesera, es responsable del 62% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector agropecuario, destacando el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el amoníaco (NH_3) como los principales contribuyentes (Baldini et al., 2018; Glover et al., 2023; Herron et al., 2022; Naranjo et al., 2023). Estas emisiones provienen de fuentes como: la fermentación entérica del ganado, la gestión del estiércol, el uso de fertilizantes y pesticidas en los cultivos de forraje (Alves et al., 2019; Dalla Riva et al., 2017; Finnegan et al., 2017; González-García et al., 2013b; Üçtuğ, 2019), así como de la orina y las heces depositadas en los pastos o aplicadas como fertilizantes (Baldini et al., 2018; Bartl et al., 2011; Carvalho et al., 2022). Estos contribuyen al calentamiento global y afectan negativamente los ecosistemas al causar acidificación y eutrofización de suelos y cuerpos de agua (Bartl et al., 2011; Del Prado et al., 2013; Pirlo et al., 2014).

Por su parte, la agroindustria quesera consume grandes volúmenes de agua, destinando entre el 25% y el 40% de su uso total a tareas de limpieza e higienización (Adamovici y Ghinea, 2021). Por cada litro de leche procesada, se generan entre 1 y 10 litros de aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica y productos químicos, que contribuyen a la contaminación de los cuerpos de agua (Mirabella et al., 2014; Prazeres et al., 2012; Salas-Vargas et al., 2021). Además, durante el proceso de producción se genera suero, un subproducto con una elevada carga orgánica. Si no se gestiona adecuadamente, puede convertirse en un contaminante significativo debido a su alto potencial para alterar los ecosistemas (Bachmann et al., 2008; Vicencio-De la Rosa et al., 2015).

El impacto ambiental generado por los procesos productivos de la agroindustria quesera se ha convertido en un tema de creciente importancia. El queso, como un producto esencial del sector agroalimentario, destaca por su alta demanda y su amplia versatilidad en la gastronomía a nivel global (FIRA, 2023; Milke García, 2011; O'Brien y O'connor, 2017). No obstante, su producción enfrenta retos importantes que generan impactos negativos en el ambiente (Ghinea y Leahu, 2022; Lovarelli et al., 2022; Mech et al., 2023; Triky y Kissinger, 2022).

En México, la producción de queso tiene una gran importancia económica y cultural, entre sus variedades más representativas se encuentra el queso Oaxaca, cuya producción industrial alcanzó las 40,778 toneladas en 2023 (CANILEC, 2024). Reconocido por su sabor y calidad, el queso Oaxaca no solo es un icono de la cocina mexicana, sino que también ha ganado popularidad en los mercados internacionales. Sin embargo, su producción enfrenta desafíos importantes relacionados con la sostenibilidad, como el manejo del suero el uso intensivo de agua, energía y la generación de residuos (Salas-Vargas et al., 2021).

En este contexto, es fundamental evaluar los impactos ambientales asociados a la producción del queso. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se presenta como una herramienta clave para identificar puntos críticos en los procesos productivos y desarrollar estrategias sostenibles (Bjørn et al., 2018d; Farjana et al., 2021). Esta metodología permite evaluar los impactos ambientales en todas las etapas del ciclo de vida de un producto, considerando las entradas y salidas del sistema, como recursos, energía y emisiones (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2006a). Así, el ACV facilita la toma de decisiones informadas y promueven la transformación de desafíos ambientales en oportunidades de mejora y sostenibilidad dentro de la agroindustria alimentaria (Aguirre-Villegas et al., 2015; Bava et al., 2018; Bjørn et al., 2018C; Santos et al., 2016).

Considerando los desafíos ambientales, económicos y culturales asociados a la producción del queso tipo Oaxaca, este estudio es crucial para proporcionar una comprensión integral de su impacto ambiental y guiar la implementación de estrategias sostenibles en la industria quesera en México. Por lo cual se planteó la siguiente pregunta de investigación y objetivos.

Pregunta de investigación

¿Cuál es el impacto ambiental asociado a la producción de queso tipo Oaxaca por la microempresa Productos Lácteos Galván, según la evaluación del análisis del ciclo de vida?

Hipótesis

El impacto ambiental derivado de la producción de queso tipo Oaxaca por la microempresa Productos Lácteos Galván, evaluado mediante el análisis del ciclo de vida, será menor que el promedio reportado en la literatura en términos de eutrofización, cambio climático, escasez de recursos fósiles y consumo de agua.

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Evaluar el impacto ambiental de la producción de queso tipo Oaxaca por la microempresa Productos Lácteos Galván mediante el ACV.

Objetivos específicos

1. Identificar el inventario del ciclo de vida en la producción de queso tipo Oaxaca por la microempresa Productos Lácteos Galván, desde la recepción de la leche hasta la obtención del producto final.
2. Evaluar los impactos ambientales generados en la producción de queso tipo Oaxaca por la microempresa Productos Lácteos Galván, con base en el inventario del ciclo de vida.
3. Proponer recomendaciones para reducir los impactos ambientales identificados en la evaluación del ciclo de vida de la producción de queso tipo Oaxaca por la microempresa Productos Lácteos Galván.

Estructura de la tesis

Esta investigación se estructuró en cinco apartados, como se muestra en la Figura 1, y cada uno de ellos proporciona información relevante para responder a la pregunta de investigación y alcanzar los objetivos propuestos.

El primer apartado, la introducción, aborda los elementos más relevantes para el desarrollo del estudio, proporcionando una perspectiva general sobre el planteamiento del problema y la justificación del estudio. El marco referencial incluye estadísticas clave sobre la producción y la relevancia de la agroindustria quesera, así como los impactos ambientales derivados de sus actividades. Por su parte, el marco teórico detalla los principios fundamentales para llevar a cabo un ACV, explicando su diseño, desarrollo, modelado y evaluación.

El marco metodológico describe en detalle el enfoque utilizado para cumplir los objetivos específicos del estudio, centrados en analizar el impacto ambiental asociado a la producción del queso tipo Oaxaca en la microempresa Productos Lácteos Galván.

El cuarto apartado contiene los resultados y la discusión, donde se presenta la evaluación del impacto ambiental en la elaboración del queso tipo Oaxaca y la comparación con otros estudios. Finalmente, el apartado de conclusiones sintetiza los hallazgos en relación con la hipótesis planteada.

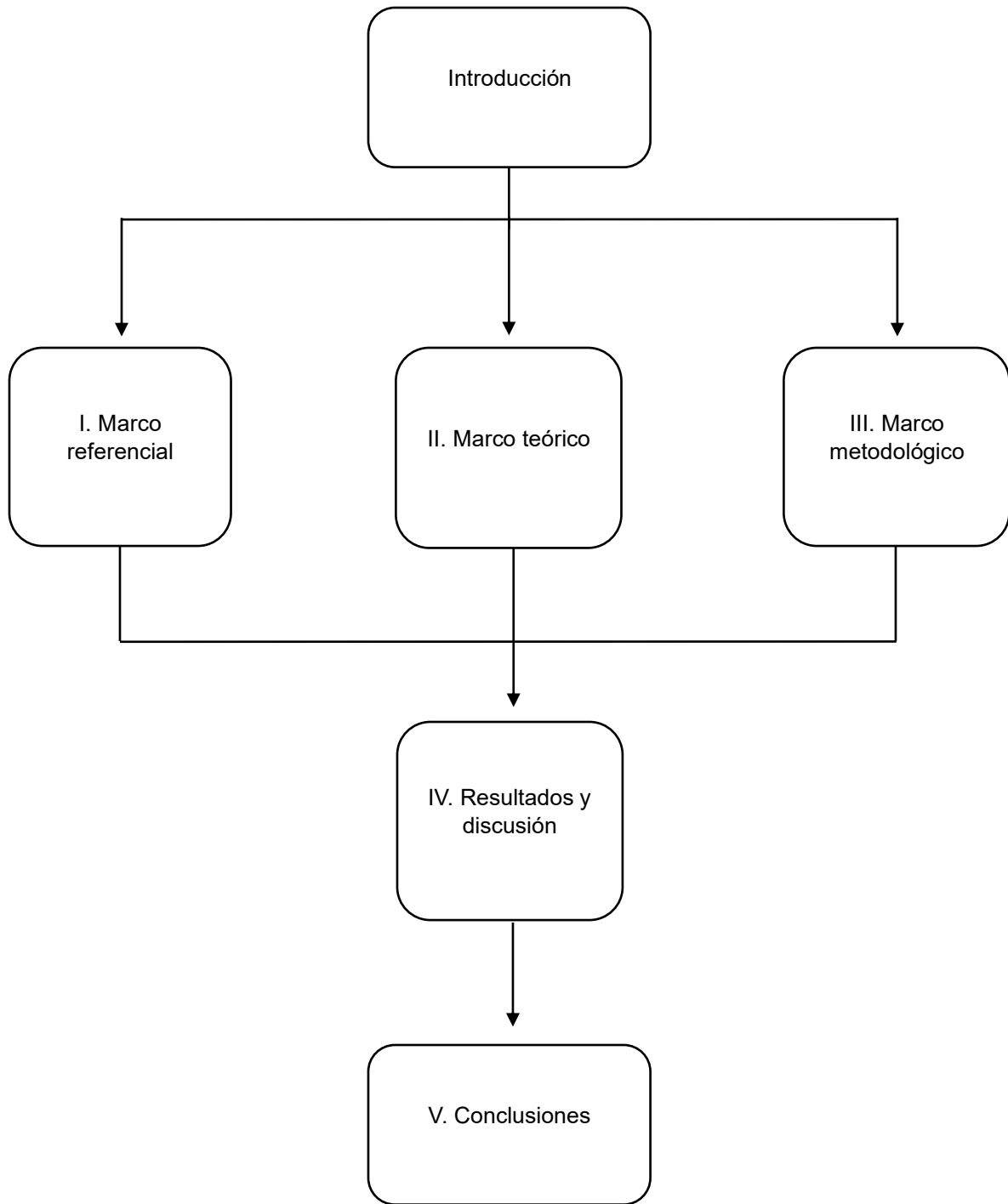


Figura 1. Esquema de la investigación

Fuente: elaboración propia.

I. Marco Referencial

1.1 La agroindustria láctea

Desde la domesticación del ganado, la leche ha sido un alimento esencial en la dieta humana (Guarín Patarroyo y Restrepo Ochoa, 2020; Khan et al., 2019; Valdivia Avila et al., 2021). Además de aportar energía, contiene macronutrientes como proteínas (caseínas) y lípidos, así como vitaminas y minerales, especialmente calcio y fósforo, que son micronutrientes esenciales, como se detalla en el Tabla 1 (Agudelo Gómez y Bedoya Mejía, 2005; Fernández Fernández et al., 2015; Wakida-Kuzunoki et al., 2019).

Tabla 1. Composición nutricional de la leche

Nutriente	Cantidad por 100 ml
Azúcares	4.8 g
Calcio	120 mg
Carbohidratos	4.8 g
Colesterol	10 mg
Energía	61 kcal
Grasas saturadas	2.1 g
Grasas totales	3.3 g
Grasas trans	0 g
Potasio	150 mg
Proteínas	3.2 g
Riboflavina (Vitamina B2)	0.18 mg
Sodio	44 mg
Vitamina A	47 µg
Vitamina B12	0.4 µg
Vitamina D	0.1 µg

Fuente: Cámara Nacional de Industriales de la Leche [CANILEC], 2011.

A nivel mundial, la mayoría de la producción de leche se origina del ganado bovino, especialmente de la raza Holstein Friesian, debido a su alto rendimiento, valor nutritivo y composición química como se observa en el Tabla 2 (Agudelo Gómez y Bedoya Mejía, 2005; Villegas de Gante, 2012; Villegas de Gante et al., 2016).

Tabla 2. Composición de la leche de tres razas bovinas lecheras

Nutriente (%)	Razas		
	Holstein Friesian	Pardo suiza	Jersey
Agua	87.72	86.87	85.47
Cenizas	0.68	0.72	0.70
Grasa	3.41	3.85	5.05
Lactosa	4.87	5.08	5.00
Proteína	4.32	3.48	3.78
Solidos totales	12.28	13.13	14.53

Fuente: elaboración propia con datos de Villegas de Gante, 2012.

Durante 2022, según los datos publicados por los Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA, 2023), la producción mundial de leche fluida (procesada para eliminar patógenos y garantizar su seguridad para el consumo humano) alcanzó las 658.3 millones de toneladas (mdt), de las cuales el 82.7% correspondió a leche bovina. India se destacó como el principal productor de leche, con 108,371,300 mdt, lo que representó el 13% del total mundial, como se refleja en la Figura 2. Le siguieron Estados Unidos, con 102,721,557 mdt (12% del total); Brasil, con 35,647,494 mdt (4% del total); y tanto China como Rusia, con 35,613,500 mdt y 32,738,522 mdt respectivamente, cada uno representando el 4% del total (CANILEC, 2024).

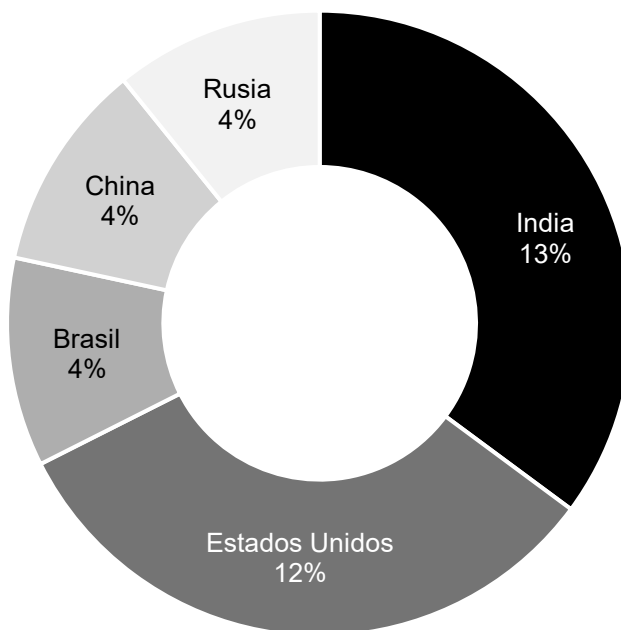


Figura 2. Principales países productores de leche bovina

Fuente: elaboración propia con datos de CANILEC, 2024.

México ocupó el 14° lugar en la producción mundial de leche bovina, alcanzando 13,497,999 mdt, lo que representó el 2% del total global (CANILEC, 2024; Sistema de Información Agrícola y Pesquera [SIAP], 2023). Los principales estados productores de leche bovina que contribuyeron fueron: Jalisco, con 2,799,301 miles de litros, lo que representó el 21.0% del total nacional; Coahuila, con 1,537,748 miles de litros (11.5%); Durango, 1,515,250 miles de litros, (11.4%); Chihuahua, 1,262,218 miles de litros (9.5%); y Guanajuato con 912,848 miles de litros, equivalente al 6.8% de la producción nacional, como se ilustra en la Figura 3 (FIRA, 2023; SIAP, 2023).

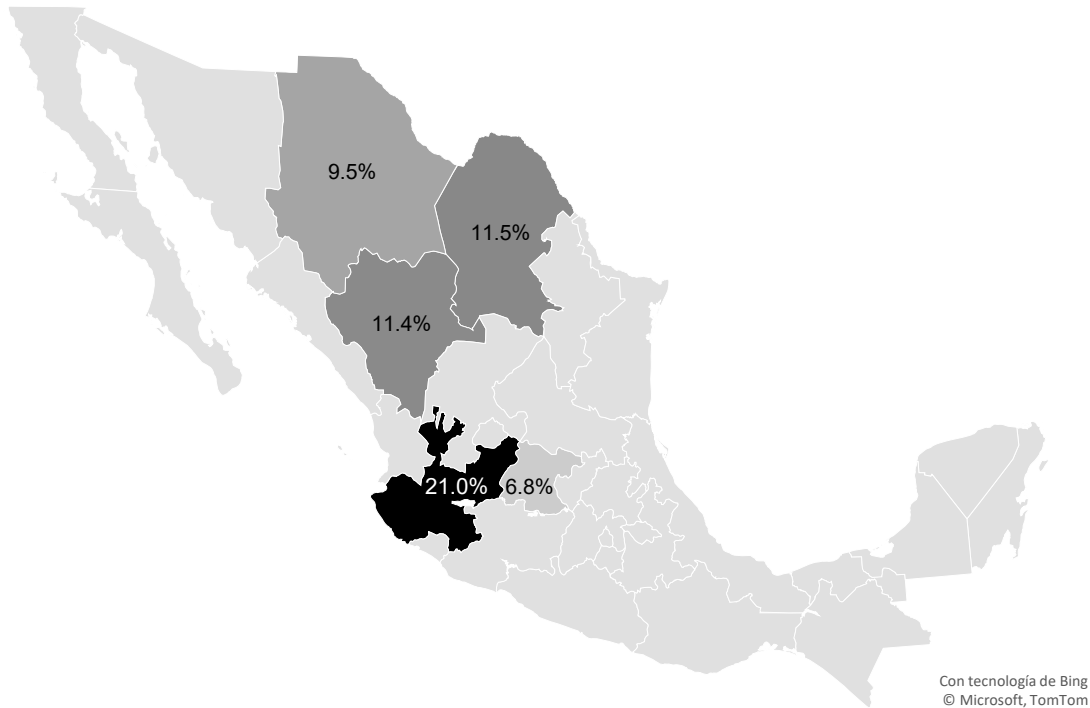


Figura 3. Principales estados productores de leche bovina

Fuente: elaboración propia con datos de SIAP, 2023.

El consumo mundial de leche alcanzó 657.6 mdt, de las cuales el 70% se destinó al uso industrial, mientras que el 29.3% se destinó al consumo humano (FIRA, 2023). Actualmente, la agroindustria láctea obtiene y transforma la leche en diversos productos lácteos para mejorar su valor nutritivo, lo cual es posible debido a sus propiedades (Tabla 3) que le confiere flexibilidad para ser transformada (Agudelo Gómez y Bedoya Mejía, 2005; Fox et al., 2015; Jensen, 1995; Moneeb et al., 2021).

Se estima que los productos lácteos constituyen entre el 25% y el 30% de la dieta promedio de un individuo (Mestres Lagarriga y Romero del Castillo, 2008), ya que son alimentos ricos en nutrientes que aportan cantidades significativas de energía, proteínas y micronutrientes, como calcio, magnesio, selenio, riboflavina, vitaminas B5 y B12 (Fox et al., 2015; Milke García, 2011; Miller et al., 2007).

Tabla 3. Componentes de la leche

Elemento	Porcentaje (%)
Agua	87.4
Caseína	2.8
Grasa	3.7
Lactosa	4.8
Minerales	0.7
Proteína	3.4

Fuente: elaboración propia con datos de Fox et al., 2015; Miller et al., 2007.

La transformación o separación de estos componentes da origen a una gran variedad de productos lácteos. Los cuales se clasifican en dos categorías: acidificados y fermentados (Maza Pastrano y Legorreta Cao, 2011). Los productos acidificados, se elaboran empleando agentes acidulantes, como el ácido láctico, que le confiere un sabor ácido y una textura espesa. Por otro lado, los productos fermentados, se obtienen por fermentación de la leche con microorganismos vivos, como las bacterias *Lactobacillus bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus* (CANILEC, 2011; Fox et al., 2015; Maza Pastrano y Legorreta Cao, 2011; Secretaría de Economía, 2012).

Los productos lácteos con mayor producción a nivel mundial son el queso, la mantequilla y la leche en polvo, con un total de 42.7 mdt. Como se muestra en la Figura 4, del volumen total, el 51.9% corresponde al queso, el 26.7% a la mantequilla y el 21.4% a la leche en polvo (FIRA, 2023).

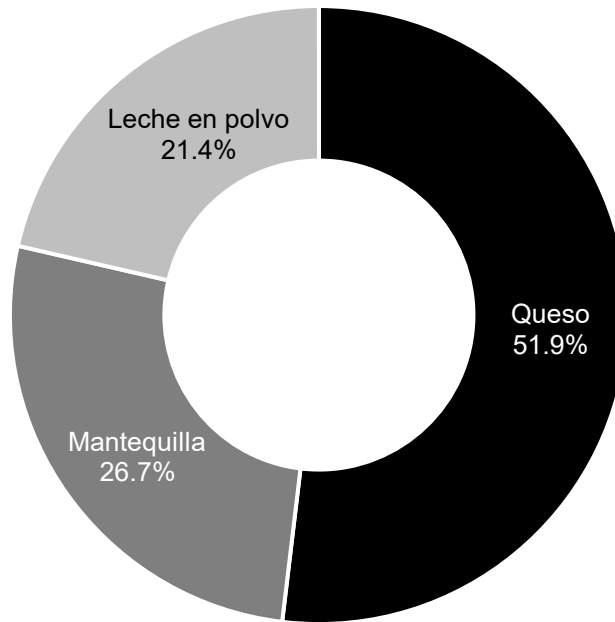


Figura 4. Producción mundial de productos lácteos

Fuente: elaboración propia con datos de FIRA, 2023.

A nivel nacional, la NOM-183-SCFI-2012 establece que los productos lácteos son aquellos elaborados con ingredientes de la leche, como la caseína, grasa, suero de leche y agua, destinados al consumo humano (Secretaría de Economía, 2012).

La producción de lácteos ocupó el cuarto lugar en el Producto Interno Bruto (PIB) de la agroindustria alimentaria en México, lo cual representó el 6% del total (CANILEC, 2024). Durante 2023, como muestra la Figura 5, la producción industrial se concentró principalmente en yogurt, con 769,508 toneladas (ton). La producción de quesos, incluyó variedades como Amarillo, Asadero, Chihuahua, Crema, Doble Crema, Fresco, Manchego, Oaxaca, Panela, y otros, alcanzó las 632,895 ton. Además, se produjo 90,129 ton de crema (ácida y natural) y 40,474 ton de mantequilla (CANILEC, 2024).

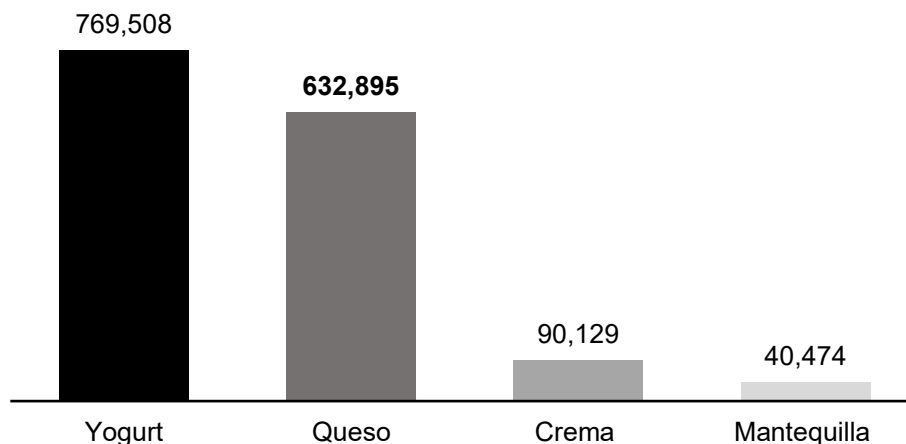


Figura 5. Producción nacional de productos lácteos

Fuente: elaboración propia con datos de CANILEC, 2024.

Estos datos subrayan la importancia de la producción quesera tanto a nivel mundial como nacional. La amplia diversidad de quesos existente no solo ofrece diferentes texturas, sabores y aromas que se adaptan a una variedad de gustos y platillos, sino que también refleja la historia cultural, la identidad y las prácticas culinarias de cada país.

1.2 La agroindustria quesera

La producción quesera es una de las prácticas más antiguas para preservar las propiedades de la leche. Su elaboración involucra transformaciones bioquímicas que convierten la leche en un producto con características organolépticas únicas (Villegas de Gante et al., 2016).

Aunque el origen exacto del queso sigue siendo incierto, existen diversas teorías e historias a lo largo del mundo que sugieren que fue un descubrimiento simultáneo entre diferentes civilizaciones (Battro, 2010; Mestres Lagarriga y Romero del Castillo, 2008). Las pruebas más antiguas están plasmadas en murales del Antiguo Egipto, que datan del 2300 a.C (Fox y MacSweeney, 2017; Roset, 2019).

Sin embargo, la leyenda más famosa relata que el queso fue descubierto por un comerciante árabe que, durante un viaje bajo el intenso sol del desierto, llevaba leche en un envase hecho del estómago de un cordero. Debido a las altas temperaturas y la acción de las enzimas del cuajo, la leche se coaguló, dando origen al queso (Battro, 2010; CANILEC, 2011; Roset, 2019). Actualmente, la agroindustria quesera se ha extendido por todo el mundo y ha ganado gran relevancia, consolidándose como una de las agroindustrias más importantes a nivel mundial.

1.2.1 Situación mundial de la agroindustria quesera

A nivel global, existe una gran diversidad de quesos que reflejan la disponibilidad de recursos naturales, así como los rasgos culturales y las tradiciones culinarias de cada región. La variedad de quesos se ve influenciada por múltiples factores, como el tipo de leche empleada, la especie animal de origen, los métodos de elaboración y, en algunos casos, el tiempo de maduración (McSweeney et al., 2017; O'Brien y O'Connor, 2017). La combinación de estos elementos da lugar a un extenso abanico de sabores, texturas y aromas que otorgan una identidad única a cada queso (Fox y MacSweeney, 2017; Rodiles-López et al., 2023).

El sector quesero clasifica los quesos en dos categorías principales: frescos y madurados. Los frescos destacan por su alto contenido de humedad, textura unttable, sabor ligero y una corta vida de anaquel. En contraste, los madurados se elaboran con la adición de microorganismos que promueven transformaciones físicas y químicas, dando lugar a pastas y cortezas duras o semiduras (Moncada Jiménez y Pelayo Consuegra, 2011). Estos quesos son sometidos a condiciones controladas de temperatura y humedad, lo que extiende su vida de anaquel (Secretaría de Economía y Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018; Villegas de Gante, 2012).

Los quesos son apreciados no solo por su valor nutritivo, sino también por su versatilidad para satisfacer las preferencias y necesidades de cada consumidor. El Tabla 4, muestra una clasificación de los quesos disponibles en el mercado.

Tabla 4. Clasificación y tipos de quesos

Clasificación		Tipos de quesos
Quesos frescos	Frescales	Adobado, Blanco, Canasto, Enchilado, Fresco, Panela, Ranchero, Sierra
	Pasta cocida	Adobera, Asadero, Morral, Mozzarella, Oaxaca
	Acidificados	Cottage, Doble crema, Neufchâtel, Petit Suisse
Quesos madurados	Prensados de pasta dura	Añejo, Grana Padano, Parmesano
	Prensados	Amsterdam, Brick, Butterkase, Cheddar, Cheshire, Chester, Chihuahua, Coulomiers, Dambo, Edam, Emmenthal, Erom, Friese, Fynbo, Gouda, Gruyere, Harzerkase, Havarti, Herrgardsost, Huskalsost, Jack Leidse, Manchego, Maribo, Norvergia, Port Salut, Provolone, Romadur, Saint Paulin, Samsoe, Svecia, Tilsiter
	Con mohos	Azul, Brie, Cabrales, Camembert, Danablu, Limburger, Roquefort

Fuente: elaborado con datos de Maza Pastrano y Legorreta Cao, 2011; McSweeney et al., 2017.

Los quesos aportan una variedad de nutrientes esenciales, como se observa en el Tabla 5, cuya concentración depende de la elaboración y tipo de leche utilizada. Los principales nutrientes presentes en el queso incluyen proteínas, lípidos, vitaminas como la A, B y D, además de minerales, especialmente calcio y fósforo (Fox y MacSweeney, 2017; Milke García, 2011; O'Brien y O'Connor, 2017; Rodiles-López et al., 2023).

Tabla 5. Valor nutricional del queso

Nutriente	Aporte (%)
Agua	37
Carbohidratos	3.5
Cont. Energético	403 kcal
Lípidos	33
Minerales	3.5
Proteínas	23
Vitamina A	39.4
Vitamina B1	5.3
Vitamina B2	20.6
Vitamina B5	9.0
Vitamina B6	8.2
Vitamina B12	80.0
Vitamina D	27.0

Fuente: elaboración propia con datos de O'Brien y O'Connor, 2017; Rodiles-López et al., 2023.

Los nutrientes del queso, especialmente el calcio, contribuye a prevenir enfermedades como la hipertensión y la osteoporosis (Milke García, 2011; O'Brien y O'connor, 2017; Sommer Finkelman, 2011). Además, el ácido fólico, junto con las vitaminas B6 y B12 contribuye mejorar la salud cardiovascular (Durán Agüero et al., 2015). En cuanto a los lípidos presentes en el queso, están formados aproximadamente de un 66% de ácidos grasos saturados, un 30% de ácidos grasos monoinsaturados y un 4% de ácidos grasos poliinsaturados (Higuera Marin et al., 2019). La concentración de colesterol varía en función del contenido de grasa, oscilando entre 10 y 100 mg por cada 100 g según la variedad. Aunque contiene una proporción elevada de grasas saturadas, investigaciones recientes indican que otros componentes, como el calcio, pueden contrarrestar los efectos negativos sobre los niveles de lípidos en la sangre, incluyendo el colesterol LDL y los triglicéridos (Durán Agüero et al., 2015).

El contenido proteico del queso puede variar significativamente, situándose entre un 3% y un 40% (Maza Pastrano y Legorreta Cao, 2011). Sin embargo, durante el proceso de elaboración, una fracción de las proteínas, equivalente al 2-3%, se transfiere al suero (O'Brien y O'Connor, 2017). Asimismo, la lactosa, principal carbohidrato de la leche, también se pierde en el suero, lo que lo convierte en un alimento apto para personas intolerantes a la lactosa. Condición causada por la deficiencia de la enzima β -galactosidasa, que afecta aproximadamente al 70% de la población adulta mundial (Martínez Vázquez et al., 2020; Miller et al., 2007).

En 2023, según datos de FIRA (2023), la producción mundial de queso alcanzó los 22.2 millones de toneladas, mostrando un incremento respecto al año anterior. La Unión Europea, con países como Italia, España y Francia, se consolidó como la principal región productora, aportando el 47.6% del total, seguida por Estados Unidos con el 28.6%.

Paralelamente, el queso representó el 53.5% del consumo total de productos lácteos, superando a la mantequilla con un 27.6% y la leche en polvo, con un 18.9% (Figura 6). La Unión Europea fue el mayor consumidor de queso en 2022, con una demanda de 9.4 millones de ton, equivalente al 44% del total mundial. Estados Unidos, con 6 millones de ton, representó el 28.3%. Ambos registran los mayores niveles de consumo per cápita, con 21.2 kg la Unión Europea y 17.4 kg Estados Unidos, superando el promedio mundial de 3.22 kg anuales. Asimismo, la Unión Europea es el principal exportador de queso, con el 46.3% de las exportaciones globales, lo que equivale al 13% de su producción. En cuanto a las importaciones, destacan Reino Unido y Rusia, con el 18.8% y el 16.2% del total mundial, respectivamente (FIRA, 2023).

El liderazgo de la Unión europea en la producción y exportación de quesos se debe a su tradición quesera, condiciones geográficas favorables para la producción lechera de alta calidad y la diversidad de quesos con Denominación de Origen Protegida (DOP), que garantiza su autenticidad y prestigio en el mercado global (Comisión Europea, s.f.).

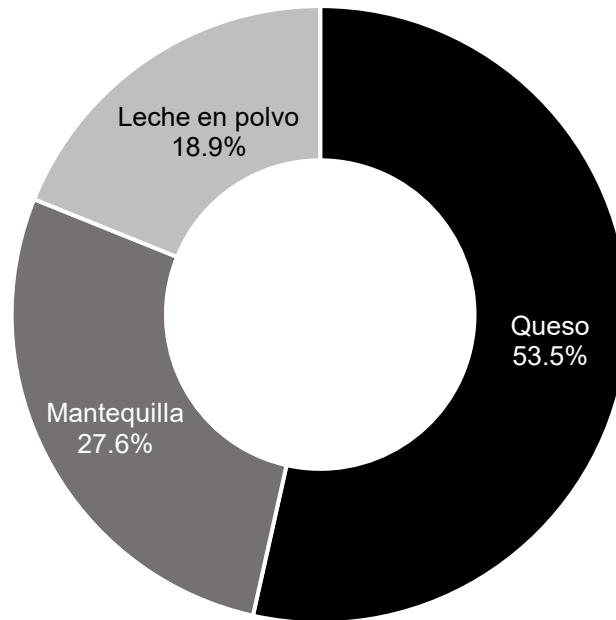


Figura 6. Consumo mundial de productos lácteos

Fuente: elaboración propia con datos de FIRA, 2023.

El sector quesero ha cobrado una creciente relevancia en el desarrollo económico. Mediante la producción y comercialización de una diversa gama de quesos, este sector no solo satisface la demanda interna, sino que también impulsa las exportaciones, generando importantes ingresos para las economías nacionales.

1.2.2 Situación nacional de la agroindustria quesera

En México, la NOM-223-SCFI/SAGARPA-2018 define el queso como un producto obtenido de la coagulación total o parcial de las proteínas de la leche, utilizando cuajo u otros coagulantes, seguido de la eliminación parcial del suero (Secretaría de Economía y Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018). A nivel nacional, se producen diversos quesos nacionales, considerados como quesos genuinos, elaborados principalmente con leche fluida de vaca y un mínimo de aditivos, como cuajo, colorante de achiote, cloruro de calcio y sal de mesa (Villegas de Gante et al., 2014).

El queso ocupa un lugar destacado entre los productos lácteos en México, representando el 46.2% de la producción total de derivados lácteos. Según datos del USDA, el consumo de queso en México alcanzó los 594 millones de toneladas

en 2022, con un consumo per cápita de 3.66 kg anuales, superando el promedio mundial de 3.22 kg (FIRA, 2023). El valor de las importaciones de queso en México creció un 34.6% interanual. En 2022, las importaciones mexicanas de queso alcanzaron un máximo histórico de 155 mil toneladas, según el USDA. Del total importado, el 87.2% provino de Estados Unidos, el 6.7% de la Unión Europea y el 3.2% de Nueva Zelanda (FIRA, 2023; USDA, 2023a).

En 2024, de acuerdo con los datos de CANILEC, la producción industrial de queso (Figura 7), se concentró en el queso Fresco con 125,602 ton; Doble Crema, 108,697 ton; Chihuahua, 75,568 ton; Amarillo, 63,001 ton; Panela, c 48,385 ton; Manchego, 46,759 ton; Oaxaca, 40,778 ton; Crema, 23,380 ton; y Asadero, 15,169 ton. Mientras que otros tipos de quesos fue de 85,556 ton.

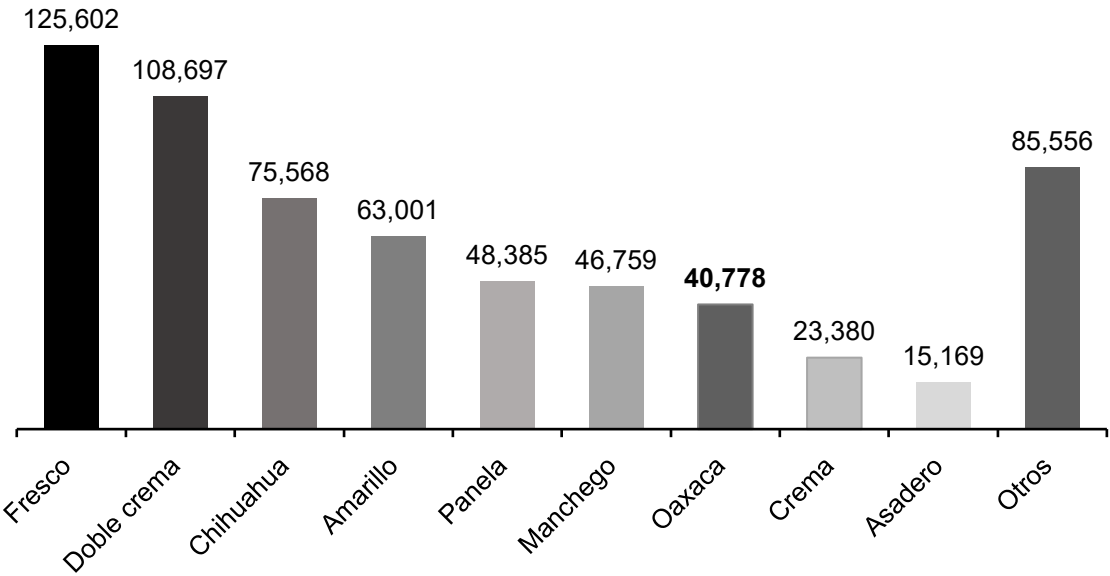


Figura 7. Producción nacional de queso

Fuente: elaboración propia con datos de CANILEC, 2024.

En el mercado nacional han surgido los denominados "quesos de imitación" o análogos, productos que sustituyen la grasa butírica (la fracción de grasa de la leche) y la proteína de la leche por ingredientes de origen vegetal (Fox et al., 2015; Guinee, 2017; Moncada Jiménez y Pelayo Consuegra, 2011).

Variedades como el queso Panela, Oaxaca y Chihuahua encabezan la lista de demanda y consumo en esta categoría. Aunque no existen datos estadísticos concretos, se estima que México es el principal productor mundial de quesos de imitación, debido, en gran parte, a los bajos costos de producción (Villegas de Gante et al., 2014).

El queso Oaxaca, sobresale tanto como un queso genuino como de imitación, consolidándose como uno de los más consumidos y apreciados tanto a nivel nacional como internacional. Su distintivo sabor y versatilidad en la cocina regional mexicana lo han convertido en un ingrediente esencial en numerosos platillos tradicionales. Este queso es elaborado mediante diversos métodos, que van desde procesos artesanales hasta técnicas industriales, lo que refleja su relevancia cultural y económica, posicionándolo como uno de los productos lácteos más emblemáticos e importantes de México (Ramírez-Nolla y Vélez-Ruíz, 2012; Villegas de Gante et al., 2014).

1.3 Queso Oaxaca

El queso Oaxaca, originario del municipio de los Reyes ETLA, en el estado de Oaxaca, México (Figura 8) (Camacho-Vera et al., 2020), ha ganado gran popularidad a nivel mundial debido a su textura y sabor. Actualmente, ocupa el lugar 26 del top 100 de los mejores quesos, según el portal Taste Atlas Awards (2023), destacándose como el único queso mexicano en dicha lista. Este portal se dedica a catalogar y mapear alimentos tradicionales de todo el mundo, con el propósito de preservar, documentar y promover la cocina local.



Figura 8. Municipio de los Reyes Etlá, Oaxaca, México

Fuente: elaboración propia.

Este queso se distingue por ser fresco y acidificado, de pasta cocida con textura suave, elástica, desmenuzable, pero con un cuerpo firme. Su color blanco cremoso y su sabor ligeramente ácido son características que lo identifican (Ramírez-Nolla y Vélez-Ruíz, 2012). Se elabora a partir de leche de vaca, y la cuajada se somete a un proceso de amasado en agua caliente, lo que permite estirar la masa y formar las bandas que se entrelazan, dándole su distintiva forma de bola, como se muestra en la Figura 9 (De Oca-Flores et al., 2009; De Oca et al., 2019; Villegas de Gante et al., 2014).



Figura 9. Queso Oaxaca

Fuente: elaboración propia.

Según la tradición oral, este queso surgió de manera accidental en 1884 gracias a Leobarda Castellanos García, quien, a los 14 años, al quedar a cargo del proceso de elaboración del queso fresco, noto que el punto de cuajada se había pasado y decidió colocar agua caliente sobre la masa, lo que provocó una consistencia elástica, dando origen al “quesillo” (Camacho-Vera et al., 2020).

Con el tiempo, la escasez de leche en la región y el desinterés de las nuevas generaciones por las actividades agropecuarias obligaron a la población a migrar hacia otros estados, lo que permitió la difusión de la elaboración del quesillo (Camacho-Vera et al., 2020). Este proceso se adaptó a los métodos modernos de la industria alimentaria. Debido a esta expansión, el queso Oaxaca es conocido de diferentes maneras: en el estado de Oaxaca se le llama "quesillo", mientras que en el resto de México se le conoce como "queso Oaxaca" o "queso de hebra" (Ramírez-Nolla y Vélez-Ruíz, 2012; Villegas de Gante et al., 2014). El queso Oaxaca en el mercado que posee características similares al tradicional, pero no cumple con los estándares normativos o de composición para ser etiquetados como queso genuino como lo indica la NOM-051-SCFI/SSA1-2010 y la NOM-223-SCFI/SAGARPA-2018 se denominan queso tipo Oaxaca (Secretaría de Economía y Secretaría de Salud, 2010; Secretaría de Economía y Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018).

De acuerdo con el INEGI, la producción industrial de queso Oaxaca en 2023 alcanzó las 40,778 ton. Ese mismo año, el índice nacional de precios al consumidor para productos lácteos situó el precio del queso Oaxaca en \$153.11 por kilogramo. Las importaciones de queso representaron el 28% del total de productos lácteos importados, ocupando el segundo lugar después de la leche en polvo. En cuanto a los gastos de los hogares mexicanos, el 9% del gasto promedio se destinó a productos lácteos como el queso (CANILEC, 2024).

A pesar de ser un queso mexicano de gran valor tradicional y comercial, el queso Oaxaca no cuenta con una denominación de Origen Protegida (DO). De acuerdo con la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial (2020), esta distinción protege a un producto al asociarlo a una zona geográfica específica donde se produce, influenciado por las materias primas y condiciones climáticas, así como los factores naturales y culturales, lo cual le otorga características únicas en el mercado (Granados Aristizábal, 2012; Montenegro y Cabrera, 2017). Aunque el queso Oaxaca posee una fuerte identidad regional y un amplio reconocimiento popular, la falta de uniformidad en su producción y su fabricación en diversas regiones han sido obstáculos para obtener esta distinción (Villegas de Gante, 2012).

Este queso es un símbolo de identidad cultural y culinaria en México, esencial en la cocina tradicional. Su textura única y su capacidad para fundirse lo hacen altamente versátil en una amplia variedad de recetas mexicanas (Villanueva-Carvajal et al., 2012). Además, de acuerdo con los datos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2023b) es una fuente rica en proteínas, calcio y otros nutrientes esenciales, lo que lo convierte en un alimento valioso en la dieta de muchas personas (Tabla 6). Su sabor y calidad han impulsado su reconocimiento fuera de México, abriendo mercados internacionales. Además de su valor gastronómico, el queso Oaxaca es parte del patrimonio cultural de México, representando las tradiciones y técnicas artesanales que se han transmitido de generación en generación, especialmente en el estado de Oaxaca (Ramírez-Nolla y Vélez-Ruíz, 2012; Villegas de Gante et al., 2014).

Tabla 6. Tabla nutricional del queso Oaxaca

Nutriente	Cantidad por 100 g
Agua	49.8 g
Calcio	532 mg
Carbohidratos	2.4 g
Ceniza	3.55 g
Energía	298 kcal
Fosforo	380 mg
Lípidos	22.1 g
Magnesio	21.6 mg
Potasio	81 mg
Proteína	22.1 g
Sodio	734 mg
Yodo	45.7 miligramos
Zinc	3.51 mg
Vitaminas	135 miligramos

Fuente: elaboración propia con datos de USDA, 2023b.

A nivel mundial y nacional, los quesos son una pieza clave en la alimentación. Sin embargo, para que cualquier queso llegue hasta la mesa del consumidor, atraviesa un complejo ciclo de producción que abarca desde la obtención de materias primas, hasta su procesamiento, empaque, distribución y comercialización. Cada una de estas etapas conlleva una serie de procesos que consumen recursos y generan emisiones, contribuyendo al impacto ambiental. Reconocer y analizar este impacto es esencial para diseñar estrategias sostenibles que permitan optimizar los procesos productivos.

1.4 Impacto ambiental de la agroindustria quesera

La agroindustria quesera está inmersa en una compleja red de efectos ambientales que deben ser abordados para avanzar hacia una gestión más sostenible.

La agroindustria láctea, desde la producción de leche hasta la elaboración del queso, depende intensamente de recursos naturales y amplias extensiones de tierra, lo que la convierte en una de las principales fuentes de impacto ambiental (Ghinea y Leahu, 2022; Lovarelli et al., 2022; Mech et al., 2023; Triky y Kissinger, 2022).

La producción de leche, insumo esencial para el queso, está vinculada con la ganadería bovina intensiva, que domina el uso de las tierras agrícolas a nivel mundial. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2023), el 70% de las tierras agrícolas se destinan a las actividades ganaderas, mientras que el 38% está dedicado a la agricultura; de esta última, dos tercios corresponden a praderas y pastizales utilizados para el forraje y alimentación del ganado. Este modelo productivo, juega un papel importante en las emisiones de GEI, como CH₄, N₂O y NH₃ (Baldini et al., 2018; Glover et al., 2023; Herron et al., 2022; Naranjo et al., 2023). El CH₄ proviene principalmente de la fermentación entérica del ganado y la gestión del estiércol, mientras que el N₂O surge del uso de fertilizantes y pesticidas en los cultivos de forraje (Alves et al., 2019; Dalla Riva et al., 2017; Finnegan et al., 2017; González-García et al., 2013b; Üçtuğ, 2019). Por su parte, el NH₃ se libera a partir de la orina y las heces del ganado en pastizales o cuando estas se aplican como fertilizantes (Baldini et al., 2018; Bartl et al., 2011; Carvalho et al., 2022). Además, los escurrimientos y lixiviaciones de compuestos como fosfatos, nitratos y NH₃ contribuyen a la acidificación y eutrofización de los suelos y cuerpos de agua (Bartl et al., 2011; Del Prado et al., 2013; Finnegan et al., 2017; Pirlo et al., 2014; Rivas-García et al., 2015).

De acuerdo con la FAO (2023), la ganadería bovina representa el 62% de las emisiones globales de GEI (Figura 10), superando a otros sectores ganaderos como la porcicultura (14%), la avicultura (9%), la ganadería bufalina (8%), la ovinocultura y caprinocultura (7%). Dentro de este sector, la producción de carne generó el 67% de las emisiones, mientras que la leche contribuyó con un 30% y el huevo un 3% (Figura 11).

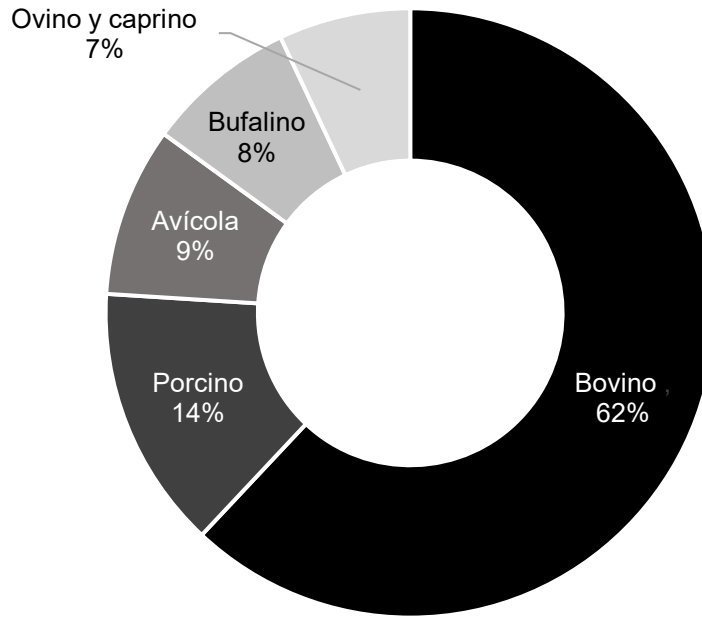


Figura 10. Principales fuentes de GEI en la ganadería

Fuente: elaboración propia con datos de FAO, 2023.

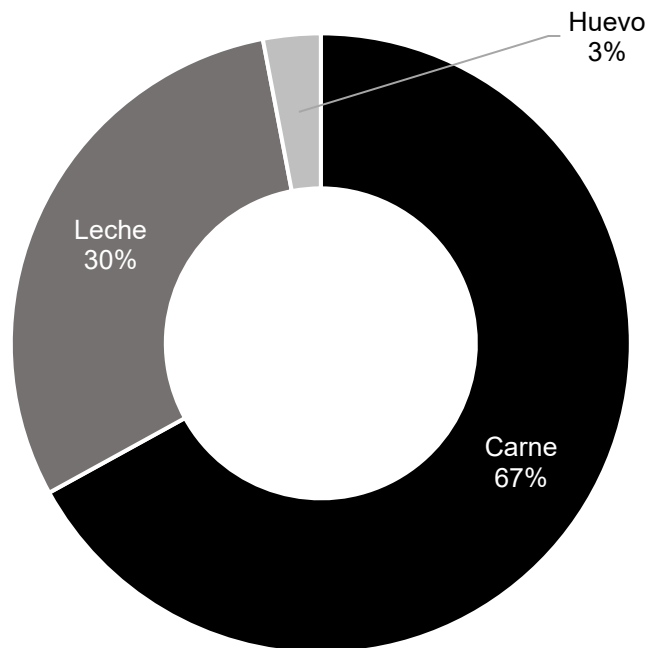


Figura 11. Principales productos que contribuyen a emisiones de GEI

Fuente: elaboración propia con datos de FAO, 2023.

En total, la cadena productiva, que abarca desde el cultivo de forraje hasta la distribución de productos finales, genera aproximadamente 6.2 gigatoneladas de CO₂ equivalente, evidenciando una huella de carbono significativa, la cual es una medida que abarca las emisiones de GEI relacionadas a las actividades antropogénicas.

Otro desafío ambiental de la agroindustria láctea es su huella hídrica, un indicador del agua dulce necesario para producir un bien (Hoekstra et al., 2015; Palhares y Pezzopane, 2015). Se estima que el 70% del agua dulce a nivel mundial se destina a la agricultura, principalmente al riego de cultivos forrajeros, mientras que el 22% se emplea en la industria y el 8% en el consumo doméstico (Figura 12) (Bai et al., 2018; Maguey, 2018; Owusu-Sekyere et al., 2017). Lo que se suma al uso intensivo de agua para limpiar establos y equipos de ordeño (Liao y Su, 2019).

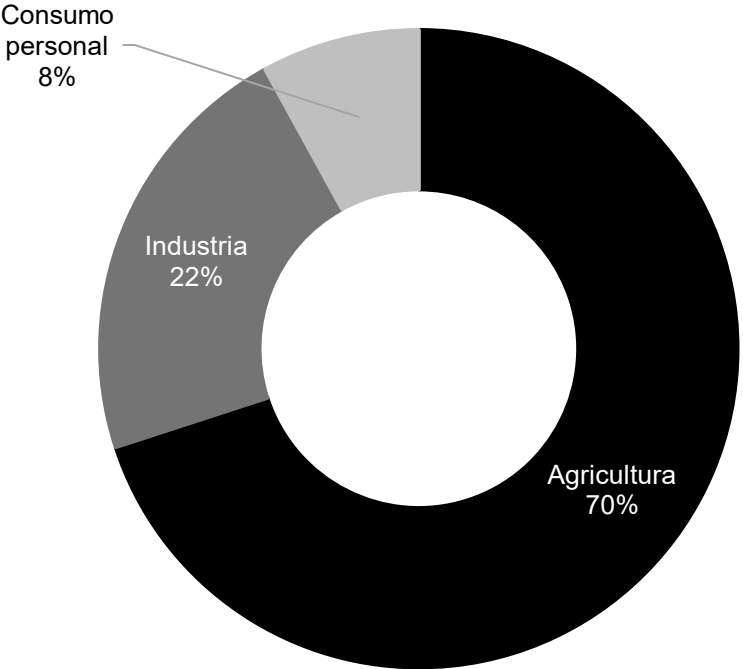


Figura 12. Uso de agua a nivel mundial

Fuente: elaboración propia con datos de Maguey, 2018.

Durante el procesamiento de la leche, por cada litro procesado se generan entre 1 y 10 litros de aguas residuales, las cuales contienen materia orgánica, nutrientes y químicos de limpieza (Tabla 7). Si no se gestionan adecuadamente, estas aguas disminuyen los niveles de oxígeno en los cuerpos hídricos, afectando los ecosistemas (Alves et al., 2019; González-García et al., 2013a; Santos et al., 2016; Vicencio-De la Rosa et al., 2015).

Tabla 7. Efluentes líquidos generados por la agroindustria láctea

Efluente	Característica
Alto contenido de materia orgánica	Presencia de componentes de la leche, la DQO media de las aguas residuales en la industria láctea oscila entre 1.000 y 6.000 mg/l
Presencia de aceites y grasas	Principalmente debido a la grasa de la leche, sobre todo en las aguas de lavado de la mazada
Elevados niveles de nitrógeno y fósforo	Provenientes de los productos utilizados para la limpieza y desinfección
Variaciones en el pH	Los vertidos pueden presentar valores de pH entre 2 y 11, debido al uso de soluciones ácidas y básicas en las operaciones de limpieza

Fuente: elaboración propia con datos de Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia [CAR/PL], 2002.

La elaboración del queso también implica un consumo considerable de recursos, generando emisiones y desechos que repercuten ambientalmente como se muestra en la Figura 13.

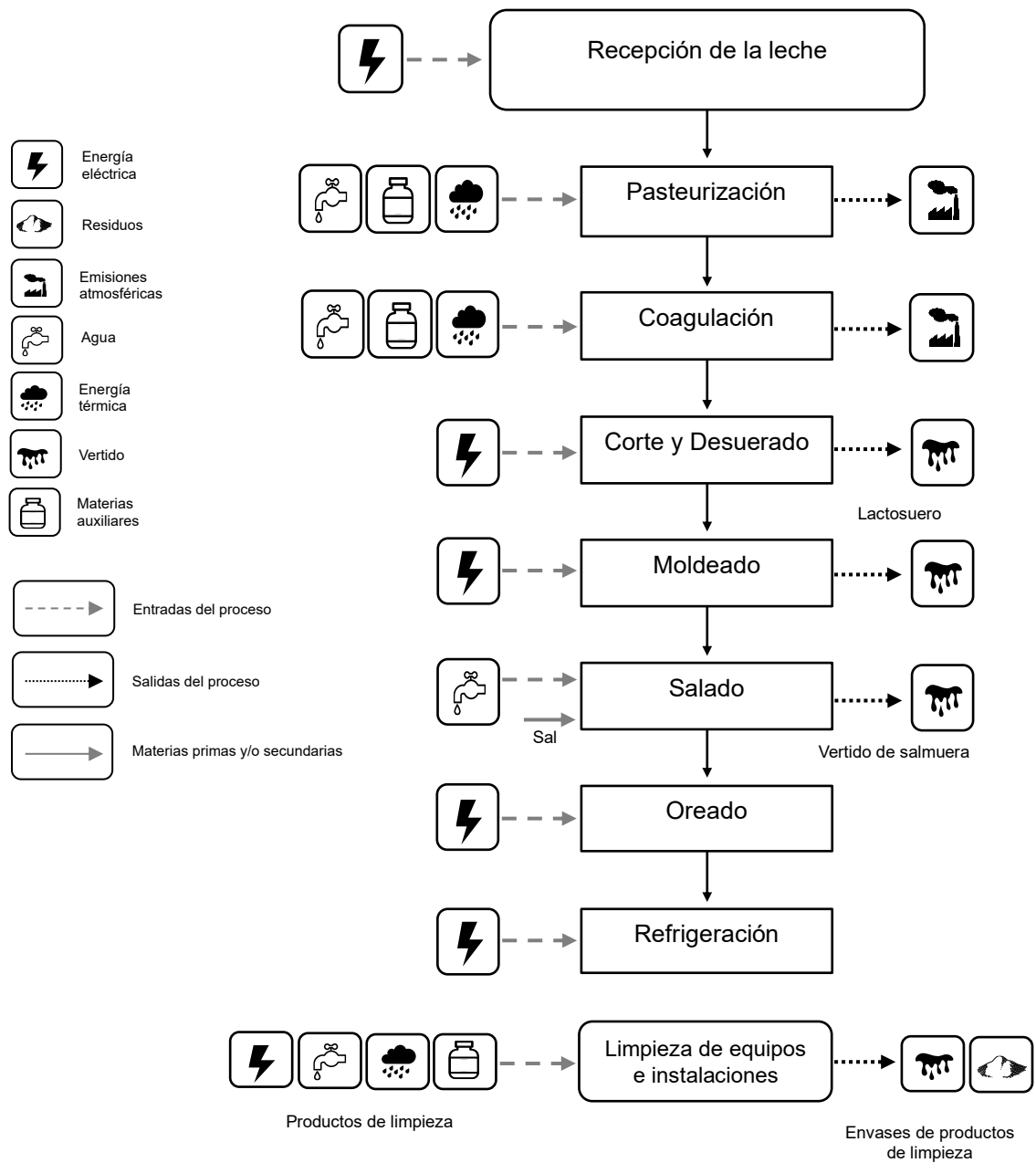


Figura 13. Aspectos ambientales de la elaboración del queso

Fuente: adaptado de CAR/PL, 2002.

Se estima que entre el 25% y el 40% del agua utilizada en esta agroindustria se destina a la limpieza de las instalaciones, y por cada litro de leche procesada se genera de 1.3 y 3.2 litros de agua residual, caracterizada por altas concentraciones de materia orgánica y variaciones de pH (Adamovici y Ghinea, 2021). Las principales fuentes de aguas residuales provienen de las actividades de limpieza de los equipos (Mirabella et al., 2014; Prazeres et al., 2012), las cuales arrastran residuos orgánicos como grasas, proteínas y lactosa (Vicencio et al., 2015). Además, durante la fabricación de queso, entre el 0.5% y 2.5% de la leche procesada se pierde, incrementando la carga contaminante del efluente final.

El suero, subproducto de la producción quesera, se genera en volúmenes que superan nueve veces la cantidad de leche procesada (Padín y Díaz, 2009). Este contiene una alta carga orgánica y es un contaminante potencial sino recibe tratamiento adecuado, afectando los cuerpos de agua y suelos (Bachmann et al., 2008; Valencia Denicia y Ramírez Castillo, 2009). Se estima que a nivel mundial se producen 200 millones de toneladas de suero al año, de las cuales México aporta el 0.6%. (Osorio-González et al., 2018; FAOSTAT, 2017). Sin embargo, gran parte de este residuo se vierte en sistemas de drenaje, alterando las propiedades fisicoquímicas de los ecosistemas, lo que representa un riesgo para la salud humana y animal (Prazeres et al., 2012; Rivas et al., 2011; Valencia Denicia y Ramírez Castillo, 2009).

El consumo energético en la agroindustria quesera también es significativo, dividiéndose entre energía térmica y eléctrica. La primera, que representa el 80% del consumo total, proviene principalmente de combustibles fósiles y se utiliza en los procesos de pasteurización y limpieza. La segunda, utilizada principalmente para refrigeración, representa entre el 30% y 40% del consumo energético total.

Ante estos desafíos, es fundamental implementar herramientas de gestión ambiental, tecnologías limpias y practicas sostenibles que permitan reducir la huella ecológica de la agroindustria quesera, garantizando una producción eficiente y responsable.

II. Marco teórico

2.1 Elaboración del queso Oaxaca

El queso Oaxaca se produce en diversas regiones de México, lo que ha generado una falta de estandarización en su proceso de elaboración (Villegas de Gante, 2012). Cada quesería introduce variaciones en las diferentes etapas del proceso, adaptándolo a sus recursos o mano de obra. Sin embargo, existen ciertos aspectos comunes en su elaboración.

Este queso fresco se elabora principalmente con leche de vaca, ya sea cruda o pasteurizada, y se caracteriza por su alto contenido de humedad, cercano al 50%. Con un rendimiento aproximado de 9 a 10.5 kg por cada 100 l de leche (Villegas de Gante, 2012) el paso clave en la elaboración del queso es alcanzar una acidificación adecuada. Esto implica lograr un pH en el suero exudado de 5.1 a 5.4 y una acidez de 32 a 37°D (grados Dornic), condiciones esenciales para alcanzar el punto de hebra y formar las características hebras del queso.

Como se detalla en la Figura 14, el proceso comienza con la recepción de la leche, en donde se realizan pruebas rápidas de calidad para asegurar que cumpla con los parámetros necesarios como lo establece la NOM-243-SSA1-2010 (Secretaría de Salud, 2010).

Algunas de estas pruebas es la acidez titulable, que identifica la presencia de sólidos no grasos, como proteínas, y la acidificación generada por la microflora acidificante en la leche. Esta acidez se determina mediante titulación, utilizando una solución básica, como hidróxido de sodio (NaOH 0.1 N), y un indicador de pH, como la fenolftaleína (De Oca et al., 2019; Fox y MacSweeney, 2017). En el caso del queso Oaxaca, la acidez es clave, pues el proceso de cuajado de la leche se inicia cuando se alcanza un nivel de acidez entre 30 y 32°D (Villegas de Gante, 2012).

La prueba de densidad en la leche, realizada con un lactodensímetro, evalúa su estabilidad térmica y detecta posibles adulteraciones. La densidad relativa de la leche en México oscila entre 1.026 y 1.034. La adición de agua disminuye la densidad, mientras que el descremado o la incorporación de sólidos adulterantes, como sal o azúcar, la aumenta (Moncada Jiménez y Pelayo Consuegra, 2011).

Tras finalizar las pruebas fisicoquímicas, el proceso continúa con la higienización de la leche, un paso esencial para garantizar su seguridad sanitaria al eliminar impurezas como residuos de alimentos, pelos del ganado e insectos. Entre los métodos de higienización, están los mecánicos, que incluyen el uso de materiales de tela, filtros de guata y discos de celulosa en los botes lecheros (Villegas de Gante, 2012; Fox y MacSweeney, 2017; Panthi et al., 2017). Por su parte, la clarificación, utiliza filtros de cartucho y bolsas de celulosa instalados en las tuberías que conectan la tina de recepción con la clarificadora, que usa la fuerza centrífuga para separar impurezas más gruesas (Pérez Lizaur, 2011).

Luego de la higienización, se procede a la estandarización de la leche, ajustando sus propiedades fisicoquímicas para cumplir con las cualidades deseadas del producto. Este proceso consiste en regular las proporciones de caseína y grasa, agregando leche parcialmente descremada para reducir el porcentaje de grasa, o crema para aumentarlo. En el caso del queso Oaxaca, se utiliza leche estandarizada con un contenido de grasa entre 2.6% y 2.8% (Villegas de Gante, 2012).

Posteriormente, se realiza la pasteurización, un tratamiento indispensable de la higienización de la leche, cuyo objetivo principal es eliminar el *Mycobacterium tuberculosis*, un patógeno termo resistente (Villegas de Gante, 2012). La pasteurización LTLT (baja temperatura, largo tiempo) se aplica comúnmente para queso Oaxaca, en volúmenes de 200 a 1000 litros, manteniendo la leche a una temperatura de 63°C durante 30 minutos (Secretaría de Salud, 2010; Villegas de Gante, 2012).

En la quesería mexicana, algunos aditivos empelados en la elaboración del queso Oaxaca incluyen el cloruro de calcio (CaCl_2) y el dióxido de titanio (TiO_2) (Villegas de Gante, 2012). Este último para conferirle al queso un color blanco, ya que los betacarotenos en la leche bovina suelen darle un tono amarillento (Pérez Lizaur, 2011). El cloruro de calcio mejora la coagulación de la leche, compensando la pérdida de calcio soluble durante la pasteurización, lo cual fortalece la cuajada y mejora el rendimiento al retener más sólidos durante la coagulación (Villegas de Gante, 2012).

Otro paso esencial en la elaboración del queso Oaxaca es la coagulación de la leche por vía ácida, reduciendo el pH a un rango de 4.5 a 5.0 para formar un gel o precipitado caseínico (Mestres Lagarriga y Romero del Castillo, 2008; Roset, 2019). Para este tipo de queso, se emplea una acidificación rápida mediante la adición de un ácido orgánico (como el acético, láctico o cítrico), manteniendo la leche entre 20 y 37°C y agitando para lograr la distribución homogénea (Fox y MacSweeney, 2017; Jaros y Rohm, 2017). La clave de esta técnica radica en la desmineralización acelerada, de las micelas de caseína, lo cual facilita la cohesión de la pasta (De Oca et al., 2019; Ramírez-Nolla y Vélez-Ruíz, 2012; Villegas de Gante, 2012).

Después de la adición del cuajo, la leche comienza a transformarse en un gel en debido a la interacción entre las micelas de caseína. Este gel experimenta sinéresis, un proceso de retracción de la red fosfocalcio-caseínica que expulsa el suero (Battro, 2010; Fagan et al., 2017; Jaros y Rohm, 2017). Para optimizarlo, se corta la cuajada con liras, un instrumento compuesto por bastidores metálicos con finos alambres de acero inoxidable, con una separación entre 0.8 y 2 cm, lo que facilita el drenaje del suero (Villegas de Gante, 2012).

Tras el corte, la cuajada se contrae y libera rápidamente el suero. Los granos de cuajada sedimentan en el fondo de la tina, y con un rastrillo metálico se procede a resuspender las partículas mediante agitación mecánica. Este proceso, conocido como trabajo del grano, se realiza en tres etapas, aumentando gradualmente la intensidad de la agitación conforme la cuajada se endurece (Fox y MacSweeney, 2017; Roset, 2019). Para quesos de pasta hilada como el queso Oaxaca, la agitación dura de 15 a 30 minutos (Villegas de Gante, 2012). Para después proceder al molido que se realiza en un molino de discos que fragmenta la pasta en partículas finas (Villegas de Gante, 2012).

El escaldado, con agua caliente entre 50 y 90°C, expulsa el suero del grano, mejora la textura y facilita el hilado, alineando las fibras de fosfocaseinato de calcio. Para evitar un pH final demasiado bajo, se realiza un lavado de la pasta reemplazando entre el 20% y 50% del suero con agua caliente (Villegas de Gante, 2012). En el caso del queso Oaxaca, el amasado en agua a 70-75°C permite un lavado parcial y ligero deslactosado, previniendo una post-acidificación pronunciada durante su vida en anaquel.

El proceso de salado cumple una doble función: realzar su sabor y prevenir el desarrollo de microorganismos no deseados. En el caso del queso Oaxaca, esta etapa se realiza mediante la aplicación de sal fina directamente sobre la superficie de la pasta. El contenido de sal en este tipo de queso oscila entre 1.0% y 1.5% en base húmeda, nivel al que el consumidor está acostumbrado. Finalmente, el queso Oaxaca se somete a un moldeado manual donde se enrollan las bandas en forma de bola (Villegas de Gante, 2012).

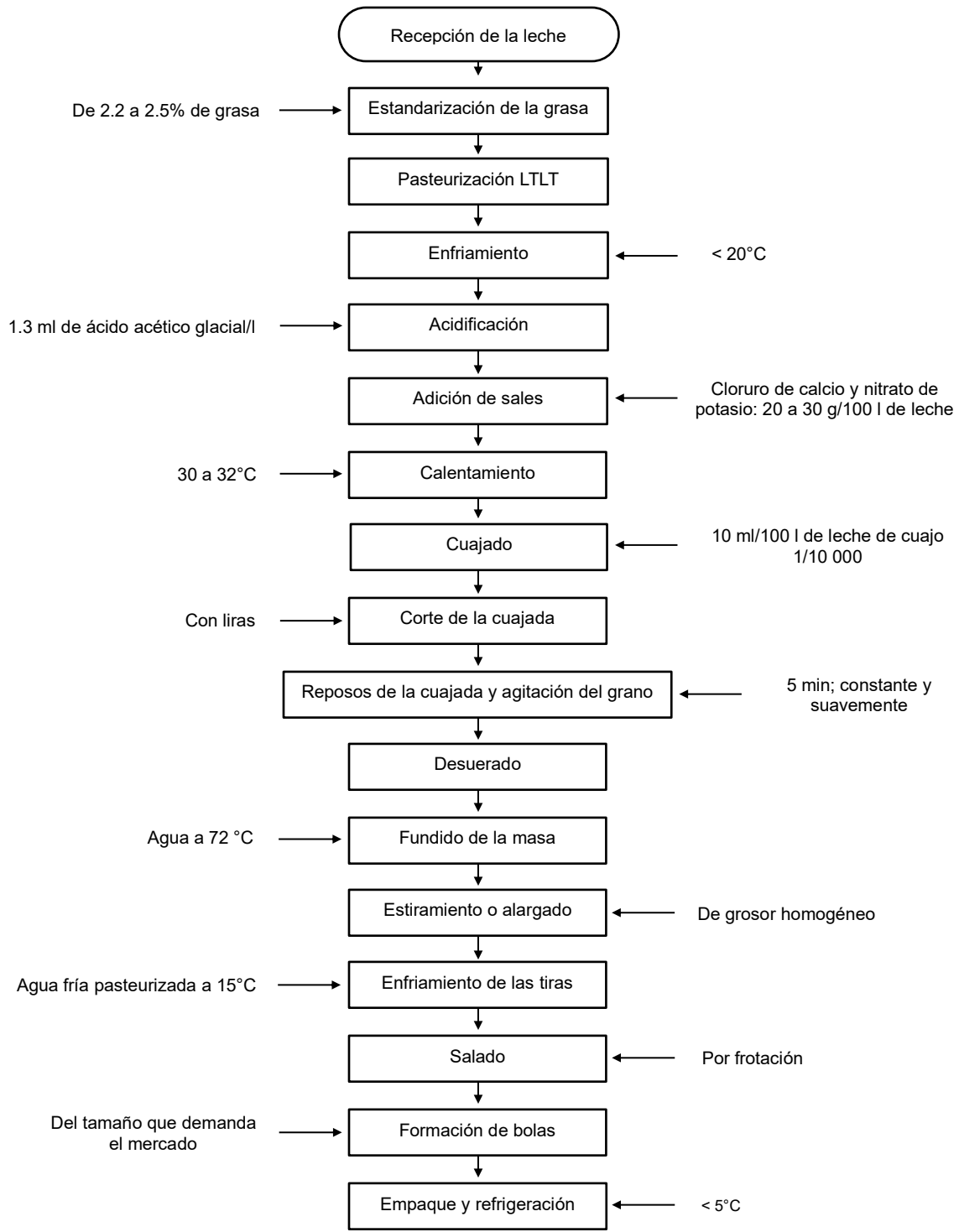


Figura 14. Elaboración del queso Oaxaca por acidificación

Fuente: adaptado de Villegas de Gante, 2012.

Esta industria, que combina procesos agrícolas e industriales, representa un punto crítico para replantear las prácticas productivas y adoptar soluciones innovadoras que permitan reducir su huella ecológica sin comprometer su viabilidad económica. En un contexto global donde la presión por mitigar el cambio climático y preservar los recursos naturales es más apremiante que nunca, resulta indispensable reconocer y analizar su impacto ambiental. Solo así será posible garantizar que esta agroindustria continúe satisfaciendo la demanda global, sin comprometer la sostenibilidad del ambiente.

2.2 Sostenibilidad

Los conceptos de sustentabilidad y sostenibilidad han adquirido gran relevancia en el contexto actual. Aunque a menudo se emplean como sinónimos, ambos términos poseen enfoques y niveles de aceptación diferentes en su interpretación y aplicación. La sustentabilidad se centra en la conservación de los recursos, mientras que la sostenibilidad, termino aceptado universalmente, adopta un enfoque holístico ya que no solo considera la preservación de los recursos, sino también la manera en que los sistemas humanos, naturales y económicos pueden coexistir y prosperar de forma equilibrada (Toledo, 2015; Zarta Ávila, 2018).

Aunque estos conceptos han cobrado mayor importancia en los últimos años, sus orígenes se sitúan en las décadas de 1960 y 1970, cuando surgieron movimientos ambientalistas que alertaron sobre los impactos negativos que las actividades antropogénicas estaban teniendo en el planeta (López López, 2021; Escobar Delgadillo, 2007; Velázquez Álvarez y Vargas-Hernández, 2012; Zarta Ávila, 2018).

Antes de que se definiera formalmente la sostenibilidad, existieron antecedentes clave que impulsaron su desarrollo. En 1798, Robert Malthus publicó su “Ensayo sobre el principio de la población”, donde subrayaba que el crecimiento poblacional amenazaba la disponibilidad de recursos, lo que podría conducir a hambrunas y pobreza (Collantes, 2003; Ramírez et al., 2011; Schoijet, 2005).

Karl Marx, en su obra "El Capital", argumentaba que el capitalismo veía tanto a la naturaleza como al ser humano como recursos para generar ganancias (Flores, 2018; Pérez Soto y Esquenazi Borrego, 2018; Seda-Irizarry, 2011). Friedrich Engels, también aportó ideas sobre la explotación de los recursos y la interconexión entre la sociedad y el ambiente, ideas que influirían en los pilares de la sostenibilidad (Fiscer Lamelas, 2012; González, 2020).

Años más tarde, el Club de Roma encargó el informe "Los límites del crecimiento", publicado en 1972 bajo la dirección de Donella H. Meadows y colaboradores. Este documento marcó un hito en el análisis sistémico de la sostenibilidad, al realizar predicciones sobre el agotamiento de recursos y los impactos ambientales derivados del desarrollo humano. Ofreciendo una perspectiva integral de los desafíos asociados al crecimiento exponencial (Zarta Ávila, 2018).

Durante el siglo XX, el crecimiento demográfico y la ausencia de políticas ambientales dieron lugar a los primeros movimientos ambientalistas (Toledo, 2015). Uno de los principales detonantes de esta conciencia ambiental fue la publicación del libro "La Primavera Silenciosa" de Rachel Carson, publicado en 1962, el cual documentó los efectos devastadores del uso de pesticidas y otros químicos en el ambiente, despertando una preocupación global, marcando el inicio de la responsabilidad ambiental (Auras y Selke, 2023; Lopes Silva et al., 2017; López López, 2021).

Posteriormente, la Conferencia de Estocolmo sobre el Medio Humano (1972), dio origen al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), creado para promover el desarrollo sostenible y la gestión adecuada de los recursos naturales. En 1983, se creó la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CMDA), conocida como la Comisión Brundtland, en un contexto de creciente preocupación por el deterioro ambiental y el impacto antropogénico (Auras y Selke, 2023; Escobar, 2007; Massolo, 2015).

La Comisión Brundtland (1987) desarrollo los fundamentos del concepto de sostenibilidad como lo conocemos actualmente. A través de la publicación del informe Nuestro futuro común, conocido popularmente como el Informe Brundtland, se definió el desarrollo sostenible como “aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. Este informe, liderado por Gro Harlem Brundtland, es primera ministra de Noruega, destaco la necesidad de integrar el progreso económico, la protección ambiental y la equidad social, conceptos que se reflejan en las dimensiones de la sostenibilidad (Figura 15), también conocidas como las tres P: planeta, personas y prosperidad (Auras y Selke, 2023; Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987; Massolo, 2015; Moltesen y Bjørn 2018).

La dimensión económica promueve un crecimiento equitativo y el uso eficiente de los recursos. La dimensión social se centra en garantizar el acceso universal a educación, salud, vivienda y empleo digno. Mientras que la dimensión ambiental, prioriza la protección, conservación y gestión responsable de los recursos naturales para asegurar su disponibilidad a largo plazo. En conjunto, estas dimensiones son indispensables para lograr un desarrollo equilibrado y compatible con la equidad social y ambiental.

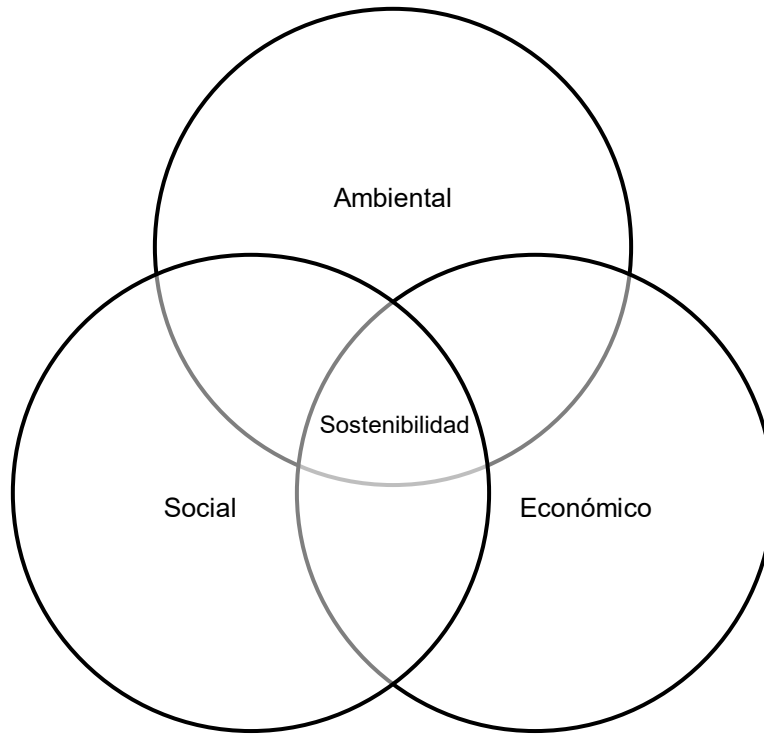


Figura 15. Dimensiones de la sostenibilidad

Fuente: adaptado de Shrivastava y Unnikrishnan, 2021.

En 1990, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), publicó su primer informe, lo que posteriormente le mereció el Premio Nobel de la Paz en 2007. Su función es cuantificar el impacto antropogénico en el cambio climático. Desde entonces, se han llevado a cabo cumbres mundiales y reuniones bajo el auspicio de las Naciones Unidas (Figura 16), enfocadas en establecer una agenda común para enfrentar el cambio climático y promover la sostenibilidad global (Auras y Selke, 2023).

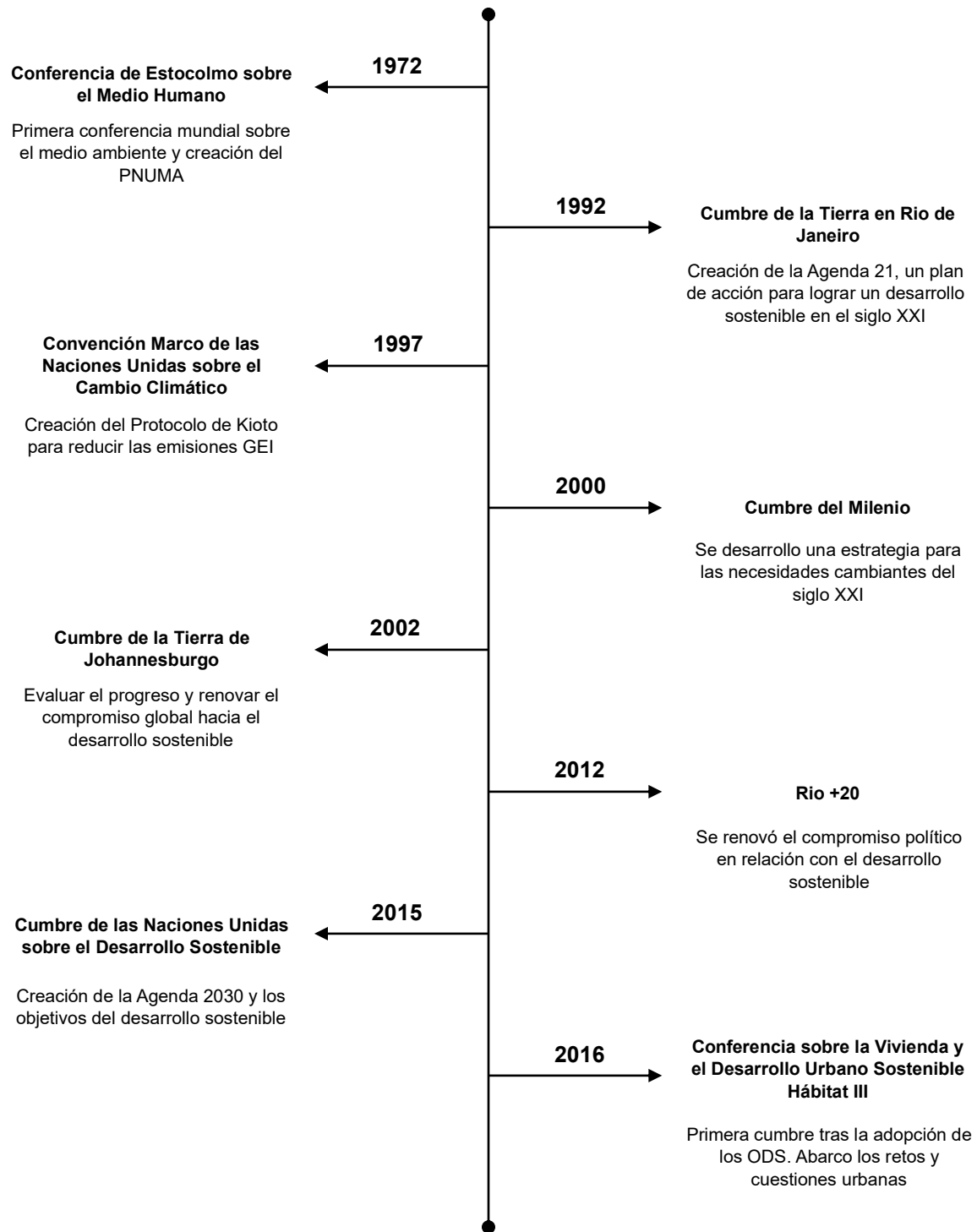


Figura 16. Línea del tiempo de cumbres y reuniones mundiales

Fuente: elaboración propia con datos de Auras y Selke, 2023; Naciones Unidas, s.f.

A partir de 2015, las Naciones Unidas desarrollaron un plan para promover la sostenibilidad a nivel mundial, conocidos como los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) o la Agenda 2030 (Figura 17) (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015; Auras y Selke, 2023). Estos objetivos representan un llamado a la acción que reconoce “que poner fin a la pobreza y otras privaciones debe ir de la mano con estrategias que mejoren la salud y la educación, reduzcan la desigualdad y estimulen el crecimiento económico, todo ello mientras se aborda el cambio climático y se trabaja para preservar nuestros océanos y bosques”.

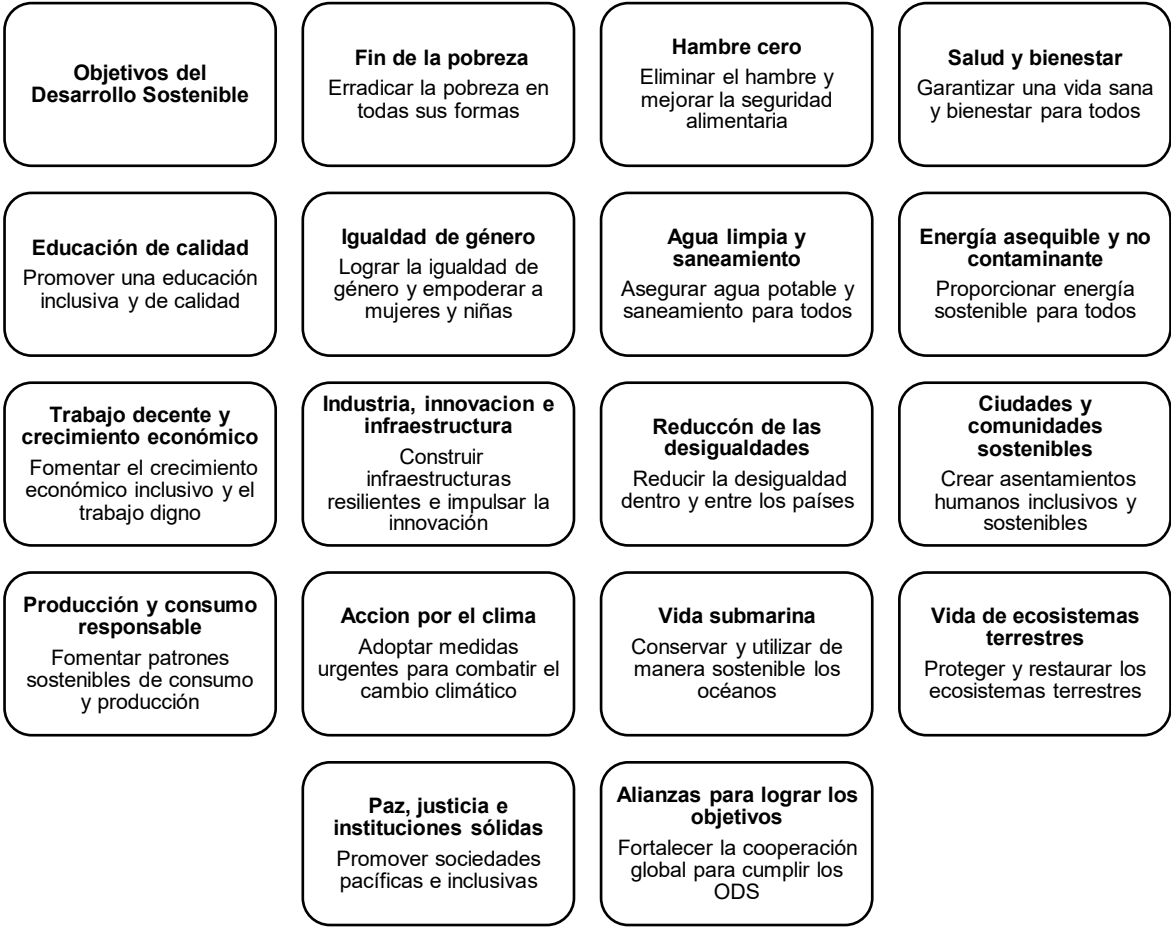


Figura 17. Objetivos del Desarrollo Sostenible 2030

Fuente: elaboración propia con datos de la Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015.

Los ODS se dividen en diecisiete objetivos principales que guían este enfoque integral. Cada uno de estos objetivos cuenta con un total de 169 metas, y la implementación de estas está respaldada por un marco de monitoreo y evaluación de indicadores que permite evaluar el avance de los objetivos en diferentes contextos (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015).

La sostenibilidad se ha consolidado un campo multidisciplinario que requiere la colaboración de múltiples actores y áreas de conocimiento para alcanzar un equilibrio integral. El desarrollo sostenible integra dos enfoques fundamentales: uno centrado en alcanzar los objetivos del desarrollo y otro orientado a minimizar y controlar los efectos adversos de dichas actividades sobre el ambiente. En este contexto, las herramientas de gestión ambiental desempeñan un papel clave, ya que integran ambas perspectivas al reducir los efectos negativos generados por las actividades antropogénicas. Estas herramientas no solo contribuyen a disminuir la huella ecológica en diversos sectores, sino que también promueven prácticas diseñadas para armonizar el crecimiento económico con la protección ambiental (Massolo, 2015; Moreno y Espí, 2008).

La integración de la gestión ambiental en los procesos productivos es fundamental para asegurar la disponibilidad de recursos para las generaciones futuras (Hauschild et al., 2018). En conjunto, la sostenibilidad y las herramientas de gestión ambiental establecen un marco integral que facilita el progreso sin comprometer la calidad de vida de las generaciones actuales y futuras.

2.3 Herramientas de gestión ambiental

Para avanzar hacia la sostenibilidad, es indispensable contar con herramientas efectivas que permitan lograrlo. En este contexto, la gestión ambiental desempeña un rol clave al gestionar y mitigar los impactos ambientales derivados de las actividades humanas, promoviendo un desarrollo que respalde tanto las necesidades del presente como las del futuro (Massolo, 2015; Vidal y Asuaga, 2021).

La gestión se convierte en un mecanismo indispensable para fomentar la sostenibilidad, permitiendo la identificación, monitoreo y mitigación de los impactos negativos derivados de las actividades antropogénicas. Su principal objetivo radica en alcanzar un equilibrio adecuado entre el desarrollo económico, el crecimiento poblacional, el uso racional de los recursos y la protección ambiental (Massolo, 2015).

A través de la adopción de normativas, certificaciones y buenas prácticas, las empresas y las comunidades pueden minimizar su huella ecológica, contribuyendo de manera significativa a los objetivos de desarrollo sostenible. En las últimas décadas, el uso indiscriminado de los recursos naturales, junto con las actividades humanas, ha provocado un deterioro significativo en los ecosistemas, impulsando la crisis climática. Ante esto, diversos sectores han comenzado a adoptar herramientas de gestión ambiental con el fin de mitigar la contaminación y minimizar los daños causados por las actividades humanas (López et al., 2017; Massolo, 2015; Vázquez Amábile, 2018; Velázquez Álvarez y Vargas-Hernández, 2012).

La adopción de estas herramientas es fundamental para lograr un equilibrio sostenible. A través de una gestión ambiental adecuada, se puede garantizar la resiliencia a largo plazo, asegurando que las generaciones futuras cuenten con los recursos necesarios (Vidal y Asuaga, 2021; Moreno y Espí, 2008). La eficiencia de estas herramientas es mayor cuando se aplican *a priori*, ya que permite anticipar y minimizar el uso de materias primas, optimizar el consumo energético, reducir emisiones y disminuir costos operativos. Para facilitar su implementación, se clasifican según su propósito:

- Preventivas: anticipan y mitigan los impactos antes de que sucedan.
- Correctivas: remedian los impactos negativos que se han producidos.
- Conservación: protegen y conservan los recursos naturales.
- Mejoramiento: optimizan los procesos para minimizar el impacto ambiental.

La implementación adecuada de estas herramientas fomenta un equilibrio entre el crecimiento económico y la conservación ambiental, promoviendo una gestión responsable de los recursos naturales (Massolo, 2015). En el Tabla 8 se describen algunas de las herramientas de gestión ambiental.

Tabla 8. Tipos de herramientas de gestión ambiental

Herramientas	Descripción
Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)	Predice los efectos ambientales de proyectos antes de su ejecución para tomar decisiones informadas y evitar daños al ambientales
Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	Método de evaluación de impactos ambientales de un producto o servicio que permite identificar áreas de mejora
Gestión de Residuos	Estrategias para recolectar, tratar y disponer de residuos, minimizando su impacto ambiental
Conservación de la Biodiversidad	Estrategias de protección para especies y ecosistemas en peligro
Sistema de Gestión Ambiental (SGA)	Gestión continua del desempeño ambiental de una organización
Ecoeficiencia	Reduce el consumo de recursos y la generación de residuos sin comprometer la producción o la calidad
Ecoetiquetado	Acredita el bajo impacto ambiental de un producto o proceso

Fuente: elaboración propia con datos de López et al., 2017; Massolo, 2015.

Entre estos, el ACV destaca por su sólida base científica y su enfoque integral. Esta herramienta permite mapear las emisiones y el uso de recursos asociados a un producto o proceso, considerando factores como la ubicación geográfica y modelos matemáticos para evaluar impactos potenciales en el ambiente (Auras y Selke, 2023; Moreno y Espí, 2008). En años recientes, el ACV ha evolucionado significativamente, convirtiéndose en una herramienta indispensable para la toma de decisiones orientadas al desarrollo sostenible.

Esta herramienta permite evaluar de manera exhaustiva los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o servicio, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (Romero Rodríguez, 2003). Su principal ventaja radica en su visión holística, que proporciona información valiosa sobre impactos que otros indicadores ambientales no revelan (Massolo y Castagnasso, 2015; Moreno y Espí, 2008).

En los últimos años, el ACV ha ganado relevancia en diversas industrias, al facilitar la identificación y mitigación de los impactos ambientales asociados a sus procesos (Alves et al., 2019; Willers y Rodrigues, 2014). Uno de los estudios pioneros en aplicar esta herramienta en la agroindustria quesera fue realizado por Malaspina en 1995, cuyo objetivo fue evaluar la tecnología más adecuada para gestionar el suero de la leche en medianas y pequeñas queserías (Malaspina et al., 1995). Este trabajo abrió la puerta a nuevas investigaciones, sentando las bases para futuras investigaciones, como se muestra en el Tabla 9.

Tabla 9. Análisis del ciclo de vida enfocado en la agroindustria quesera

Estudio	Objetivo del estudio	Autor
Environmental Life Cycle Assessment of a Galician cheese: San Simon da Costa	Identificar y cuantificar los impactos ambientales derivados de la fabricación del queso San Simón da Costa	(González et al., 2013b)
Evaluación de impacto ambiental de la producción de queso blanco pasteurizado en la parroquia Mantecal, Apure, Venezuela	Evaluar el impacto ambiental del Ciclo de Vida en la producción de queso blanco pasteurizado	(Velázquez Villanueva et al., 2014)
Green cheese: Partial life cycle assessment of greenhouse gas emissions and energy intensity of integrated dairy production and bioenergy systems	Evaluar cómo la integración de los sistemas bioenergéticos y lácteos afecta la intensidad energética, las emisiones de GEI y el uso de la tierra	(Aguirre-Villegas et al., 2015)
Life cycle assessment of cheese production process in a small-sized dairy industry in Brazil	Identificar, analizar y proponer mejoras para minimizar los impactos ambientales de la fabricación de queso	(Santos et al., 2016)
Environmental impacts of a dairy cheese chain including whey feeding: An Italian case study	Contribuir a la literatura sobre la sostenibilidad ambiental de producción del queso	(Palmieri et al., 2017)

Impact assessment of traditional food manufacturing: The case of Grana Padano cheese	Evaluar el impacto ambiental de la producción del queso Grana Padano	(Bava et al., 2018)
Strategies for reducing the environmental impacts of organic mozzarella cheese production	Identificar los impactos ambientales de la producción de queso mozzarella, certificado como orgánico	(Alves et al., 2019)
Environmental impact of Oaxaca cheese production and wastewater from artisanal dairies under two scenarios in Aculco, State of Mexico	Evaluar los impactos ambientales a través de un análisis de ciclo de vida en 10 categorías de impacto	(Salas-Vargas et al., 2021)
Life cycle assessment of sheep cheese production in a small dairy factory from Romanian rural area	Determinar los impactos ambientales asociados a la producción de queso de oveja, investigar la contribución a la producción de energía y analizar la carga ambiental cuando el queso es transportado para su venta desde la zona de montaña a diferentes ciudades del país	(Ghinea y Leahu, 2022)

Fuente: elaboración propia.

2.4 Análisis del ciclo de vida

El ACV se reconoce una herramienta sistemática y fundamental para evaluar los impactos ambientales asociados a un producto, proceso o servicio a lo largo de todas sus etapas, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Este enfoque incluye todas las entradas y salidas del sistema, como recursos, energía y emisiones, brindando una visión completa de los impactos ambientales asociados (Bjørn et al., 2018d; Farjana et al., 2021; Dahiya et al., 2020; ISO, 2006a).

A principios de la década de 1990, los investigadores Mathis Wackernagel y William Rees, de la Universidad de Columbia Británica en Canadá, desarrollaron una herramienta para medir el impacto ambiental derivado del consumo de materias primas y energía. Esta herramienta, denominada huella ecológica, permitió comparar los impactos ambientales con la capacidad de carga biofísica a nivel regional y mundial (Hoekstra, 2009). Al mismo tiempo, se desarrolló la metodología del ACV que complementa este enfoque al ofrecer una forma sistemática de medir la huella ecológica de productos o servicios (López López, 2021).

Durante las décadas de 1960 y 1970, se realizaron los primeros estudios centrados en algunas etapas del ciclo de vida, destacando la importancia de considerar la eficiencia, el consumo energético, el uso de materias primas y la disposición final de los residuos generados (Bjørn et al., 2018c; Massolo y Castagnasso, 2015; Shrivastava y Unnikrishnan, 2021). En 1969, la empresa Coca Cola en Estados Unidos, financió un estudio realizado por el Midwest Research Institute, cuyo objetivo era relacionar y comparar el consumo de recursos necesarios para fabricar sus envases (Romero Rodríguez, 2003). Simultáneamente, en Europa se realizaban estudios similares denominados ecobalance, cuyo objetivo era identificar y cuantificar los flujos de energía e insumos asociados a un producto (Bjørn et al., 2018c; Iglesias, 2005).

En el Reino Unido, Lan Boustead calculó en 1972 la cantidad de energía necesaria para fabricar envases de diferentes materiales como vidrio, plástico, acero y aluminio (Massolo y Castagnasso, 2015; Romero Rodríguez, 2003).

Conforme la metodología del ACV fue evolucionando (Figura 18), se integraron métodos de cuantificación más precisos para evaluar el impacto ambiental de los productos en diversas categorías de problemas ambientales. Hoy en día, es una herramienta esencial para gestionar proyectos menos contaminantes (Romero Rodríguez, 2003). Este enfoque holístico ha sido crucial para comprender, minimizar y gestionar los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, consolidándose como un pilar fundamental en la transición hacia la sostenibilidad.

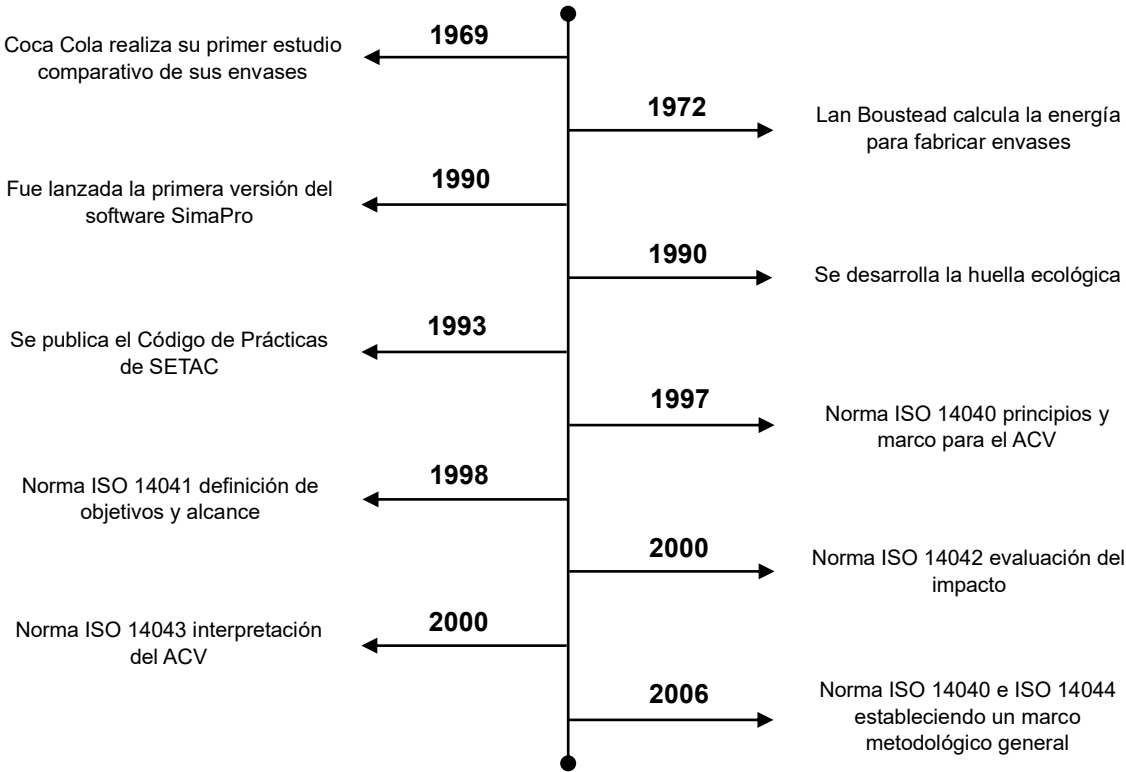


Figura 18. Evolución del ACV

Fuente: elaboración propia con datos de Bjørn et al., 2018c.

2.4.1 Normativa del ACV

La norma ISO 14040 establece que el ACV es una herramienta clave para evaluar los aspectos ambientales y los posibles impactos asociados a un producto. Este enfoque se basa en la recopilación de datos sobre las entradas y salidas relevantes del sistema, el análisis de los impactos ambientales potenciales derivados de estos, y la interpretación de los resultados en función con los objetivos (ISO, 2006a).

Antes de que la ISO, estandarizara la metodología para el ACV, la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC) desarrolló en 1993 el Código de Prácticas para el Análisis de Ciclo de Vida, donde se establecieron las primeras directrices internacionales, con el objetivo de estandarizar la metodología y proporcionar las bases para evaluar los impactos ambientales de productos o procesos (Bjørn et al., 2018c; Owsianiak et al., 2018; Shrivastava y Unnikrishnan, 2021).

Finalmente, en el 2006, la ISO desarrollo y publicó las siguientes normas que brindan el marco para realizar un ACV, garantizando la reproducibilidad y comparabilidad a nivel internacional (Owsianiak et al., 2018).

- ISO 14040:2006 Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Principios y marco de referencia: proporciona los fundamentos para llevar a cabo un ACV, incluyendo la definición del objetivo y el alcance, el análisis del inventario, la evaluación de los impactos y la interpretación de los resultados.
- ISO 14044:2006 Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Requisitos y directrices: especifica los requisitos y directrices metodológicas para comunicar los resultados (ISO, 2006b).

Estas normas integraron y reemplazaron los primeros documentos que establecían distintos aspectos del ACV, como se observa en la Figura 19.



Figura 19. Primeras normas del ACV

Fuente: elaboración propia con datos de Bjørn et al., 2018c; Massolo y Castagnasso, 2015; Moreno y Espí, 2008.

- ISO 14040:2006 - Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Principios y Marco de Referencia: establece el marco general para el ACV, cubriendo las etapas de definición del objetivo, alcance, análisis del inventario, evaluación de impactos e interpretación de resultados (ISO, 2006a).
- ISO 14041:1998 - Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Definición del Objetivo y del Alcance y Análisis del Inventario: especifica los requisitos para definir el objetivo y el alcance, además de proporcionar directrices para el análisis del inventario, la recopilación de los datos y el diagrama de flujo de materiales y energía (Bjørn et al., 2018c; Moreno y Espí, 2008).
- ISO 14042:2000 - Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida: detalla cómo clasificar, caracterizar y evaluar los impactos ambientales potenciales del inventario en categorías como cambio climático, toxicidad y agotamiento de recursos (Bjørn et al., 2018c).
- ISO 14043:2000 - Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Interpretación del Ciclo de Vida: incluye la identificación de conclusiones, limitaciones y recomendaciones basadas en los resultados del inventario y la evaluación del impacto, además de orientaciones sobre la comunicación efectiva de los resultados (Bjørn et al., 2018c; Iglesias, 2005).

Con el tiempo, estas normas se consolidaron en un único documento, lo cual permitió obtener resultados más precisos y comparables (Massolo y Castagnasso, 2015; Moreno y Espí, 2008).

2.4.2 Tipos de ACV

De acuerdo con Farjana (2021), es fundamental definir el tipo de ACV que se realizará, ya que cada uno tiene un enfoque y propósito particular, como se describe a continuación:

- ACV conceptual: es un estudio cualitativo enfocado en aspectos generales de ciertas etapas del ciclo de vida, cuyo objetivo es identificar los impactos potenciales más significativos del proceso.
- ACV simplificado: se caracteriza por ser rápido, selectivo y superficial, centrándose en las etapas más importantes del producto o sistema, lo que permite proporcionar una visión general de los impactos ambientales para hacer recomendaciones futuras (Iglesias, 2005).
- ACV completo: es un estudio detallado de todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta la disposición final. Evalúa los impactos ambientales de forma cualitativa y cuantitativa, brindando una visión holística y detallada de los impactos asociados, lo que contribuye a mejorar los procesos y reducir los impactos ambientales.

2.4.3 Alcances del ACV

El alcance del análisis es crucial, ya que establece los límites del sistema y determina qué etapas del ciclo de vida serán evaluadas (Figura 20). A continuación, se presentan los diferentes tipos de alcances y los aspectos considerados en cada uno (Ihobe, 2009; Moreno y Espí, 2008; Vargas Mora y Gil Martínez, 2021).

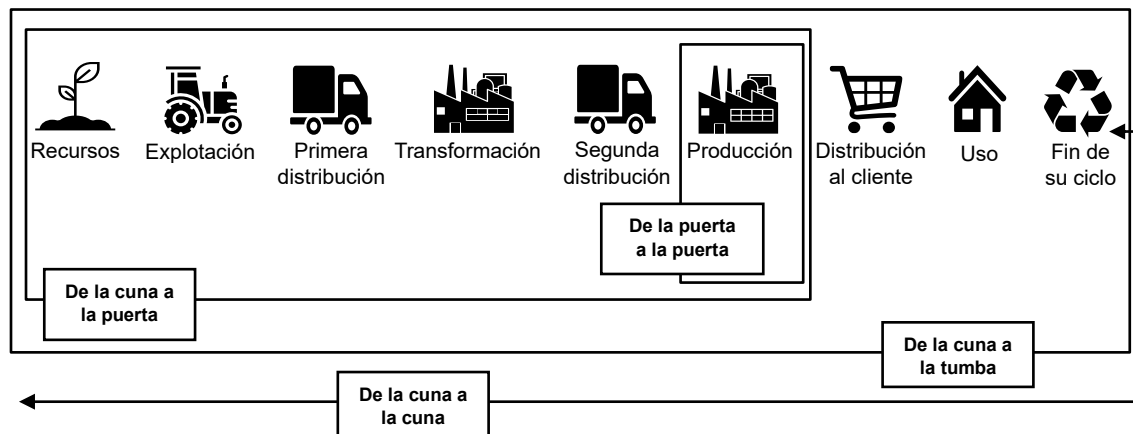


Figura 20. Alcances del ACV

Fuente: elaboración propia con datos de Ihobe, 2009; Olivera et al, 2016.

- De la cuna a la puerta (Cradle to Gate): incluye desde la extracción y preparación de las materias primas hasta el momento en que el producto sale de la fábrica. Este alcance se emplea cuando se desea analizar los impactos ambientales de la producción y fabricación del producto, sin considerar su uso o disposición final.
- De la cuna a la tumba (Cradle to Grave): abarca desde la extracción y el acondicionamiento de las materias primas, fabricación, uso y disposición final, proporcionando una visión completa del impacto ambiental del producto durante todo su ciclo de vida.
- De la puerta a la puerta (Gate to Gate): se centra en la fabricación del producto. Este alcance permite mejorar la eficiencia y reducir los impactos ambientales de un proceso específico.
- De la puerta a la tumba (Gate to Grave): analiza las etapas desde que el producto sale de la fábrica hasta su disposición final, sin tomar en cuenta la extracción y acondicionamiento de las materias primas.
- De la cuna a la cuna (Cradle to Cradle): contempla todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la obtención y acondicionamiento de las materias primas hasta el reciclaje del producto, ya sea que se reintroduzca en el mismo proceso productivo o en otros. Este enfoque es útil para productos diseñados para que, al final de su ciclo de vida, puedan reciclarse.

2.4.4 Etapas del ACV

La norma ISO 14040 (Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Principios y marco de referencia) establece que el ACV debe realizarse en cuatro etapas clave: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación. Como se muestra en la Figura 21.

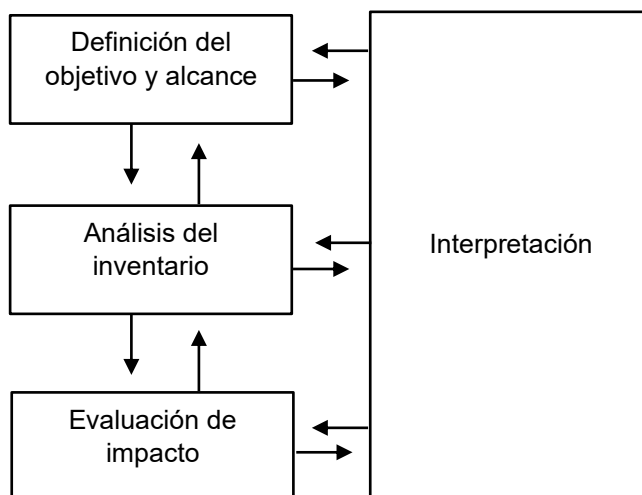


Figura 21. Esquema del ACV de acuerdo a la norma ISO 14040

Fuente: adaptado de Ihobe, 2009.

2.4.4.1 Definición del objetivo y alcance

El primer paso para realizar un ACV, de acuerdo con Hauschild (2018), es definir el objetivo, ya que este establece el propósito del estudio y sirve de base para determinar el alcance, el cual se refiere a las etapas del proceso que se incluirán en la evaluación. Comúnmente, los objetivos del ACV son la comparación de productos o la mejora de los procesos de producción (Bjørn et al., 2018a; Farjana et al., 2021). Por lo tanto, esta fase es esencial para asegurar que las etapas siguientes del análisis se realicen de forma coherente, garantizando la confiabilidad y reproducibilidad del estudio.

El alcance o límite del sistema, como se mostró en la Figura 20, define las actividades y procesos que formarán parte del análisis, excluyendo aquellas que no sean relevantes para el estudio (Bjørn et al., 2018b; Ihobe, 2009; Moreno y Espí, 2008).

La función del sistema corresponde al propósito del producto o proceso analizado, es decir, para que fue creado. Esto permite establecer la unidad funcional, que es una medida cuantitativa (como kilos, litros, etc.) clave para calcular las entradas y salidas del sistema y evaluar los impactos. También se seleccionan los métodos de asignación adecuados, los cuales distribuyen los impactos ambientales entre productos o coproductos generados en un mismo sistema (Farjana et al., 2021; Iglesias, 2005).

De acuerdo con Moreno y Espí (2008), entre los métodos de asignación más comunes se encuentran:

- Asignación económica: los impactos se distribuyen en función del valor económico de los productos, de modo que los productos más valiosos reciben una mayor asignación (Berlin, 2002).
- Asignación por masa: los impactos se asignan según la masa o volumen de los productos.
- Asignación por energía: los impactos se distribuyen de acuerdo con el contenido energético, aplicable en sistemas donde los productos son fuentes de energía.

Sin embargo, las normas ISO 14040 y 14044 (ISO, 2006a; ISO, 2006b) recomiendan, evitar la asignación siempre que sea posible. Esto se logra mediante la expansión del sistema, que implica incluir las funciones adicionales asociadas a los coproductos, de modo que se evalúen los impactos en un contexto más amplio (Bava et al., 2018).

Asimismo, la definición de la unidad funcional implica una descripción cuantitativa de la función o servicio proporcionado por el sistema, sobre la cual se basa la evaluación. Esta unidad determina el flujo de referencia del producto y la recopilación de datos para el inventario del ciclo de vida (ICV) (Bjørn et al., 2018a).

Finalmente, en esta etapa deben definirse los límites geográficos y temporales del estudio, el tipo de ACV y el público objetivo al que se dirigirán los resultados (Hauschild, 2018; Moreno y Espí, 2008).

2.4.4.2 Análisis del Inventario del ciclo de vida (ICV)

El ICV recopila información sobre los flujos de entradas (inputs) y salidas (outputs) dentro del sistema de producción (Figura 22). Sin embargo, debido a la complejidad de estos sistemas, es posible que se utilicen datos genéricos. Para identificar qué entradas y salidas deben evaluarse, es fundamental elaborar un diagrama de flujo que represente todas las actividades y procesos clave del sistema, basado en la unidad funcional (Bjørn et al., 2018a; Farjana et al., 2021).

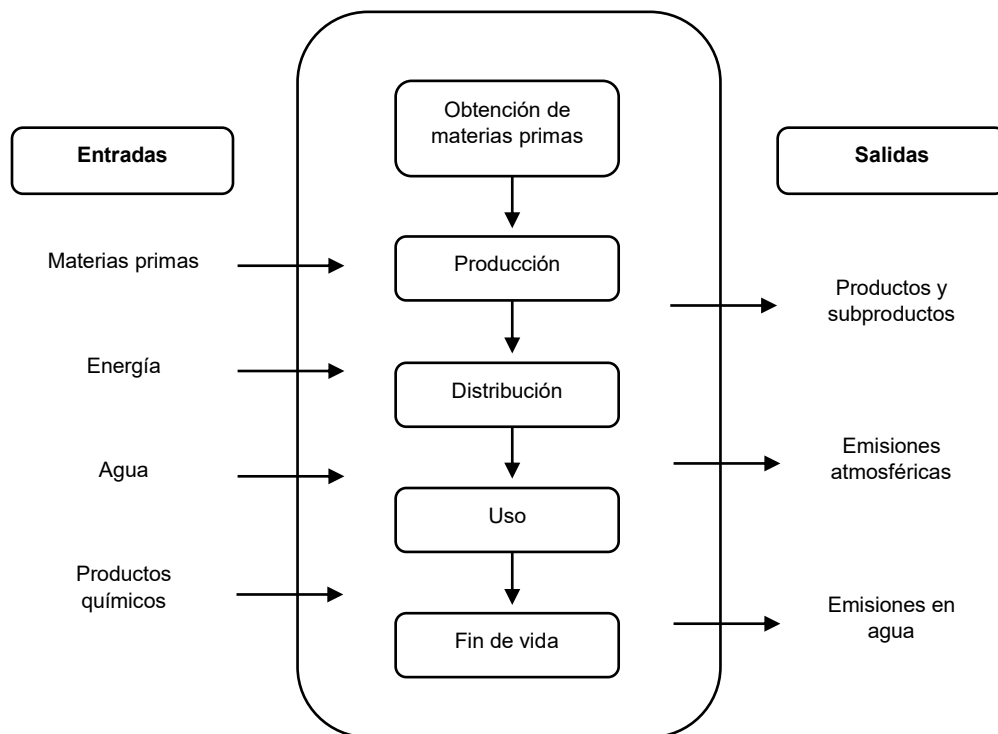


Figura 22. Elementos considerados para el ICV

Fuente: elaboración propia con datos de Farjana et al., 2021; Ihobe, 2009; Moreno y Espí, 2008.

En cuanto a la clasificación de los datos, estos pueden ser cualitativos, empleados en análisis descriptivos y evaluaciones de operaciones individuales, o cuantitativos, que incluye el consumo de recursos, desechos, productos y emisiones, utilizados generalmente para comparar materiales y procesos (Bjørn et al., 2018d; Farjana et al., 2021). Asimismo, los datos se dividen en:

- Datos primarios: basados en mediciones directas, modelos e informes de fabricantes y productos (Farjana et al., 2021).
- Datos secundarios: promedios obtenidos de bases de datos de los ACV, fuentes bibliográficas o informes científicos (Farjana et al., 2021).

El ICV permite identificar y cuantificar los flujos de entrada y salida del sistema, facilitando la evaluación del impacto ambiental de cada proceso (Bjørn et al., 2018d; Olivera et al., 2016).

2.4.4.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

En esta fase se convierten los flujos físicos del sistema en impactos ambientales mediante modelos científicos. Esta evaluación consta de cinco elementos clave, de los cuales los tres primeros son obligatorios según la norma ISO 14040 (2006a):

1. Selección de categorías de impacto: se identifican las categorías de impacto ambiental relevantes, ya que no todas son significativas para el sistema analizado. Las categorías de impacto ambiental que se contemplan en el ACV se detallan en el Tabla 10.
2. Clasificación: se asignan los flujos del inventario a las categorías de impacto según su potencial para contribuir al impacto ambiental.
3. Caracterización: los flujos asignados a cada categoría de impacto se cuantifican mediante indicadores y modelos ambientales, lo que permite evaluar su capacidad de generar efectos negativos en el entorno. Traduce los datos del inventario en unidades de impacto equivalentes, expresadas en una métrica común que facilita la comparación y el análisis integral (Rosenbaum et al., 2018). Entre los indicadores utilizados para evaluar los impactos ambientales, se distinguen los siguientes:
 - Indicadores basados en puntos medios (midpoints) o categorías de impacto intermedias: se enfocan en efectos inmediatos, evaluando impactos específicos de diferentes emisiones y uso de recursos.

Al ofrecer una visión detallada de cada tipo de impacto, identifican puntos críticos donde es posible implementar estrategias para minimizar el daño ambiental (Rosenbaum et al., 2018).

- Indicadores basados en puntos finales (endpoints) o categorías de daño: estos indicadores amplían la perspectiva al considerar los efectos finales sobre tres áreas de protección clave:
 - Salud humana: miden cómo los contaminantes y procesos industriales afectan la salud, incrementando el riesgo de enfermedades respiratorias, cáncer y otras enfermedades graves.
 - Entorno natural: analizan el impacto sobre la biodiversidad y los ecosistemas, incluyendo la pérdida de especies y la degradación de hábitats.
 - Recursos naturales: evalúan el agotamiento de recursos no renovables, como minerales, combustibles fósiles y agua, reflejando su impacto en las generaciones futuras.
- Métodos combinados: integran tanto los indicadores de punto medio como los de punto final, proporcionando una perspectiva holística que facilita la comparación y toma de decisiones (Shrivastava y Unnikrishnan, 2021).

Al emplear este enfoque jerarquizado (Figura 23), la caracterización no solo genera una visión clara del impacto ambiental, sino que también ofrece una guía estratégica para tomar decisiones más informadas y sostenibles, impulsando un cambio positivo en la relación entre la producción y el entorno.

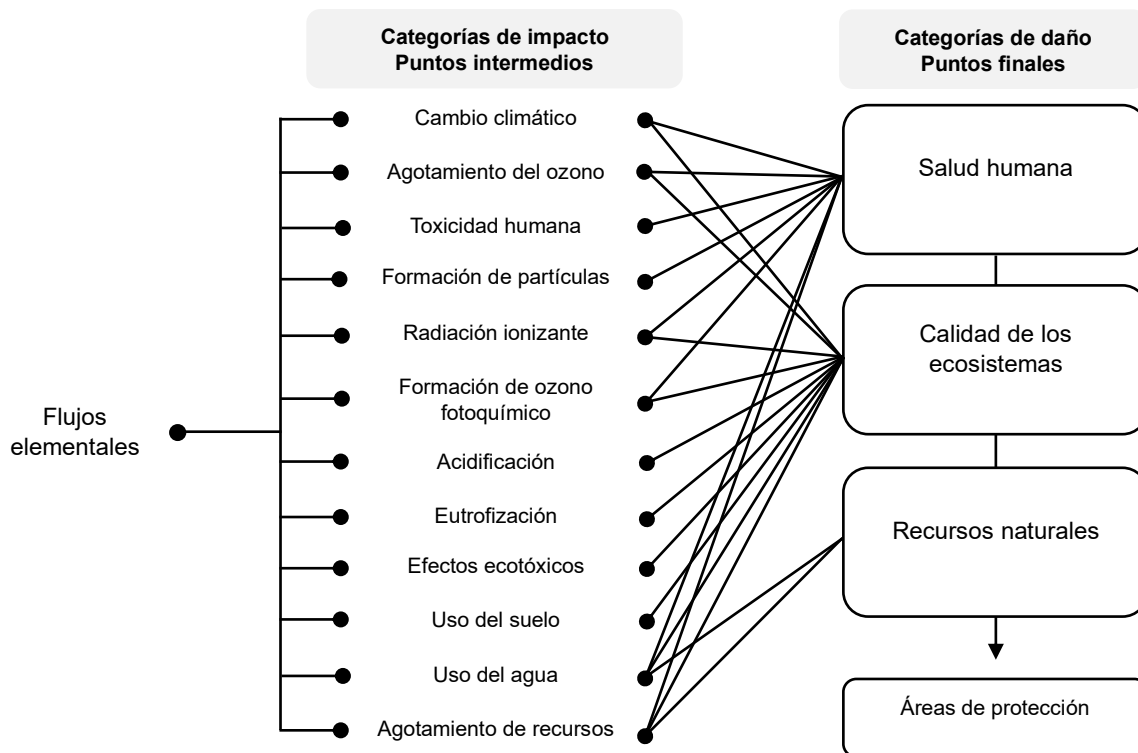


Figura 23. Indicadores del ACV

Fuente: adaptado de Rosenbaum et al., 2018; Shrivastava y Unnikrishnan, 2021.

4. Normalización: expresa las evaluaciones caracterizadas en relación con un conjunto de impactos de referencia, permitiendo comprender la magnitud relativa de cada impacto y facilitar la comparación entre categorías.
5. Agrupación o ponderación: clasifica y compara las categorías de impacto según su gravedad. Esto genera una puntuación única agregada para el sistema de producto, facilitando la toma de decisiones basada en la importancia de los diferentes impactos.

El ACV transforma los datos del inventario en impactos ambientales concretos, permitiendo identificar las áreas de mayor contribución y realizar comparaciones entre productos o procesos (Moreno y Espín, 2008; Olivera et al., 2016; Farjana et al., 2021).

Tabla 10. Categorías de impacto ambiental

Categorías de impacto ambiental	Definición	Indicador de impacto	Unidad
Cambio climático	Fenómeno observado en el aumento de la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas	Alteración de la temperatura global y de los fenómenos climáticos	Kilogramo equivalente de CO ₂
Agotamiento de la capa de ozono	Efectos sobre la capacidad de la capa de ozono atmosférica para proteger contra las radiaciones ultravioletas solares	Aumento de radiación ultravioleta UV-B y enfermedades en la piel Incremento en casos de cáncer, enfermedades respiratorias, otros efectos no cancerígenos y consecuencias de la exposición a radiaciones ionizantes	Kilogramo equivalente de CFC-11
Toxicidad humana (cancerígena o no)	Nivel de riesgo de exposición a sustancias tóxicas y productos químicos en los seres humanos		CTUe (Unidad tóxica comparativa para las personas)
Formación de partículas	Partículas sólidas finas, divididas o suspendidas en el aire, originadas por la pulverización de metales o minerales como rocas o suelos	Aumento de partículas suspendidas en el aire de diversos tamaños	Kilogramo equivalente de PM _{2,5}
Radiación ionizante	Tipo de energía liberada por átomos en forma de ondas electromagnéticas (como rayos gamma o rayos X) o partículas (como partículas alfa y beta o neutrones)	Mayor exposición a radiación ionizante	Kilogramo equivalente de U235
Formación de ozono fotoquímico	Se genera cuando la luz solar actúa sobre precursores químicos, formando oxidantes fotoquímicos, de los cuales el ozono (O ₃) es el más abundante y tóxico	Incremento de smog en la atmósfera	Kg equivalente de COVNM Kg equivalente de ozono
Acidificación	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua debido al aporte de ácidos y la reducción del pH por las emisiones acidificantes de origen antropogénico	Aumento de la acidez en los sistemas hídricos y en el suelo	Mol equivalente de H ⁺ Kg equivalente de SO ₂

Eutrofización	Enriquecimiento de nutrientes en un ecosistema, particularmente en ambientes acuáticos, causado por un aporte elevado de nutrientes inorgánicos	Elevación de las concentraciones de nitrógeno y fósforo en ecosistemas	Mol equivalente de N Agua dulce: kg equivalente de P Agua de mar: kg equivalente de N
Ecotoxicidad	Efectos tóxicos en el ecosistema derivados de productos químicos, incluyendo la presencia de compuestos xenobióticos como bifenilos policlorados (PCB) y ciertos insecticidas	Pérdida de biodiversidad y posible extinción de especies	CTUe (Unidad tóxica comparativa para los ecosistemas)
Uso de suelo	Impacto en la tierra provocado por la agricultura, asentamientos humanos y extracción de recursos, alterando las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo	Pérdida de especies, suelo, materia orgánica seca, entre otros recursos	PDF/m ² -m ² a Kilogramo (déficit)
Uso de agua	Consumo de agua	Agotamiento del recurso agua	m ³ de consumo de agua
Agotamiento de los recursos	Consumo de materiales extraídos de la naturaleza, resultando en una disminución de la disponibilidad de recursos debido a prácticas de uso no sostenibles	Agotamiento y disminución de recursos naturales	Kilogramo equivalente de Sb

Fuente: elaborado con datos de Farjana et al., 2021; Ihobe, 2009; Olivera et al., 2016; Rosenbaum et al., 2018.

2.4.4.4 Interpretación de los resultados

Tras la evaluación del impacto, se identifican las partes del sistema que más contribuyen a los impactos ambientales, facilitando la identificación de puntos críticos y áreas de oportunidad, apoyando la toma de decisiones en función del objetivo, alcance y unidad funcional del sistema analizado. La interpretación debe adaptarse al público objetivo y estar alineada con la definición del objetivo (Farjana et al., 2021).

Después de identificar las partes del sistema que más contribuyen al impacto, pueden realizarse ajustes al sistema y actualizar el inventario para una nueva evaluación. Esto debe complementarse con un nuevo análisis de sensibilidad o incertidumbre para asegurar la confiabilidad y precisión de los resultados. (Hauschild et al., 2018).

2.4.5 Softwares para el ACV

Actualmente, existen diversas herramientas de software en el mercado diseñadas para evaluar los impactos ambientales siguiendo la metodología del ACV. Estas herramientas facilitan la recopilación de datos y permiten modelar sistemas productivos de manera eficiente (Lopes et al., 2017; Moreno y Espín, 2008). La elección del software más adecuado depende de factores como los recursos disponibles, las funcionalidades específicas y la accesibilidad a bases de datos, como se menciona en el Tabla 11.

Tabla 11. Software utilizado en el análisis del ciclo de vida

Software	Características
SimaPro	Herramienta más utilizada para el ACV, ya que permite modelar procesos complejos con precisión y ofrece una amplia base de datos y métodos para evaluar impactos ambientales
GABI	Permite analizar y representar gráficamente ciclos de vida complejos, siendo especialmente útil en los sectores automotriz, químico y manufacturero
Umberto	Integra métodos y bases de datos comunes de ACV, y emplea cm.chemicals, especializada en productos químicos y plásticos
Open LCA	Es un software gratuito y de código abierto, compatible con diversas bases de datos

Fuente: elaborado con datos de GreenDelta, s.f.; Ihobe, 2009; PRé Sustainability, s.f.

Cada uno de estos softwares permite a los usuarios acceder a herramientas, bases de datos y métodos de evaluación específicos para cada sector o producto que se pretende analizar, facilitando el análisis de los impactos ambientales de productos o procesos específicos (Auras y Selke, 2023; Ihobe, 2009; Lopes et al., 2017). Las bases de datos contenidas en estos softwares ofrecen información cuantitativa sobre recursos, emisiones e impactos ambientales asociados a distintos procesos, útiles para evaluar el impacto ambiental de los sistemas (PRé Sustainability, 2022). En el Tabla 12 se mencionan algunas de las bases de datos que se pueden encontrar en los diferentes softwares.

Tabla 12. Bases de datos del software

Base de datos	Descripción
Ecoinvent	La base datos más usada mundialmente, contiene datos internacionales de inventarios del ciclo de vida para diversos sectores, incluyendo producción de energía, transporte, materiales de construcción, productos químicos, metales y agroalimentaria
Agri-footprint	Es una base de datos orientada al sector agrícola y alimentario, incluye inventarios de procesos de cultivo, producción animal y procesamientos de productos animales, transporte, fertilizantes y materiales auxiliares
AGRIBALYSE	Contiene bases de datos de indicadores ambientales de productos agrícolas y alimentarios de Francia

Fuente: elaboración propia con datos de PRé Sustainability, 2022.

Por otra parte, las metodologías son marcos estandarizados para convertir los datos del inventario en indicadores de impacto ambiental, permitiendo la cuantificación de efectos ambientales en diversas categorías. Estos métodos permiten evaluar y categorizar los impactos ambientales de los flujos de materiales y energía a lo largo del ciclo de vida de un producto o proceso, y convertir los datos del inventario en categorías de impacto cuantificables (Tabla 13) (Rosenbaum et al., 2018).

Tabla 13. Métodos para el análisis del ciclo de vida

Método	Descripción
IPCC	Es un método desarrollado por el Panel Internacional sobre Cambio Climático que se basa en el potencial de calentamiento global, considerando diferentes horizontes temporales (20, 100 o 500 años)
ReCiPe	Este método europeo combina enfoques de nivel intermedio (punto medio) y nivel de daño final (punto final)
CML	Evalúa múltiples categorías de impacto. Utiliza factores de caracterización de impactos basados en datos promedio globales o europeos
ILCD	Este método está alineado con las normativas europeas y ha sido diseñado como una referencia internacional

Fuente: elaboración propia con datos de PRé Sustainability, 2022.

Cada uno de estos softwares se han empleado en diferentes sectores productivos con el objetivo principal de desarrollar productos sostenibles que integren aspectos ambientales en su diseño de producción para reducir su impacto a lo largo de su ciclo de vida reduciendo el consumo de recursos y las emisiones.

III. Marco metodológico

Este apartado expone la metodología que se utilizó para cumplir con los objetivos de la presente investigación, detallando el enfoque adoptado, el diseño de investigación, los métodos de obtención de datos y las técnicas de análisis utilizadas para evaluar el impacto ambiental de la elaboración del queso tipo Oaxaca en la microempresa Productos Lácteos Galván. A continuación, se detalla el esquema general de la metodología (Figura 24).

Definición del alcance y objetivo	Objetivo del estudio	Alcance del estudio	Unidad funcional	Sistema de estudio	Función del sistema
	Evaluar el impacto ambiental de la producción de queso tipo Oaxaca a través del análisis del ciclo de vida	"de la puerta a la puerta"	1 kg de queso tipo Oaxaca	Producción de queso tipo Oaxaca	Producir un alimento queso tipo Oaxaca, cuya finalidad es satisfacer la demanda del consumidor proporcionando un producto lácteo de características similares al queso Oaxaca tradicional, pero elaborado con una mezcla de leche de vaca y leche en polvo
Análisis del inventario	Datos	Entradas		Salidas	
	Proporcionados por la planta. Reflejan el ciclo de producción de un mes, y se estimó el promedio mensual basado en la unidad funcional de 1 kg	Agua Electricidad Gas Leche fluida Leche en polvo Ácido láctico Cloruro de calcio Cloruro de sodio Cuajo		Queso Suero Agua residual	
Evaluación del impacto	Selección de categorías de impacto	Software	Método	Base de datos	
	Cambio climático Eutrofización Acidificación Agotamiento de recursos Uso de agua	SimaPro 9.4.0.2	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.07	Agri-footprint Ecoinvent	
Interpretación	Identificación de las partes del sistema que más contribuyen a los impactos ambientales				
	Análisis de los resultados obtenidos de la evaluación de los impactos, con el fin de obtener conclusiones que permitieron comprender la magnitud de los impactos ambientales.				

Figura 24. Metodología del ACV para la elaboración del queso tipo Oaxaca

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Delimitación espacial y temporal

El estudio se llevó a cabo en la microempresa Productos Lácteos Galván, ubicada en la Colonia Agustín Olvera, S/N, en Acatlán, Hidalgo, México (Figura 25). Esta región se caracteriza por poseer un clima semiseco templado, con una temperatura media anual de 14 °C y una precipitación promedio de 600 mm (Gobierno del Estado de Hidalgo y Secretaría de Planeación, Desarrollo Regional y Metropolitano, 2010). Las coordenadas geográficas aproximadas del lugar son 20.1207° N de latitud y -98.4473° W de longitud (Google Earth, 2024).



Figura 25. Ubicación de la microempresa Productos Lácteos Galván

Fuente: elaboración propia con Google Earth, 2024.

La recopilación de los datos se realizó durante el trabajo de campo en enero de 2024 (Figura 26), obteniendo el inventario de las entradas y salidas del sistema, desde la recepción de la leche hasta el producto final.



Figura 26. Trabajo de campo

Fuente: elaboración propia.

3.2 Tipo de investigación

La investigación adoptó un enfoque mixto, combinando aspectos cuantitativos y cualitativos (Bryman, 2006; Hernández-Sampieri, 2018; Moscoso, 2017; Pinzón Rodríguez, 2018). Además de un enfoque holístico e integral al considerar todas las etapas del ciclo de vida y evaluar los impactos ambientales en cada una de ellas.

- **Enfoque Cuantitativo:** se centró en la obtención y análisis de datos medibles sobre el uso de recursos, vertidos y otros impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida. Para ello, se utilizaron bases de datos específicas y herramientas de software que permitieron modelar y analizar los datos con precisión (Bjørn et al., 2018d; Farjana et al., 2021; Massolo y Castagnasso, 2015).
- **Enfoque Cualitativo:** se enfocó en la definición de objetivos y en aspectos del análisis, tales como la toma de decisiones sobre los límites del sistema, unidad funcional, selección de categorías de impacto relevantes y la interpretación de los resultados generados por el software SimaPro, los cuales se representaron gráficamente y requirieron interpretación (Farjana et al., 2021; Massolo y Castagnasso, 2015).

A diferencia de otros estudios, el ACV no utiliza muestras ni poblaciones en el sentido estadístico. Su objetivo no es generar resultados extrapolables a partir de una muestra representativa, sino analizar datos concretos y específicos del sistema productivo evaluado, aplicando métodos que permitan medir su impacto ambiental de manera precisa.

La combinación de enfoques cuantitativos y cualitativos permitió obtener una evaluación integral, facilitando la toma de decisiones. Según la clasificación de Ducoing Watty (2009), esta investigación se categorizó como observacional, descriptiva, prospectiva y longitudinal, como se ilustra en la Figura 27.

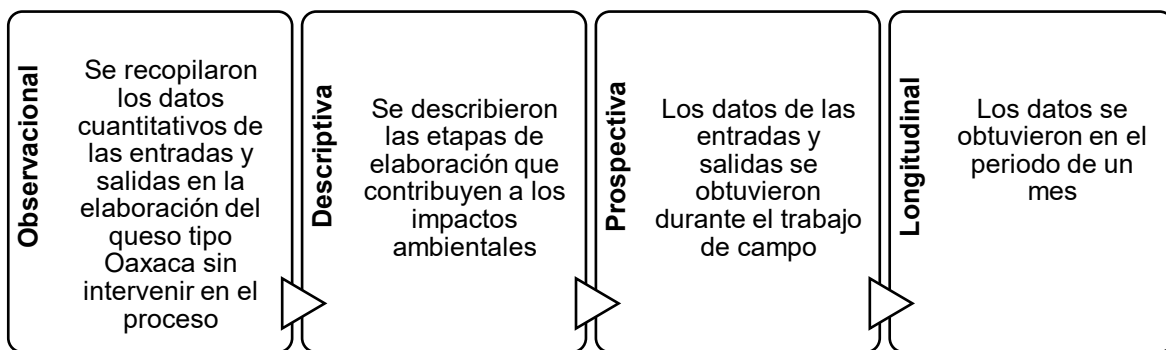


Figura 27. Clasificación de la investigación

Fuente: elaboración propia con datos de Ducoing Watty, 2009.

3.3 Diseño estadístico

Se empleó un diseño de estadística descriptiva para recopilar y analizar los datos de las entradas y salidas en la elaboración del queso tipo Oaxaca mediante tablas y gráficos, con el objetivo de describir y resumir los impactos ambientales asociados a su producción. Las variables de interés, correspondientes al inventario de entradas y salidas, se midieron en el Tabla 14. La recopilación de estos datos se realizó por observación directa en la planta, complementada con información proporcionada por la planta.

Los datos reflejan el ciclo de producción de un mes, estimado a un promedio mensual para una unidad funcional de 1 kg de queso tipo Oaxaca. Para el análisis estadístico, se utilizó el software SimaPro, que calculo el impacto ambiental a partir del inventario de entradas y salidas del sistema. Los resultados se presentaron en forma de gráficos y porcentajes, interpretados en función del objetivo del estudio (SimaPro México, s.f.)

3.4 Etapas del Análisis del Ciclo de Vida

El ACV se realizó conforme a lo estipulado en las normas ISO 14040 y 14044, que establece cuatro etapas: definición del alcance y objetivos, análisis del inventario, evaluación del impacto ambiental e interpretación de los resultados (ISO, 2006a; ISO, 2006b; Hauschild et al., 2018). A continuación, se describen estas cuatro etapas:

3.4.1 Etapa 1: Definición del alcance y objetivos

Objetivo del estudio

El objetivo del análisis fue evaluar, a través de análisis del ciclo de vida, el impacto ambiental de la producción del queso tipo Oaxaca de la microempresa Productos Lácteos Galván.

Alcance del estudio

El análisis desarrollado en esta investigación se centró exclusivamente en evaluar los impactos ambientales asociados a las etapas productivas específicas del queso tipo Oaxaca en la microempresa Productos Lácteos Galván (Figura 42). Bajo un enfoque "de la puerta a la puerta", se consideraron únicamente los procesos que tienen lugar desde la recepción de la leche hasta la obtención del producto final (Bjørn et al., 2018b). Elementos ajenos a la producción directa, como detergentes, productos de limpieza, embalaje, almacenamiento, transporte, distribución, venta y aguas residuales de limpieza, quedaron fuera del alcance del estudio (Ihobe, 2009; Olivera et al., 2016; Vargas Mora y Gil Martínez, 2021). Subprocesos como el descremado del suero de la fundida, la producción de requesón a partir del suero quedaron fuera del alcance del estudio.

Estos subprocesos fueron excluidos debido a su naturaleza secundaria dentro del sistema productivo del queso tipo Oaxaca. Ya que no forman parte del flujo principal de recursos y procesos asociados directamente con la elaboración de queso.

La delimitación del enfoque responde a la necesidad de analizar los efectos ambientales directamente vinculados a los procesos clave de producción. Esto asegura que el estudio se mantenga alineado con los objetivos principales del estudio, que se enfocan en identificar y cuantificar los impactos directamente relacionados con las operaciones productivas.

La exclusión de elementos como detergentes y productos de limpieza, aunque relevantes en términos de higiene y mantenimiento, no forman parte del flujo primario de recursos involucrados en la transformación de la leche en queso. Incluir estos insumos requeriría evaluar procesos secundarios, como su uso específico en actividades de limpieza, lo cual excede los límites establecidos. De igual manera, las aguas residuales de limpieza no fueron incluidas, ya que su análisis está más relacionado con el manejo y tratamiento de residuos líquidos, aspectos fuera del núcleo productivo. En cuanto al embalaje, este no interviene en las etapas esenciales de producción, ya que representa una fase posterior vinculada a la comercialización, un ámbito que también quedó fuera del alcance. Asimismo, actividades como el almacenamiento, transporte, distribución y venta fueron excluidas, pues pertenecen a etapas de logística y comerciales ajenas al proceso. Además, la planta distribuye su producto para venta de forma inmediata tras la finalización del proceso, sin realizar un almacenamiento.

El enfoque adoptado permite que los resultados reflejen de manera más clara los impactos ambientales intrínsecos al proceso productivo del queso tipo Oaxaca, proporcionando una base sólida para proponer estrategias de mejora que sean directamente aplicables al núcleo de las operaciones de fabricación.

Función del sistema

La principal función del sistema es producir un alimento queso tipo Oaxaca, cuya finalidad es satisfacer la demanda del consumidor proporcionando un producto lácteo de características similares al queso Oaxaca tradicional, pero elaborado con una mezcla de leche de vaca y leche en polvo. El producto está diseñado para cumplir con los requerimientos de textura, sabor y presentación que los consumidores asocian con el queso Oaxaca.

Unidad funcional

Debido a la regular presentación comercial del producto (Villegas de Gante, 2012), se estableció como unidad funcional 1 kg de queso tipo Oaxaca (Figura 28), elaborado diariamente en la microempresa Productos Lácteos Galván durante el mes de enero.

En este estudio se decidió evitar la asignación, ya que la asignación consiste en dividir los impactos ambientales entre los diferentes productos y subproductos de un sistema. Es más adecuado cuando los subproductos poseen impactos significativos o no cuentan con un uso final claramente definido. En el caso de la microempresa Productos Lácteos Galván, el suero generado durante la producción no se considera un residuo, ya que tienen un uso final definido, utilizado como alimento para el ganado de engorda. Dado que el suero cumple una función en otro sistema y no se desperdicia, aplicar una asignación podría distorsionar los resultados al desviar parcialmente los impactos del proceso productivo del queso.

Además, evitar la asignación asegura que los resultados del análisis reflejen con mayor precisión los impactos ambientales internos a la producción del queso tipo Oaxaca. Esto permite identificar áreas específicas para mejorar y proponer estrategias directamente aplicables a las etapas críticas de la operación, sin que los resultados sean influenciados por las decisiones de asignación. De esta manera, el enfoque adoptado no sólo garantiza un análisis más transparente y consistente, sino que también alinea el alcance del estudio con los objetivos planteados, enfocados exclusivamente en las operaciones productivas del queso tipo Oaxaca.



Figura 28. Queso tipo Oaxaca Productos Lácteos Galván

Fuente: elaboración propia.

Sistema de estudio

La microempresa Productos Lácteos Galván se dedican a la producción artesanal de diversos productos lácteos, como el queso tipo Oaxaca, panela y canasto, así como subproductos como requesón y crema. La planta (Figura 29) opera los 365 días del año, caracterizándose por su enfoque artesanal, se basa en la experiencia empírica de los maestros queseros y la utilización de mano de obra, sin recurrir a maquinaria especializada.

El estudio se centró exclusivamente en las etapas relacionadas con la producción del queso tipo Oaxaca, desde la recepción de la leche hasta la obtención del producto final, tomando como unidad funcional de 1 kg de queso tipo Oaxaca

El queso producido por esta microempresa se clasifica como “tipo Oaxaca” debido a que no cumple con los estándares establecidos por la NOM-223-SCFI/SAGARPA-2018, que regula los productos lácteos fermentados y derivados en México. Según esta normativa, el queso tipo Oaxaca debe elaborarse exclusivamente con leche fresca de vaca y sin la adición de ingredientes que modifiquen su composición original.

En la microempresa, el proceso de elaboración del queso tipo Oaxaca inicia con la mezcla de leche de vaca y leche en polvo, que se acidifica utilizando ácido láctico. Posteriormente, la cuajada resultante se somete a un amasado con agua caliente hasta alcanzar la elasticidad deseada. Finalmente, la cuajada se estira para formar las correas que se entrelazan en forma de “bola” en pesajes de 1 y 3.5 kg (Villegas de Gante, 2012; Villegas de Gante et al., 2014).



Figura 29. Planta Productos Lácteos Galván

Fuente: elaboración propia.

Dimensión temporal, geográfica y público objetivo

El estudio se realizó durante enero de 2024 en la microempresa Productos Lácteos Galván, ubicada en el municipio de Acatlán, estado de Hidalgo, México (Figura 30). Los resultados están dirigidos a la comunidad académica y a personas interesadas en conocer el ACV y la gestión ambiental (Bjørn et al., 2018; Farjana et al., 2021).



Figura 30. Dimensión geográfica del ACV

Fuente: elaboración propia.

3.4.2 Etapa 2: Análisis del inventario del ciclo de vida

Los datos utilizados en este estudio corresponden a información primaria, la cual, según Farjana et al. (2021), se refiere a datos proporcionados directamente por la empresa. Mediante un diagrama de bloques del proceso productivo, se identifica en las entradas y salidas clave, así como los datos cuantitativos necesarios para el análisis. En el Tabla 14 se detallan las entradas, salidas y unidades consideradas en el análisis del queso tipo Oaxaca. Los datos recopilados abarcan un ciclo de producción mensual y se estimó el promedio mensual basado en una unidad funcional de 1 kg de queso tipo Oaxaca (Hauschild, 2018; ISO, 2006a; PRé Sustainability, 2022; Vargas Mora y Gil Martinez, 2021).

Tabla 14. Inventario del ciclo de vida del queso tipo Oaxaca identificado

Entradas	Unidades
Agua	l
Consumos energéticos	
Electricidad	kWh
Gas	l
Insumos	
Ácido láctico	l
Cloruro de calcio	kg
Cloruro de sodio	kg
Cuajo	l
Leche en polvo	kg
Leche fluida	l
Salidas	
Aguas residuales	l
Queso	kg
Suero	l

Fuente: elaboración propia.

3.4.3 Etapa 3: Evaluación del impacto

La evaluación del impacto ambiental de este estudio se realizó utilizando el software SimaPro 9.4.0.2. Una herramienta ampliamente reconocida por su precisión en el cálculo de impactos ambientales en comparación con otras plataformas (Herrmann y Moltesen, 2015; Lopes et al., 2017; PRé Sustainability, 2022.). Esta ventaja se debe, principalmente, a los formatos de datos empleados y a los enfoques de modelado que incorpora. Para este análisis, se utilizaron las bases de datos Agri-footprint y Ecoinvent, las cuales contienen información detallada y específica sobre procesos agroalimentarios, lo que las hace especialmente adecuadas para estudios en la agroindustria láctea (Alves et al., 2019; Baldini et al., 2018; Dalla Riva et al., 2017; Finnegan et al., 2017; González-García et al., 2013a; Naranjo et al., 2023).

Asimismo, se aplicó el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.07 que permite analizar problemas ambientales y los daños asociados mediante dos niveles de evaluación de impacto, puntos medios y puntos finales (Canellada, 2017; Goedkoop et al., 2009).

El método ReCiPe es ampliamente utilizado en análisis ambientales de la agroindustria láctea debido a su enfoque integral y la precisión en la evaluación de impactos (Alves et al., 2019; Borghesi et al., 2022; Kim et al., 2023). Los impactos de punto intermedio (midpoint) evalúan efectos directos y específicos dentro de categorías individuales de impacto ambiental, proporcionando un análisis detallado. Mientras que los impactos de punto final (endpoint) consideran los daños ambientales finales evaluados en tres áreas de protección: salud humana, calidad de los ecosistemas y recursos naturales.

Además, incluye tres perspectivas temporales para la evaluación de impactos, como se ilustra en la Figura 31 (Goedkoop et al., 2009; PRé Sustainability, 2022).

- Individualista (I): enfocada en el corto plazo y en impactos bien comprendidos, con un enfoque conservador.
- Jerárquica (H): basada en consensos científicos, ya que adopta un enfoque intermedio en cuanto a duración y alcance de los efectos ambientales.
- Igualitario (E): orientada al largo plazo, con un enfoque precautorio que considera posibles impactos futuros con mayor incertidumbre.

Para este estudio, se seleccionó el enfoque de puntos intermedios (midpoints) bajo la perspectiva jerárquica (H), ya que permite desglosar los impactos ambientales en categorías específicas, lo que permite un análisis detallado y preciso de los efectos directos generados por cada etapa del proceso productivo (Goedkoop et al., 2009; PRé Sustainability, 2022). Este enfoque ha demostrado ser ampliamente efectivo en estudios previos relacionados con el sector lácteo (Alves et al., 2019; Borghesi et al., 2022; Canellada, 2017; Kim et al., 2023), ya que facilita la identificación de las áreas críticas de impacto ambiental.

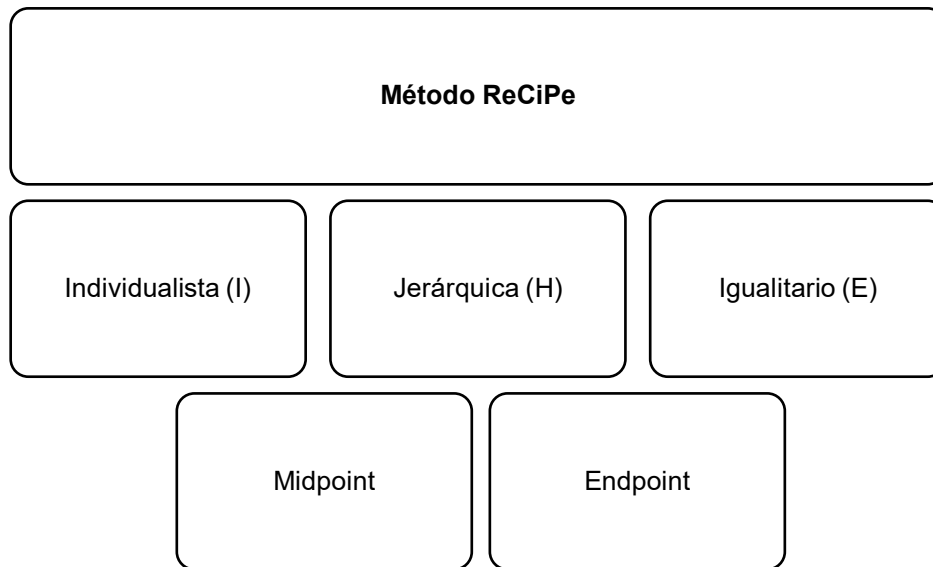


Figura 31. Método ReCiPe

Fuente: elaboración propia.

Las categorías de impacto ambiental evaluadas en este estudio, descritas en el Tabla 15, fueron elegidas en función de su relevancia en el perfil ambiental del producto y la disponibilidad de datos específicos. Esta selección constituye la base del ACV del producto, ya que permite evaluar y priorizar los impactos ambientales en función de las fases del proceso y los recursos empleados, optimizando el enfoque para la toma de decisiones.

El software SimaPro automatiza las etapas de clasificación y caracterización de los flujos de entrada y salida, asignando los flujos del inventario a las categorías de impacto ambiental correspondientes. Posteriormente, aplica factores de caracterización para cuantificar el impacto de cada flujo en su categoría respectiva.

Tabla 15. Selección de las categorías de impacto

Categoría de impacto	Relevancia para producción de queso tipo Oaxaca	Justificación	Autores
Cambio climático	Emisiones de gases de efecto invernadero (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O) derivadas del uso de energía para la pasteurización, cuajado y almacenamiento	Evalúa la contribución del proceso al calentamiento global, permitiendo identificar fuentes claves de emisiones relacionadas directamente con el procesamiento del queso Permite analizar cómo el uso de energía durante el procesamiento del queso afecta la calidad del suelo en regiones cercanas a través de la acidificación, un problema ambiental que impacta los ecosistemas terrestres	(Alves et al., 2019; Salas-Vargas et al., 2021)
Acidificación terrestre	Emisiones de NO _x y SO ₂ provenientes de la combustión de combustibles fósiles en el proceso de elaboración	Es clave para comprender los impactos en la calidad del agua debido al manejo de residuos líquidos industriales, que pueden contribuir a la proliferación de algas y afectar los ecosistemas acuáticos locales	(Alves et al., 2019)
Eutrofización de agua dulce	Descarga de nutrientes (N y P) al agua debido a los residuos líquidos generados en el proceso		(Bava et al., 2018)

Escasez de recursos fósiles	Consumo de combustibles fósiles y minerales para la energía requerida en el procesamiento y almacenamiento	Analiza el impacto ambiental del uso de recursos para mejorar la eficiencia en el uso de materiales y energía en la elaboración	(Alves et al., 2019)
Uso de agua	Uso intensivo de agua para el fundido de la masa y enfriamiento de las correas	Es crucial evaluar el impacto en los recursos hídricos locales, identificando oportunidades para optimizar el consumo de agua en etapas críticas del procesamiento y reducir la presión sobre los recursos hídricos	(Alves et al., 2019; González-García et al., 2013b; Santos et al., 2017)

Fuente: elaboración propia.

3.4.4 Etapa 4: Interpretación

La etapa de interpretación se centró en el análisis de los resultados obtenidos de la evaluación de los impactos, con el fin de obtener conclusiones que permitieron comprender la magnitud de los impactos ambientales. Se identificaron las categorías de impacto de mayor contribución. Además, se llevó a cabo una evaluación cualitativa y cuantitativa de los datos recopilados para asegurar que fueran coherentes con el objetivo y alcance establecidos. Estas conclusiones sirvieron para formular recomendaciones orientadas a mejorar la producción y la continuación para optimizar los procesos y reducción de los impactos.

IV. Resultados y discusión

4.1 Proceso de elaboración

El proceso de elaboración del queso tipo Oaxaca en la empresa Productos Lácteos Galván se ilustra en la Figura 42. Este inicia con la recepción de la leche en la planta, donde se realizan pruebas de acidez titulable y densidad. Una vez que la leche cumple con los parámetros, se introduce a la planta para su procesamiento.

La leche se vierte en tinas de proceso (Figura 32), a las cuales se le añade leche en polvo de vaca, previamente rehidratada con la misma leche. También se adiciona ácido láctico para la acidificación y cloruro de calcio, ajustando el pH en un rango de 5.3 a 5.4, crucial para lograr la textura y el sabor característicos del queso tipo Oaxaca (Figura 33). Durante esta etapa, las tinas se mantienen a una temperatura de entre 35 y 37°C.



Figura 32. Tina de proceso

Fuente: elaboración propia.



Figura 33. Adición de ácido láctico

Fuente: elaboración propia.

Una vez alcanzada la acidificación, se añade el cuajo a la leche, que se encuentra a una temperatura de 35 a 37°C. Después de aproximadamente 15 minutos, la leche se coagula, y el gel resultante se corta con liras de acero inoxidable, dejando cubos de 1 cm (Figura 34). Luego de 10 a 20 minutos, el suero comienza a liberarse (Figura 35), asentándose en el fondo de la tina. Para facilitar la maduración del grano, se utilizan rastrillos para resuspender las partículas de cuajada y liberar más suero (Figura 36).



Figura 34. Cortado del gel con liras

Fuente: elaboración propia.



Figura 35. Liberación del suero

Fuente: elaboración propia.



Figura 36. Movimiento del grano

Fuente: elaboración propia.



Figura 37. Asentado del grano

Fuente: elaboración propia.

El grano se deja secar durante 15 a 30 minutos antes de pasar a un molino (Figura 37), donde la masa se muele y se deposita en un cazo de acero inoxidable (Figura 39). Posteriormente, esta masa se somete a un fundido vertiendo agua caliente a la masa a una temperatura de 70-75°C durante unos 15 minutos (Figura 39) hasta que comience a “chiclear”. De forma manual, se forman las correas del queso tipo Oaxaca, estirándolas y sometiéndolas a un choque térmico en agua a -4°C para estabilizar el producto (Figura 40).



Figura 38. Molido de la masa

Fuente: elaboración propia.



Figura 39. Fundido de la masa

Fuente: elaboración propia.

El salado de las correas se realiza por frotación (Figura 41) con sal yodada, y finalmente, se procede a la formación de las bolas de queso tipo Oaxaca, que son pesadas, empaquetadas y etiquetadas para su distribución.



Figura 40. Alargado de las correas

Fuente: elaboración propia.



Figura 41. Salado por frotación

Fuente: elaboración propia.

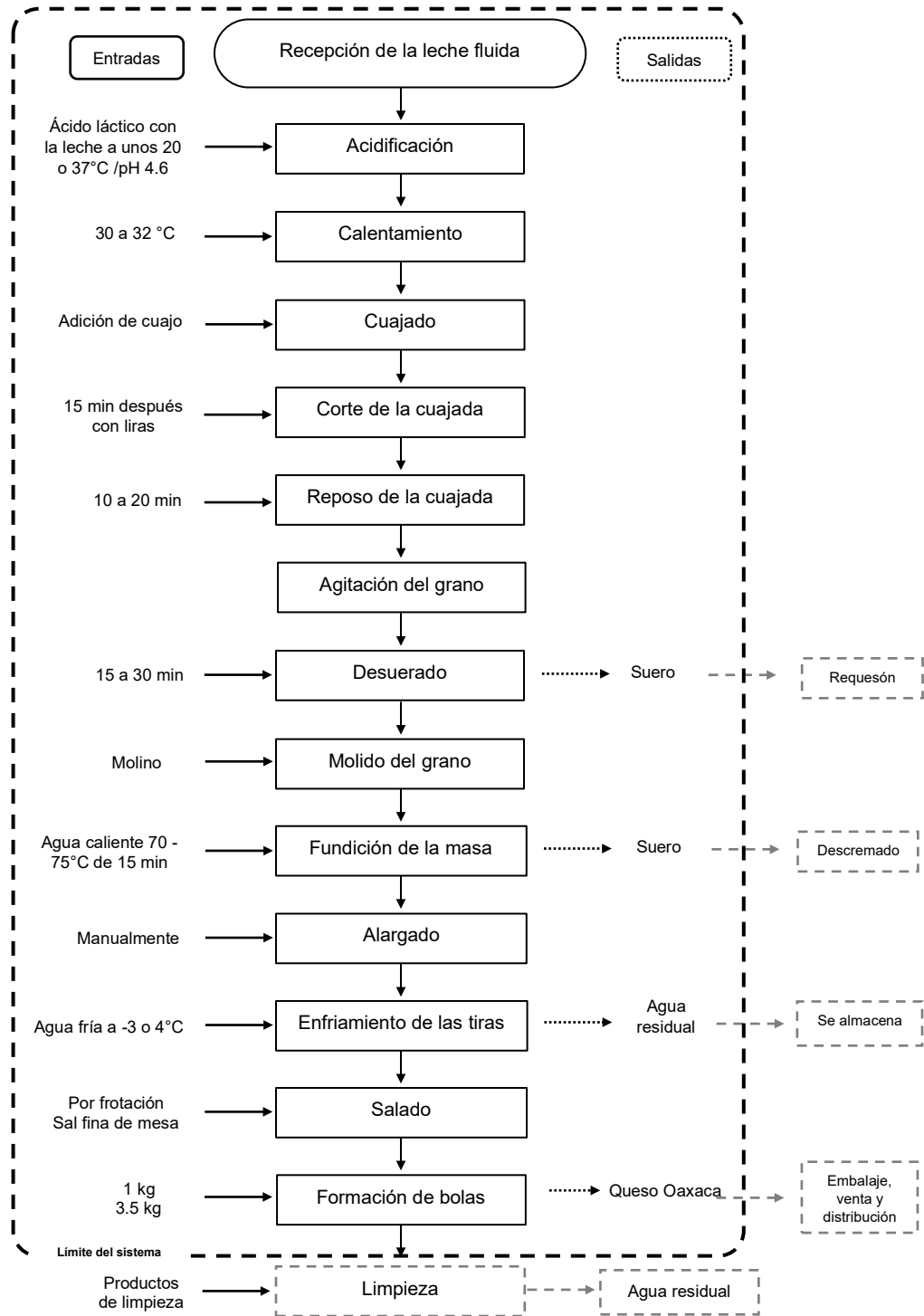


Figura 42. Límites del sistema y diagrama de bloques del ciclo de vida del queso tipo Oaxaca

Fuente: elaboración propia.

4.2 Inventario de ciclo de vida

El Tabla 16 presenta los datos del inventario relacionado con las entradas y salidas registradas durante la producción de queso tipo Oaxaca, correspondientes al periodo entre el 27 de diciembre de 2023 al 27 de enero del 2024.

Tabla 16. Inventario del queso tipo Oaxaca

Entrada	Cantidad	Unidad
Agua	10,000	l
Consumos energéticos		
Electricidad	1,418	kWh
Gas	430	l
Insumos		
Ácido láctico	50	l
Cloruro de calcio	1.5	kg
Cloruro de sodio	150	kg
Cuajo	1.5	l
Leche en polvo	15,000	kg
Leche fluida	20,000	l
Salidas		
Aguas residuales	11,000	l
Queso tipo Oaxaca	3,500	kg
Suero	31,500	l

Fuente: elaboración propia.

Los datos reflejan la producción mensual de la planta, que opera de manera continua y uniforme durante los 365 días del año. Dado que no existen variaciones significativas en la producción a lo largo del año, un mes constituye una muestra representativa de su actividad anual. Por esta razón, los datos mensuales pueden extrapolarse a un periodo anual, lo que facilita la interpretación y permite calcular indicadores en una base temporal mayor, como los impactos anuales.

4.2.1 Entradas del proceso de producción

Leche

La leche fluida utilizada en el proceso proviene de ranchos lecheros cercanos a la planta. Sin embargo, debido a la escasez de leche fluida en la región, se complementa con leche en polvo de vaca importada de Estados Unidos, que contiene un 34% de proteína. Esta se rehidrata utilizando la misma leche fluida. Diariamente se emplea 20 mil litros de leche fluida y 15 mil de leche en polvo.

Agua

El agua utilizada en la planta es transportada mediante pipas desde pozos de agua de aguas profundas y almacenada en dos cisternas de la planta, cada una con una capacidad de 60 mil litros, ya que la planta no cuenta con acceso directo a la red de agua. El agua empleada en la etapa de enfriamiento de las bandas del queso se recicla y reutiliza en el mismo proceso. Al finalizar el ciclo productivo diario, el agua se destina al enjuague de equipos y limpieza de los pisos.

Electricidad

La electricidad utilizada proviene de la red eléctrica. Destinada para el funcionamiento de los equipos e iluminación de la planta. El consumo mensual estimado para la producción de queso es de 1,418 kW/h basado en la factura de electricidad.

Materias primas

Las materias primas esenciales para la elaboración del queso tipo Oaxaca incluyen ácido láctico, cloruro de calcio, cuajo y sal yodada, ingredientes clave que garantizan las características distintivas del producto.

4.2.2 Salidas del proceso de producción

Queso

La planta produce diariamente 3,500 kg de queso tipo Oaxaca, los cuales se pesan y empaquetan en presentaciones de 1 y 3.5 kg. Estos son distribuidos de manera inmediata a la Central de Abasto de la Ciudad de México y la Central de Abasto de Pachuca, por lo que la planta no cuenta con stock.

Suero

El suero resultante del proceso de elaboración se somete a un tratamiento para obtener requesón. Además, el suero generado durante el fundido de la masa se descrema para obtener crema. Este suero se almacena en una cisterna con capacidad de 62 mil litros, conectada al drenaje del área de producción, donde se recolectan los vertidos generados en cada etapa y en la limpieza de equipos y pisos. El suero almacenado se dona para alimentar ganado de engorda, siendo recolectado diariamente por una pipa que lo distribuye a ranchos cercanos.

Agua residual

El agua residual proviene de la tina de enfriamiento que se utiliza para la limpieza de los equipos. Posteriormente, es vertida al drenaje de la planta que está conectado a la cisterna que almacena el suero.

4.3 Evaluación de los impactos ambientales

A través de la aplicación de herramientas metodológicas específicas, como el ACV, el software SimaPro y el método ReCiPe midpoints (H), se cuantificaron los principales impactos ambientales asociados al proceso productivo del queso tipo Oaxaca (Figura 43).

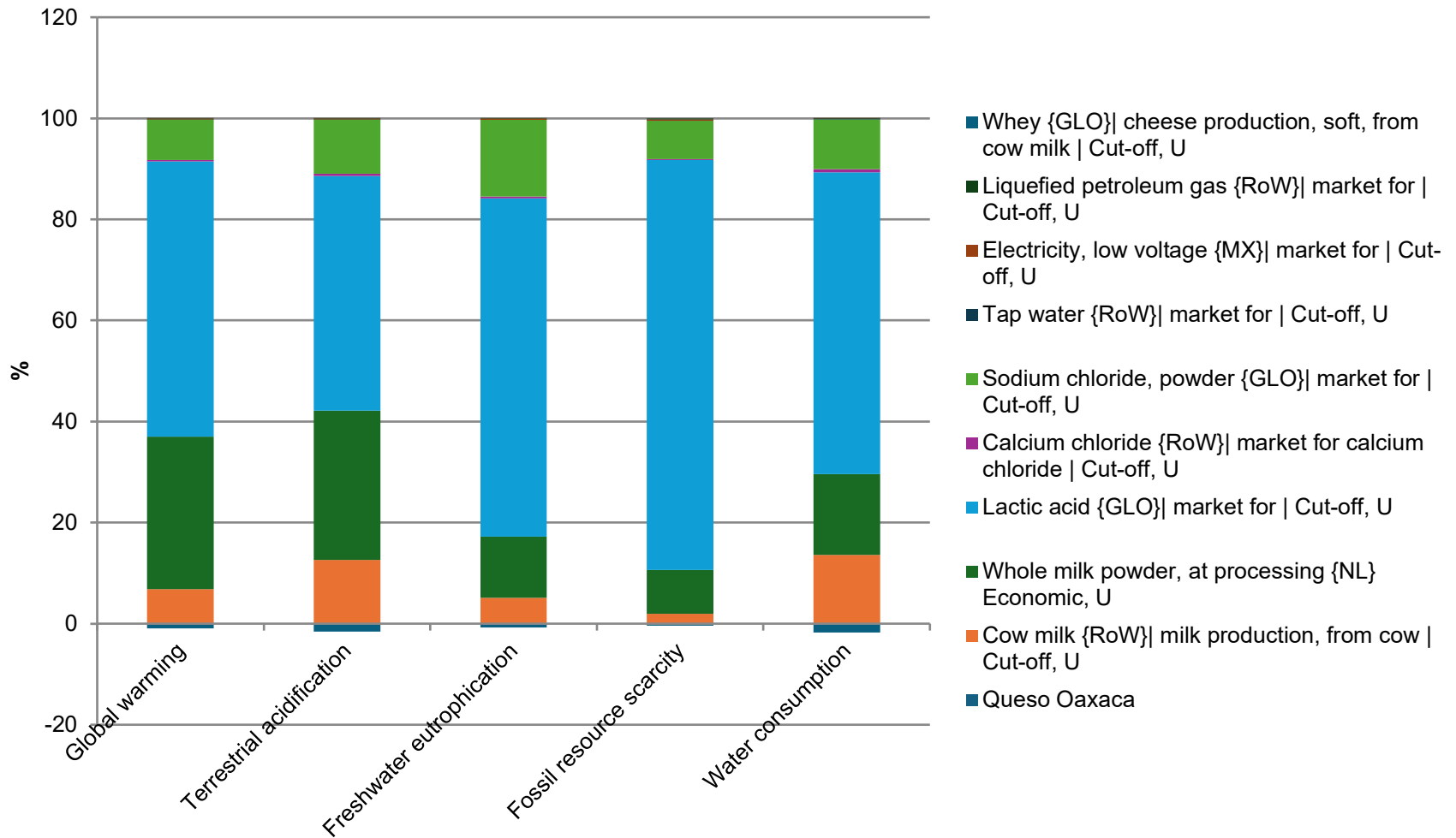


Figura 43. Análisis de 1 kg de Queso tipo Oaxaca por el método ReCiPe

Fuente: elaboración propia con Software SimaPro 9.4.0.2.

Tabla 17. Contribución de impacto ambiental

Etiqueta	Cambio climático (Global warming)	Acidificación terrestre (Terrestrial acidification)	Eutrofización (Freshwater eutrophication)	Recursos fósiles (Fossil resource scarcity)	Uso de agua (Water consumption)
Unidad	Kg CO ₂ eq	Kg SO ₂ eq	Kg P eq	Kg oil eq	M ³
Leche fluida (Cow milk)	6.85%	12.6%	5.14%	1.96%	13.6%
Leche en polvo (Whole milk powder)	30.1%	29.5%	12.1%	8.67%	16%
Ácido láctico (Lactic acid)	54.5%	46.4%	66.9%	81.1%	59.7%
Cloruro de calcio (Calcium chloride)	0.21%	0.51%	0.40%	0.17%	0.57%
Cloruro de sodio (Sodium chloride)	8.08%	10.7%	15.2%	7.65%	9.89%
Agua (Tap water)	0.002%	0.0019%	0.0039%	0.0021%	0.16%
Electricidad (Electricity)	0.181%	0.162%	0.203%	0.218%	0.03%
Gas (Liquefied petroleum gas)	0.0296%	0.0662%	0.0719%	0.2324%	0.0027%
Suero (Whey)	-0.907%	-1.56%	-0.751%	-0.412%	-1.62%

Fuente: elaboración propia con datos del Software SimaPro 9.4.0.2.

El estudio evaluó cinco categorías principales de impacto ambiental: cambio climático, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, escasez de recursos fósiles y uso de agua. Los mayores impactos estuvieron asociados con los insumos clave del proceso productivo, siendo el ácido láctico y la leche en polvo los más relevantes.

El ácido láctico contribuyó con más del 45% en todas las categorías de impacto, destacándose especialmente en escases de recursos fósiles, donde representó el 81.1%, este resultado se distribuye al uso de gas natural como insumo energético, responsable del 13.4% de kg oil eq. Según Núñez et al. (2009), la producción de ácido láctico incluye procesos de fermentación, purificación y secado de biomasa (como maíz), los cuales requieren una fuente intensiva de calor. Estudios como el de Ögmundarson et al. (2020) confirman que el secado de biomasa contribuye hasta el 86% de los impactos ambientales totales, debido al uso de vapor y electricidad.

En la categoría de eutrofización, el ácido láctico tuvo una contribución del 66.9% (0.00816 kg P eq), relacionada con la Demanda Química de Oxígeno (DQO) derivada de la materia orgánica liberada durante su producción. Como señalan Groot y Borén (2010), esta contaminación se origina en gran medida de los cultivos intensivos empleados para obtener biomasa, lo que genera emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y amoníaco (NH_3) debido al uso de fertilizantes, con efectos negativos en el suelo y los cuerpos de agua.

La leche en polvo representó un impacto relevante en cambio climático (30.1% de kg CO_2 eq), principalmente por emisiones de CH_4 (19.9%) y CO_2 (7.6%) asociados a la digestión entérica del ganado y la gestión del estiércol durante la producción de leche. Yan y Holden (2018) reportaron que la energía térmica y eléctrica son los principales contribuyentes en el procesamiento de leche en polvo. En este estudio, el uso de gas natural fue responsable de un 2.07% de kg oil eq para este insumo. En acidificación terrestre, la leche en polvo contribuyó con el 29.5% (0.011 kg SO_2 eq), atribuible a emisiones de óxidos de nitrógeno provenientes del uso de combustibles fósiles.

La leche fluida tuvo la mayor contribución en la categoría de uso del agua (13,6%). Sin embargo, estudios como el de Bava et al. (2018) han demostrado que el mayor impacto de la leche está asociado al cambio climático, con 1,46 kg CO₂ eq, influenciado por el uso de tierras para la producción de ensilajes. Alves et al. (2019) también reportaron que el metano entérico y el óxido nitroso provenientes de la digestión y el estiércol son responsables de hasta el 92.3% del impacto en cambio climático y un 43.2% en acidificación.

El cloruro de sodio Contribuyó con un 15.2% en eutrofización (0.00602 kg P eq), asociado al fosfato liberado durante su extracción y procesamiento. Aunque su impacto es pequeño, refleja efectos indirectos en ecosistemas acuáticos, como lo señalan Ghinea y Leahu (2022), quienes encontraron un mayor impacto en la categoría de agotamiento abiótico (20,66%).

La contribución negativa del suero en todas las categorías tuvo un beneficio ambiental ya que se reutiliza en otros procesos, como alimento para el ganado de engorda. Su reutilización como alimento para ganado reduce la carga ambiental, contribuyendo de forma negativa en todas las categorías de impacto. La mayoría de los estudios enfocados en el ACV del queso han reportado que el queso representa una fuente de contaminación debido a su composición (agua, lactosa, minerales, proteínas y grasas) que afecta principalmente en la categoría de eutrofización, sin embargo, los resultados del impacto ambiental del suero están influenciados por el tipo de asignación que se le otorgue. Como es el caso de Bava et al., (2018), que el suero generado del queso Grana Prado contenía baja materia seca, lo que sus porcentajes de impacto fueron bajos con una asignación económica, teniendo el mayor valor en la categoría de eutrofización con 5.402%.

Insumos como el agua, el cloruro de sodio, la electricidad y el gas tuvieron una contribución menor al 1% en todas las categorías. A diferencia de otros estudios, donde la electricidad contribuyó por encima del 80% en las categorías del cambio climático, acidificación y escasez de recursos fósiles principalmente por la refrigeración que se le da al producto, algo que contrasta en este estudio es que la microempresa distribuye su producto una vez salido del proceso, por lo que no se

destina energía para su refrigeración. Asimismo, el agua presentó mayor contribución representando el 50.6% en la categoría de uso de agua ya que se destina a la pasteurización y la limpieza de la planta (Alves et al., 2019).

El consumo de agua para la limpieza también ha sido un factor reportado en diversos estudios, ya que se destinan productos de limpieza que pueden contribuir a todas las categorías de impacto. Alves et al., (2019) informaron que estos productos contribuyeron hasta un 18.9% en todas las categorías de impacto, sobre todo en cambio climático y eutrofización como lo mencionan González-García et al., (2013a) y Santos et al., (2017). En este estudio, el uso de agua para la limpieza y productos de limpieza quedaron fuera del alcance, ya que solo se concentró en las operaciones directas de la elaboración del queso tipo Oaxaca.

Este análisis se vio limitado por la ausencia de bases de datos específicas para México y el uso de una versión desactualizada del software Simapro, lo que generó un 48.9% de incertidumbre en los datos, de acuerdo con el análisis de incertidumbre realizado por SimaPro. Aunque se usaron bases de datos como Agri-footprint y Ecoinvent, estas no reflejan las condiciones locales de México. En las bases de datos únicamente se pudo encontrar el insumo de energía para México. Estas limitaciones subrayan la necesidad de desarrollar bases de datos específicos para México para garantizar resultados más representativos y confiables en estudios futuros.

El impacto ambiental del queso tipo Oaxaca sigue patrones consistentes con otros estudios (Salas-Vargas et al., 2021), donde las fases iniciales (producción primaria) dominan los impactos (Alves et al., 2019; Berlín, 2002; Canellada, 2017). Los autores del estudio también decidieron evitar la asignación ya que el suero se destina para alimento del ganado.

El ácido láctico y la leche en polvo fueron los insumos con mayor impacto ambiental en este estudio, superando el 45% y 8% respectivamente en todas las categorías. Las mitigaciones deben centrarse en la producción lechera y en etapas iniciales de la cadena, como sugieren Bava et al. (2018).

A pesar de las limitaciones, los resultados reflejan que el manejo sostenible del suero y la optimización del agua y energía en la planta contribuyen positivamente al impacto ambiental general.

V. Conclusiones

El ACV permitió evaluar el impacto ambiental de la producción de queso tipo Oaxaca en la microempresa Productos Lácteos Galván, abarcando desde la recepción de la leche hasta la obtención del producto final. Los resultados mostraron que la empresa ha implementado diversas estrategias sostenibles que han contribuido a reducir su huella ambiental. Entre estas destacan el manejo adecuado del suero lácteo, reutilizándolo como alimento para ganado en lugar de desecharlo, la optimización del uso de agua a través de procesos de reutilización interna y el uso de gas en la caldera, una alternativa energética con menor impacto ambiental en comparación con otros combustibles fósiles. Estas acciones han generado mejoras significativas en eficiencia operativa y responsabilidad ambiental, reflejando el compromiso de la empresa con la sostenibilidad.

A partir del inventario del ciclo de vida, se identificó que los impactos ambientales más relevantes no provienen directamente de las operaciones internas de la empresa, sino de la producción de insumos clave, como el ácido láctico y la leche en polvo. El análisis mostró que el ácido láctico representa más del 45% del impacto total, destacando en la escasez de recursos fósiles y en la eutrofización, debido a su proceso de fabricación intensivo en gas natural. Por su parte, la leche en polvo tuvo una contribución significativa al cambio climático, debido a las emisiones de metano y dióxido de carbono derivadas de la producción lechera. Estos resultados indican que, aunque la empresa ha reducido su impacto ambiental en ciertas áreas, el uso de insumos con una alta carga ambiental sigue siendo un desafío clave para mejorar la sostenibilidad del producto final.

En relación con la hipótesis planteada, los resultados confirman que la producción de queso tipo Oaxaca en la microempresa Productos Lácteos Galván genera un impacto ambiental menor en términos de eutrofización, cambio climático, escasez de recursos fósiles y uso de agua, en comparación con los valores promedio reportados en la literatura. Sin embargo, esta reducción está vinculada principalmente a las estrategias internas de la empresa, mientras que los impactos asociados a la obtención de insumos externos aún representan un reto significativo.

Para fortalecer su posición como un modelo de sostenibilidad dentro de la agroindustria láctea, se recomienda que la empresa explore alternativas al uso de ácido láctico con menor impacto ambiental, lo que contribuiría a reducir su huella ecológica en términos de agotamiento de recursos fósiles y eutrofización. Asimismo, es crucial continuar optimizando el uso de agua y energía en los procesos de producción, y considerar la implementación de estrategias de economía circular que permitan un aprovechamiento más eficiente de los recursos.

En conclusión, este estudio no solo permitió evaluar el impacto ambiental de la producción de queso tipo Oaxaca en la empresa, sino que también identificó áreas clave de mejora y proporcionó recomendaciones para la reducción de los impactos negativos. La adopción de nuevas estrategias y la optimización de insumos permitirán consolidar a Productos Lácteos Galván como un referente en sostenibilidad dentro del sector quesero, alineándose con las tendencias globales de producción responsable y economía circular.

VI. Literatura citada

- Adamovici, D. C. y Ghinea, C. (2021). Life cycle assessment of wastewater from dairy industry. *Food & Environment Safety*, 20(1). <https://doi.org/10.4316/fens.2021.007>
- Agudelo Gómez, D. A. y Bedoya Mejía, O. (2005). Composición nutricional de la leche de ganado vacuno. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 38-42. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520107>
- Aguirre-Villegas, H. A., Passos-Fonseca, T. H., Reinemann, D. J., Armentano, L. E., Wattiaux, M. A., Cabrera, V. E. y Larson, R. (2015). Green cheese: Partial life cycle assessment of greenhouse gas emissions and energy intensity of integrated dairy production and bioenergy systems. *Journal of dairy science*, 98(3), 1571-1592. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8850>
- Alves, E. C., Soares, B. B. de Almeida Neto, J. A. y Rodrigues, L. B. (2019). Strategies for reducing the environmental impacts of organic mozzarella cheese production. *Journal of Cleaner Production*, 223, 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.006>
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (Resolución A/RES/70/1). <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n15/291/93/pdf/n1529193.pdf>
- Auras, R. A. y Selke, S. E. (2023). *Life Cycle of Sustainable Packaging From Design to End of Life*. John Wiley & Sons.
- Bachmann, R. T., Johnson, A. C. y Hernandez, J. E. (2008). Biogas production from cheese whey: past, present and future. *Advances in Cheese Whey Utilization*, 661(2), 35–80.
- Bai, X., Ren, X., Khanna, N. Z., Zhou, N. y Hu, M. (2018). Comprehensive water footprint assessment of the dairy industry chain based on ISO 14046: A case study in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 369-375. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.021>

- Baldini, C., Bava, L., Zucali, M. y Guarino, M. (2018). Milk production Life Cycle Assessment: A comparison between estimated and measured emission inventory for manure handling. *Science of the Total Environment*, 625, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.261>
- Bartl, K., Gómez, C. A. y Nemecek, T. (2011). Life cycle assessment of milk produced in two smallholder dairy systems in the highlands and the coast of Peru. *Journal of Cleaner Production*, 19(13), 1494–1505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.010>
- Battro, P. (2010). *Quesos artesanales: Historia, descripción y elaboración*. Editorial Albatros.
- Bava, L., Bacenetti, J., Gison, G., Pellegrino, L., D'Incecco, P., Sandrucci, A., Tamburini, A., Fiala, M. y Zucali, M. (2018). Impact assessment of traditional food manufacturing: The case of Grana Padano cheese. *Science of the Total Environment*, 626, 1200–1209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.143>
- Berlin, J. (2002). Environmental life cycle assessment (LCA) of Swedish semi-hard cheese. *International dairy journal*, 12(11), 939-953.
- Bjørn, A., Laurent, A., Owsianiak, M. y Olsen, S. I. (2018a). Goal Definition. En Hauschild, M. Z., Rosenbaum R. K. y Olsen, S. I. (Ed.), *Life Cycle Assessment Theory and Practice* (pp. 9-16). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Bjørn, A., Owsianiak, M., Laurent, A., Olsen, S. I., Olsen, S. I., Corona, A. y Hauschild, M. Z. (2018b). Scope Definition. En Hauschild, M. Z., Rosenbaum R. K., Olsen, S. I. (Ed.), *Life Cycle Assessment Theory and Practice* (pp. 9-16). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>

- Bjørn, A., Owsianiak, M., Molin, C. y Laurent, A. (2018d). Main Characteristics of LCA. En Hauschild, M. Z., Rosenbaum R. K. y Olsen, S. I. (Ed.), *Life Cycle Assessment Theory and Practice* (pp. 9-16). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Bjørn, A., Owsianiak, M., Molin, C., Hauschild, M. Z. (2018c). LCA History. En Hauschild, M. Z., Rosenbaum R. K. y Olsen, S. I. (Ed.), *Life Cycle Assessment Theory and Practice* (pp. 9-16). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Borghesi, G., Stefanini, R. y Vignali, G. (2022). Life cycle assessment of packaged organic dairy product: A comparison of different methods for the environmental assessment of alternative scenarios. *Journal of Food Engineering*, 318, 110902. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110902>
- Bryman, A. (2006). Integrating quantitative and qualitative research: How is it done? *Qualitative Research*, 6(1), 97–113. <https://doi.org/10.1177/1468794106058877>
- Camacho-Vera., J. H., Cervantes-Escoto., F. y Palacios-Rangel., M. I. (2020). Historia y raíces territoriales de un sistema artesanal: la producción de queso en Reyes Etlá, Oaxaca. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 30(55). <https://doi.org/10.24836/es.v30i55.836>
- Canellada, B. F. (2017). Análisis del Ciclo de Vida y Huella de Carbono de una quesería tradicional asturiana. [Tesis de Maestría, Universidad de Oviedo]. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo.
- CANILEC. (2011). *El Libro Blanco de la leche y los productos lácteos*. (1ª ed., Vol. 1). CANILEC. <https://www.canilec.org.mx/libro-blanco/>
- CANILEC. (2024). *Compendio de Estadísticas del Sector Lácteo*. <https://www.canilec.org.mx/estadisticas/>

- CAR/PL. (2002). *Prevención de la contaminación en la Industria láctea*. En Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Plan de Acción para el Mediterráneo.
- Carvalho, L. S., Willers, C. D., Soares, B. B., Nogueira, A. R., de Almeida Neto, J. A. y Rodrigues, L. B. (2022). Environmental life cycle assessment of cow milk in a conventional semi-intensive Brazilian production system. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17317-5>
- Collantes, G. F. (2003). Robert Malthus: un economista político convertido en demógrafo por aclamación popular. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, (101), 149-173. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99717912005>
- Comisión Europea. (s.f.). *Indicaciones geográficas y regímenes de calidad*. https://agriculture.ec.europa.eu/farming/geographical-indications-and-quality-schemes/geographical-indications-and-quality-schemes-explained_es#pdo
- Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (1987). *Nuestro futuro común*. <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>
- Dahiya, S., Katakajwala, R., Ramakrishna, S. y Mohan, S. V. (2020). Biobased products and life cycle assessment in the context of circular economy and sustainability. *Materials Circular Economy*, 2, 1-28. <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00007-x>
- Dalla Riva, A., Burek, J., Kim, D., Thoma, G., Cassandro, M. y De Marchi, M. (2017). Environmental life cycle assessment of Italian mozzarella cheese: Hotspots and improvement opportunities. *Journal of Dairy Science*, 100(10), 7933–7952. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12396>

- De Oca, M. F., E., Espinoza O., A. y Arriaga J., C. M. (2019). Propiedades tecnológicas y fisicoquímicas de la leche y características fisicoquímicas del queso Oaxaca tradicional. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 10(2), 367-378. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i2.4291>
- De Oca-Flores, E. M., Castelán-Ortega, O. A., Estrada-Flores, J. G. y Espinoza-Ortega, A. (2009). Oaxaca cheese: Manufacture process and physicochemical characteristics. *International Journal of Dairy Technology*, 62(4), 535–540. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1471-0307.2009.00533.x>
- Del Prado, A., Mas, K., Pardo, G. y Gallejones, P. (2013). Modelling the interactions between C and N farm balances and GHG emissions from confinement dairy farms in northern Spain. *Science of the Total Environment*, 465(2013), 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.064>
- Ducoing Watty., A. M. (2009). *Introducción a la estadística* (1ª ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Durán Agüero, S., Torres García, J. y Sanhueza Catalán, J. (2015). Consumo de queso y lácteos y enfermedades crónicas asociadas a obesidad, ¿amigo o enemigo?. *Nutrición Hospitalaria*, 32(1), 6-68. <https://doi.org/10.3305/nh.2015.32.1.8982>
- Escobar Delgadillo, J. L. (2007). El desarrollo sustentable en México (1980-2007). *Revista Digital Universitaria*, 9(3).
- Fagan, C. C., O'Callaghan J., D., Mateo J., M. y Dejmek, P. (2017). The Syneresis of Rennet-Coagulated Curd. En McSweeney, P. L., Fox, P. F., Cotter, P. D., y Everett, D. W (Ed.), *Cheese: Chemistry, Physics & Microbiology* (pp. 145-177). Elsevier.
- FAO. (2023). La ganadería representa el 12% de las emisiones de gases con efecto invernadero relacionadas con el sector agropecuario mundial. <https://www.fao.org/republica-dominicana/noticias/detail-events/es/c/1675383/>

- FAOSTAT. 2017. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Farjana, S. H., Mahmud, P. y Huda, N. (2021). *Life Cycle Assessment for Sustainable Mining*. Elsevier.
- Fernández Fernández, E., Martínez Hernández, J. A., Martínez Suárez, V., Moreno Villares, J. M., Collado Yurrita, L. R., Hernández Cabria, M. y Morán Rey, F. J. (2015). Documento de Consenso: importancia nutricional y metabólica de la leche. *Nutrición Hospitalaria*, 31(1), 92-101. <https://dx.doi.org/10.3305/nh.2015.31.1.8253>
- Finnegan, W., Goggins, J., Clifford, E. y Zhan, X. (2017). Global warming potential associated with dairy products in the Republic of Ireland. *Journal of cleaner production*, 163, 262-273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.025>
- FIRA. (2023). *Panorama Agroalimentario: Leche y lácteos*. <https://www.fira.gob.mx/InvYEvalEcon/EvaluacionIF>
- Fiscer Lamelas, G. (2012). Friedrich Engels y el materialismo histórico. *Revista de Claseshistoria*.
- Flores B., I. (2018). El marxismo y algunos elementos contemporáneos. *Murmulllos*.
- Fox, P. F y McSweeney, P. L. (2017). Cheese: An Overview. McSweeney, P. L., Fox, P. F., Cotter, P. D., y Everett, D. W (Ed.), *Cheese: Chemistry, Physics & Microbiology* (pp. 5-21). Elsevier.
- Fox, P. F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P. L. y O'Mahony, J. A. (2015). *Dairy Chemistry and Biochemistry* (2ª ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14892-2>
- Ghinea, C. y Leahu, A. (2022). Life cycle assessment of sheep cheese production in a small dairy factory from Romanian rural area. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(3), 6986-7004. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22644-2>

- Glover, C. J., McDonnell, A., Rollins, K. S., Hiibel, S. R. y Cornejo, P. K. (2023). Assessing the environmental impact of resource recovery from dairy manure. *Journal of Environmental Management*, 330, 117150. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117150>
- Gobierno del Estado de Hidalgo y Secretaría de Planeación, Desarrollo Regional y Metropolitano. (2010). Sistema Integral de Información del Estado de Hidalgo Enciclopedia de los Municipios del Estado de Hidalgo Acatlán. *Enciclopedia de los Municipios de Hidalgo*.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. De, Struijs, J. y Zelm, R. Van. (2009). A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. *ReCiPe* 2008, First edit, 1–44. https://www.researchgate.net/publication/302559709_ReCiPE_2008_A_life_cycle_impact_assessment_method_which_comprises_harmonised_category_indicators_at_the_midpoint_and_the_endpoint_level
- González, M. P. (2020). Sobre la utopía en Marx, Engels y la recepción marxista del siglo XX. *Claves del pensamiento*, 14(27), 136-155. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-879X2020000100136&lng=es&tlng=es.
- González-García, S., Castanheira, É. G., Dias, A. C. y Arroja, L. (2013a). Using Life Cycle Assessment methodology to assess UHT milk production in Portugal. *Science of the Total Environment*, 442, 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.035>
- González-García, S., Hospido, A., Moreira, M. T., Feijoo, G. y Arroja, L. (2013b). Environmental life cycle assessment of a Galician cheese: San Simon da Costa. *Journal of cleaner production*, 52, 253-262. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.006>

- Granados Aristizábal, J. I. (2012). Las denominaciones de origen en la industria agrícola: una herramienta de distinción y competitividad. *Producción + Limpia* (7), 2, 95-105.
- GreenDelta. (s.f.). *OpenLCA: Software para el análisis de ciclo de vida*. <https://www.openlca.org>
- Groot, W. J. y Borén, T. (2010). Life cycle assessment of the manufacture of lactide and PLA biopolymers from sugarcane in Thailand. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), 970–984. <http://dx.doi.org/10.1007%2Fs11367-010-0225-y>
- Guarín Patarroyo, C. E. y Restrepo Ochoa, D. A. (2020). Sobre la relación entre el consumo de leche cruda y la salud humana: una revisión sistemática. *Revista Cubana de Alimentación y Nutrición*, 30(2), 516–538. <http://revalnutricion.sld.cu/index.php/rcan/article/view/1048>
- Guinee, P. T. (2017). Pasteurized Processed and Imitation Cheese Products. En McSweeney, P. L., Fox, P. F., Cotter, P. D., y Everett, D. W (Ed.), *Cheese: Chemistry, Physics & Microbiology* (pp. 145-177). Elsevier.
- Hauschild, M. Z. (2018). Introduction to LCA Methodology. En Hauschild, M. Z., Rosenbaum R. K. y Olsen, S. I. (Ed.), *Life Cycle Assessment Theory and Practice* (pp. 9-16). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum R. K. y Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment Theory and Practice*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Hernández-Sampieri, R. y Mendoza T., C. P. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. (1ª ed.). McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES.

- Herrmann, I. T. y Moltesen, A. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose?—a comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production*, 86, 163-169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.004>
- Herron, J., O'Brien, D. y Shalloo, L. (2022). Life cycle assessment of pasture-based dairy production systems: Current and future performance. *Journal of dairy science*, 105(7), 5849-5869. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21499>
- Higuera Marin, J. V., Aguirre-Castillo, R. N., Arenas Gil, F. y Correa Londoño, G. A. (2019). Análisis fisicoquímico y sensorial de queso fresco con reemplazo de grasa por lípidos de aguacate (Persea americana Mill V. Hass). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1199>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K. y Zhang, G. (2015). Water footprints and sustainable water allocation. *Sustainability*, 8(1), 20. <https://doi.org/10.3390/su8010020>
- Hoekstra, A.Y. (2009). Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics* 68(7), 1963-1974. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.021>
- Iglesias, D. H. (2005). Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de productos y su aplicación en el sistema agroalimentario. *Contribuciones a la Economía*. <http://www.eumed.net/ce>
- Ihobe. (2009). *Análisis de Ciclo de vida y Huella de Carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto*. En *Gobierno Vasco*.
- Jaros, D. y Rohm, H. (2017). Rennets: Applied Aspects. En McSweeney, P. L., Fox, P. F., Cotter, P. D., y Everett, D. W (Ed.), *Cheese: Chemistry, Physics & Microbiology* (pp. 53-67). Elsevier.
- Jensen G., R. (1995). *Handbook of Milk Composition*. Academic Press

- Khan, I. T., Bule, M., Ullah, R., Nadeem, M., Asif, S. y Niaz, K. (2019). The antioxidant components of milk and their role in processing, ripening, and storage: Functional food. *Veterinary World*, 12(1), 12–33. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2019.12-33>
- Kim, D., Thoma, G., Nutter, D., Milani, F., Ulrich, R. y Norris, G. (2013). Life cycle assessment of cheese and whey production in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 1019-1035.
- Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial. (2020). *Texto vigente*. Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFPPI.pdf>
- Liao, W. T. y Su, J. J. (2019). Evaluation of Water Scarcity Footprint for Taiwanese Dairy Farming. *Animals*, 9(11), 956. <https://doi.org/10.3390/ani9110956>
- Lopes Silva, D. A., Oliveira Nunes, A., da Silva Moris, V. A. y Moro Piekarski., C. (2017). How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto. *CILCA*. https://www.researchgate.net/publication/318217178_How_important_is_the_LCA_software_tool_you_choose_Comparative_results_from_GaBi_openLCA_SimaPro_and_Umberto
- López López, V. M. (2021). *Sustentabilidad y desarrollo sustentable: origen, precisiones conceptuales y metodología operativa*. (3ª ed.). Trillas.
- Lovarelli, D., Tamburini, A., Garimberti, S., D'Imporzano, G. y Adani, F. (2022). Life cycle assessment of Parmigiano Reggiano PDO cheese with product environmental footprint method: A case study implementing improved slurry management strategies. *Science of the Total Environment*, 842, 156856. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156856>
- Maguay, H. (2018). La crisis del agua y la industria. *Gaceta UNAM*. <https://www.gaceta.unam.mx/crisis-agua-industria/>

- Malaspina, F., Stante, L., Cellamare, C. M. y Tilche, A. (1995). Cheese whey and cheese factory wastewater treatment with a biological anaerobic—aerobic process. *Water Science and Technology*, 32(12), 59–72.
- Martínez Vázquez, S. E., Nogueira de Rojas, J. R., Remes Troche, J. M., Coss Adame, E., Rivas Ruíz, R. y Uscanga Domínguez, L. F. (2020). Importancia de la intolerancia a la lactosa en individuos con síntomas gastrointestinales. *Revista de Gastroenterología de México*. 2020;85(3):321-331. <https://www.revistagastroenterologiamexico.org/es-importancia-intolerancia-lactosa-individuos-con-articulo-S037509062030046X>
- Massolo, L. (2015). Gestión ambiental y desarrollo sostenible: aspectos generales. En Massolo, L. (Ed.), *Introducción a las herramientas de gestión ambiental*. Editorial de la Universidad de La Plata.
- Massolo, L. y Castagnasso G. (2015). Análisis del ciclo de vida. En Massolo, L. (Ed.), *Introducción a las herramientas de gestión ambiental*. Editorial de la Universidad de La Plata.
- Maza Pastrano, M. y Legorreta Cao, P. (2011). Generalidades de la leche y los productos lácteos. En Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC) (Ed.), *Libro blanco de la leche y los productos lácteos* (págs. 26-43). CANILEC. <https://www.canilec.org.mx/libro-blanco/>
- McSweeney, P. L., Fox, P. F., Cotter, P. D. y Everett, D. W (2017). *Cheese: Chemistry, Physics & Microbiology* (4.^a ed., Vol. 1). Elsevier.
- Mech, A., Devi, G. L., Sivaram, M., Sirohi, S., Dhali, A., Kolte, A. P. y Bhatta, R. (2023). Assessment of carbon footprint of milk production and identification of its major determinants in smallholder dairy farms in Karnataka, India. *Journal of Dairy Science*, 106(12), 8847-8860. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22153>

- Mestres Lagarriga, J. y Romero del Castillo, S. R. (2008). *Productos lácteos: Tecnología*. Editorial Reverté.
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36810#:~:text=10.5821/ebook%2D9788498802610>
- Milke García, P. (2011). La importancia de la leche y los productos lácteos en la dieta. En Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC) (Ed.), *Libro blanco de la leche y los productos lácteos* (págs. 103-113). CANILEC.
<https://www.canilec.org.mx/libro-blanco/>
- Miller, G. D., Jarvis, J. K. y Mcbean, L. D. (2007). *Handbook of Dairy Foods and Nutrition* (3ª ed.). CRC Press.
- Mirabella, N., Castellani, V. y Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: A review. *Journal of Cleaner Production*, 65, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.051>
- Moltesen, A. y Bjørn, A. (2018). LCA and Sustainability. En Hauschild, M. Z., Rosenbaum R. K. y Olsen, S. I. (Ed.), *Life Cycle Assessment Theory and Practice* (pp. 9-16). Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Moncada Jiménez, A. y Pelayo Consuegra, B. H. (2011). Análisis químico, biológico y fisicoquímico de la leche: calidad y contenido nutricional. En Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC) (Ed.), *Libro blanco de la leche y los productos lácteos* (págs. 66-79). CANILEC.
<https://www.canilec.org.mx/libro-blanco/>
- Moneeb, A. H. M., Hammam, A. R. A., Ahmed, A. K. A., Ahmed, M. E. y Alsaleem, K. A. (2021). Effect of fat extraction methods on the fatty acids composition of bovine milk using gas chromatography. *Food Science and Nutrition*, 9(6), 2936–2942. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2252>

- Montenegro, A. Y. y Cabrera P., K. I. (2017). El mercado de los productos con denominación de origen a través del comercio justo perspectivas y retos. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, (152), 655- 677. <http://dx.doi.org/10.22201/ijj.24484873e.2018.152.12921>
- Moreno, S. A. y Espí, J. A. (2008). *Introducción al uso de las herramientas de gestión ambiental aplicadas a los recursos naturales no renovables*. Red DESIR.
- Moscoso, J. N. (2017). Los métodos mixtos en la investigación en educación: hacia un uso reflexivo. *Cadernos de Pesquisa*, 47(164), 632–649. <https://doi.org/10.1590/198053143763>
- Naciones Unidas. (s.f.). *Conferencias sobre el medio ambiente*. <https://www.un.org/es/conferences/environment>
- Naranjo, A. M., Sieverding, H., Clay, D. y Kebreab, E. (2023). Carbon footprint of South Dakota dairy production system and assessment of mitigation options. *PloS one*, 18(3), e0269076. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269076>
- Núñez, A., Michelena, G., Carrera, E. y Álvarez, X. (2009). Estudios sobre la recuperación y purificación de ácido láctico para la producción de plásticos biodegradables. ICIDCA. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XLIII (2), 20-29. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120662004>
- O'Brien, M. N. y O'Connor, P. T. (2017). Nutritional Aspects of Cheese. McSweeney, P. L., Fox, P. F., Cotter, P. D., y Everett, D. W (Ed.), *Cheese: Chemistry, Physics & Microbiology* (pp. 603-611). Elsevier.
- Ögmundarson, Ó., Sukumara, S., Laurent, A. y Fantke, P. (2020). Environmental hotspots of lactic acid production systems. *GCB Bioenergy*, 12(1), 19-38. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12652>
- Olivera, A., Cristobal, S. y Saizar, C. (2016). Análisis de ciclo de vida ambiental, económico y social. Una herramienta para la evaluación de impactos y soporte para la toma de decisiones. *INNOTEC Gestión: Laboratorio Tecnológico del Uruguay*, 7, 20-27.

- Organización Internacional de Normalización. (2006a). *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and framework* (ISO 14040). <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>
- Organización Internacional de Normalización. (2006b). *Environmental Management - Life Cycle Assessment -Requirements and guidelines* (ISO 14044). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>
- Osorio-González, C.S., Sandoval-Salas, F., Hernández-Rosas, F., Hidalgo-Contreras, J.V., Gómez-Merino, F.C. y Ávalos de la Cruz, D.A. (2018). Potencial de aprovechamiento del suero de queso en México. *Agro Productividad*, 11(7).
- Owsianiak, M., Bjørn, A., Laurent, A., Molin, C. y Ryberg, M., W. (2018). LCA History. En Hauschild, M. Z., Rosenbaum R. K. y Olsen, S. I. (Ed.), *Life Cycle Assessment Theory and Practice* (pp. 9-16). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Owusu-Sekyere, E., Jordaan, H. y Chouchane, H. (2017). Evaluation of water footprint and economic water productivities of dairy products of South Africa. *Ecological Indicators*, 83, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.041>
- Padín, C.G. y Díaz, M.F. (2009). Fermentación alcohólica del lactosuero por *Kluyveromyces marxianus* y solventes orgánicos como extractantes. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología* 29: 110-116.
- Palhares, J. C. P. y Pezzopane, J. R. M. (2015). Water footprint accounting and scarcity indicators of conventional and organic dairy production systems. *Journal of Cleaner Production*, 93, 299-307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.035>
- Palmieri, N., Forleo, M. B. y Salimei, E. (2017). Environmental impacts of a dairy cheese chain including whey feeding: An Italian case study. *Journal of Cleaner Production*, 140, 881-889. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.185>

- Panthi R., R., Jordan N., K., Kelly L., A. y Sheehan, J. J. (2017). Selection and Treatment of Milk for Cheesemaking. En McSweeney, P. L., Fox, P. F., Cotter, P. D., y Everett, D. W (Ed.), *Cheese: Chemistry, Physics & Microbiology* (pp. 23-50). Elsevier.
- Pérez Lizaur, M. (2011). El proceso de industrialización de la leche fluida. En Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC) (Ed.), *Libro blanco de la leche y los productos lácteos* (págs. 26-43). CANILEC. <https://www.canilec.org.mx/libro-blanco/>
- Pérez Soto, O. y Esquenazi Borrego, A. (2018). El marxismo, la totalidad y su devenir histórico. *Argum., Vitória*, (10)2, 43-55. <http://dx.doi.org/10.18315/argumentum.v10i2.19515>
- Pfister, S., Koehler, A. y Hellweg, S. (2009). Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental science & technology*, 43(11), 4098-4104. <https://doi.org/10.1021/es802423e>
- Pinzón Rodríguez, J. J. (2018). *Análisis del ciclo de vida de la elaboración del queso tipo cuajada en una finca ganadera del municipio de Puerto López, Meta como herramienta de gestión ambiental en la empresa*. [Tesis de Licenciatura, Universidad El Bosque]. Repositorio Institucional Universidad El Bosque.
- Pirlo, G., Carè, S., Fantin, V., Falconi, F., Buttol, P., Terzano, G. M. y Pacelli, C. (2014). Factors affecting life cycle assessment of milk produced on 6 Mediterranean buffalo farms. *Journal of dairy science*, 97(10), 6583-6593. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8007>
- Prazeres, A. R., Carvalho, F. y Rivas, J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>
- PRé Sustainability. (2022). *SimaPro database manual Methods library Written*. <https://simapro.com/wp-content/uploads/2022/07/DatabaseManualMethods.pdf>

- PRé Sustainability. (s.f.). *SimaPro: Software para el análisis del ciclo de vida*.
<https://www.simapro.mx/>
- Rajeshwari, K. V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K. y Kishore, V. V. N. (2000). State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 135–156.
[https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00014-3)
- Ramírez, J. C., Morelos, J. B. y Mata M., L. (2011). La contemporaneidad del Ensayo o por qué no es conveniente olvidar a Malthus. *Estudios demográficos y urbanos*, 26(1), 7-32.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-72102011000100007&lng=es&tlng=es.
- Ramírez-Nolla, S. y Vélez-Ruíz, J. F. (2012). Queso Oaxaca: Panorama del proceso de elaboración, características fisicoquímicas y estudios recientes de un queso típico mexicano. *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos*, 6(1), 1-12.
- Ridoutt, B. G., Sanguansri, P., Freer, M. y Harper, G. S. (2012). Water footprint of livestock: comparison of six geographically defined beef production systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 165-175.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0346-y>
- Rivas-García, P., Botello-Álvarez, J. E., Abel Seabra, J. E., da Silva Walter, A. C. y Estrada-Baltazar, A. (2015). Environmental implications of anaerobic digestion for manure management in dairy farms in Mexico: a life cycle perspective. *Environmental technology*, 36(17), 2198-2209.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1024758>
- Rodiles-López, J. O., Ochoa M., G. M. y Zamora V., R. (2023). El queso y sus variedades. *Milenaria, Ciencia Y Arte*, (21), 19–23.
<https://doi.org/10.35830/mcya.vi21.355>
- Romero Rodríguez., B. I. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín IIE*, 91–97. Tendencias tecnológicas.

- Rosenbaum, R. K., Hauschild, M. Z., Boulay, A. M., Fantke, P., Laurent, A., Núñez, M. y Vieira, M. (2018). Life Cycle Impact Assessment. En Hauschild, M. Z., Rosenbaum R. K., Olsen, S. I. (Ed.), *Life Cycle Assessment Theory and Practice* (pp. 9-16). Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Roset, R. (2019). *El gran libro del queso*. RBA Libros.
- Salas-Vargas, C., Brunett-Pérez, L., Espinosa-Ortiz, V. E., y Martínez-García, C. G. (2021). Environmental impact of Oaxaca cheese production and wastewater from artisanal dairies under two scenarios in Aculco, State of Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127586.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127586>
- Santos, H. C. M., Maranduba, H. L., de Almeida Neto y Rodrigues B., L. (2016). Life cycle assessment of cheese production process in a small-sized dairy industry in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 24, 3470–3482.
<https://doi.org/10.1007/s11356-016-8084-0>
- Schoijet, M. (2005). La recepción e impacto de las ideas de Malthus sobre la población. *Estudios demográficos y urbanos*, 20(3), 569-604.
<https://doi.org/10.24201/edu.v20i3.1210>
- Secretaría de Economía y Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2018). *Norma Oficial Mexicana NOM-223-SCFI/SAGARPA-2018, Queso: Denominación, especificaciones, información comercial y métodos de prueba*. Ciudad de México, México: Diario Oficial de la Federación.
https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/7517/seeco3a14_C/seeco3a14_C.html

- Secretaría de Economía y Secretaría de Salud. (2010). *Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-051-SCFI/SSA1-2010, Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados: Información comercial y sanitaria*. Ciudad de México, México: Diario Oficial de la Federación.
https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4010/seeco11_C/seeco11_C.htm
- Secretaría de Economía. (2012). *Norma Oficial Mexicana NOM-183-SCFI-2012, Producto lácteo y producto lácteo combinado: Denominaciones, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba*. Ciudad de México, México: Diario Oficial de la Federación.
<https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4693/seeco1/seeco1.htm>
- Secretaría de Salud. (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010. Productos y servicios: Leche, fórmula láctea, producto lácteo combinado y derivados lácteos. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Métodos de prueba*. Ciudad de México, México: Diario Oficial de la Federación.
<https://dof.gob.mx/normasOficiales/4156/salud2a/salud2a.htm>
- Seda-Irizarry, I. J. (2011). Un resumen completo de El Capital de Marx de Diego Guerrero. *Cuadernos de Economía*, 30(55).
- Shrivastava, S. y Unnikrishnan, S. (2021). Evolution of Life Cycle Sustainability Assessment. En Muthu, S. S. (Ed.), *Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)* (pp.1-14). Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-4562-4>
- SIAP. (2023). *Panorama Agroalimentario 2023*. En Sistema de Información Agrícola y Pesquera (SIAP). <https://www.gob.mx/siap/articulos/panorama-agroalimentario-2023-la-edicion-estadistica-mas-importante-del-sector-agroalimentario>
- SimaPro México. (s.f.). *ACVETI: Introducción al análisis del ciclo de vida*. <https://www.simapro.mx/ACVeti.html>

- Sommer Finkelman, C. (2011). Productos lácteos y salud. En Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC) (Ed.), *Libro blanco de la leche y los productos lácteos* (págs. 129-138). CANILEC. <https://www.canilec.org.mx/libro-blanco/>
- Taste Atlas Awards (s.f.). *Los 100 mejores quesos del mundo*. <https://www.tasteatlas.com/best/cheeses>
- Toledo, V. M. (2015). ¿De qué hablamos cuando hablamos de sustentabilidad? Una propuesta ecológico política. *Interdisciplina* 3(7), 35-55.
- Triky, S., y Kissinger, M. (2022). An integrated analysis of dairy farming: direct and indirect environmental interactions in challenging bio-physical conditions. *Agriculture*, 12(4), 480. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040480>
- Üçtuğ, F. G. (2019). The environmental life cycle assessment of dairy products. *Food Engineering Reviews*, 11(2), 104-121. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-9187-4>
- USDA. (2023a). Data Base. *United States Department of Agriculture*. Food and Nutrition.
- USDA. (2023b). *FoodData Central Food Details: Cheese, oaxaca, solid*. En United States Department of Agriculture. Food and Nutrition. <https://fdc.nal.usda.gov/food-details/2647441/nutrients>
- Valdivia Avila, A. L., Rubio Fontanills, Y. y Beruvides Rodríguez, A. (2021). Calidad higiénico-sanitaria de la leche, una prioridad para los productores. *Revista de Producción Animal*, 33(2), 1-13. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-79202021000200001&lng=es&tlng=es.
- Valencia Denicia, E. y Ramírez Castillo, M. L. (2009) La industria de la leche y la contaminación del agua. *Elementos: Ciencia y cultura*, 73, 16-27. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=29411996004>

- Vargas Mora, J. A. y Gil Martínez, G. E. (2021). *Análisis de ciclo de vida para la elaboración de quesos en una fábrica de Belén, Boyacá*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de La Salle]. Ciencia Unisalle.
- Vázquez Amábile, G. (2018). Gestión ambiental: desafíos para una producción sostenible. *Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola – AACREA*. https://www.researchgate.net/publication/329583722_Gestion_ambiental_de_safios_para_una_produccion_sostenible
- Velázquez Álvarez, L. V. y Vargas-Hernández, J. G. (2012). La sustentabilidad como modelo de desarrollo responsable y competitivo. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (11), 97-107. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231125817009>
- Velázquez Villanueva, M. C., Rodríguez García, N. y Mata Varela, M. C. (2014). Evaluación de impacto ambiental de la producción de queso blanco pasteurizado en la parroquia Mantecal, Apure, Venezuela. *Revista Científica Agroecosistemas*, 2(2).
- Vicencio-De la Rosa, M. G., Valencia-Vázquez, R., Pérez-López, M. E., Martínez-Prado, M. A. y Ramírez-Ramírez, E. S. (2015). Stabilization by co-composting of solids removed from wastewater treatment plant of a cheese factory. *Revista mexicana de ingeniería química*, 14(1), 61-71. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62037106006>
- Vidal, A. y Asuaga, C. (2021). Gestión ambiental en las organizaciones: Una revisión de la literatura. *Revista del Instituto Internacional de Costos*, (18), 84-122. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9115902.pdf>
- Villanueva-Carvajal, A., Esteban-Chávez, M., Espinoza-Ortega, A., Arriaga-Jordán, C. M. y Domínguez-López, A. (2012). Oaxaca cheese: Flavour, texture and their interaction in a Mexican traditional *pasta filata* type cheese. *CyTA - Journal of Food*, 10(1), 63–70. <https://doi.org/10.1080/19476337.2011.557840>

- Villegas de Gante, A. (2012). *Tecnología quesera*. (2ª ed.). Trillas.
- Villegas de Gante, A., Cervantes Escoto, F., Cesín Vargas, A., Espinoza Ortega, A., Hernández Montes, A., Santos Moreno, A. y Martínez Campos, Á. R. (2014). *Atlas de los quesos mexicanos genuinos* (1ª ed.). Biblioteca básica de agricultura.
- Villegas de Gante, A., Santos Moreno, A. y Cervantes Escoto, F. (2016). *Los quesos mexicanos Tradicionales*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Wakida-Kuzunoki, G., Villasis-Keever, M. Á., Calva-Rodríguez, R. G., Choperena-Rodríguez, R., Xochihua-Díaz, L., Flores-Huerta, S., ... y Velasco-Hidalgo, L. (2019). Consumo de leche de vaca en la edad pediátrica. Revisión de la evidencia científica. Documento de consenso de la Sociedad Mexicana de Pediatría. *Revista Mexicana de Pediatría*, 86(S1), 3-16.
- Willers, C. D. y Rodrigues, L. B. (2014). A critical evaluation of Brazilian life cycle assessment studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1), 144-152. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0608-y>
- Zarta Ávila, P. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa*, 28, 409-423. <https://doi.org/10.25058/20112742.n28.18>