



Enseñar la explotación de la tierra,
no la del hombre

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

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

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ESTRATEGIA AGROEMPRESARIAL

**DESEMPEÑO AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE FRAMBUESA:
UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS EN ESTRATEGIA AGROEMPRESARIAL

Presenta:

ALMARAZ RUIZ DULCE ESMERALDA

Bajo la supervisión de:

DRA. MARÍA ISABEL PALACIOS RANGEL



Chapingo, Estado de México, 27 agosto de 2026

**DESEMPEÑO AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE FRAMBUESA: UN
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

Tesis realizada por **DULCE ESMERALDA ALMARAZ RUIZ**, bajo la supervisión
del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN ESTRATEGIA AGROEMPRESARIAL

DIRECTORA:



DRA. MARÍA ISABEL PALACIOS RANGEL

ASESOR:


DR. JORGE AGUILAR ÁVILA

ASESOR:


DR. FÉLIX RAFAEL RAMÍREZ ÁRPIDE

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ABREVIATURAS UTILIZADAS.....	viii
DEDICATORIA	ix
AGRADECIMIENTOS.....	x
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xi
RESUMEN GENERAL.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Justificación	8
1.3 Planteamiento del problema.....	10
1.4 Objetivos de la investigación	11
1.4.1 Objetivo general.....	11
1.4. 2 Objetivos específicos	11
1.5 Preguntas de investigación	12
1.6 Hipótesis de la investigación	12
1.7 Estructura de la tesis	12
1.8 Literatura citada.....	14
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	19

2.1 Marco teórico-conceptual	19
2.1.1 Acerca del desarrollo sostenible	19
2.1.2 Acerca de los impactos.....	22
2.1.3 Economía Circular	32
2.2 Marco de referencia	33
2.2.1 Producción mundial de berries	33
2.2.2 Producción nacional de berries.....	34
2.2.3 Exportaciones de berries	35
2.2.4 Producción por Entidad Federativa.....	36
2.2.5 Agricultura protegida en México	37
Literatura citada.....	38
CAPÍTULO 3. IMPACTOS AMBIENTALES - ECONÓMICOS DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN.....	43
RESUMEN	43
1. INTRODUCCIÓN	45
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	47
Recopilación y origen de la información	47
Sistematización de la información	47
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
Artículos publicados.....	48
Autores por documento	49
Redes de investigación (Co-ocurrencia)	50
Evolución en el abordaje del tema.....	52

Colaboración entre países-autores-instituciones	53
Tendencias de investigación.....	54
4. CONCLUSIONES	55
5. LITERATURA CITADA	56
CAPÍTULO 4. DESEMPEÑO AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE FRAMBUESA EN PUEBLA, DESDE EL ENFOQUE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	63
RESUMEN	64
1. INTRODUCCIÓN	65
2. MATERIALES Y MÉTODOS	68
2.1 Descripción del sistema de producción.....	69
2.2. Descripción de los casos de estudio.....	69
2.3. Límites del sistema y unidad funcional	71
2.4 Inventario de Ciclo de Vida (ICV).....	73
2.5 Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida.....	76
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	77
4. CONCLUSIONES.....	93
5. LITERTURA CITADA	95
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES.....	100

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Métodos de evaluación de impactos	27
Cuadro 2. Desafíos en la medición de impactos.....	31
Cuadro 3. Estrategia de búsqueda en Scopus.	47
Cuadro 4. Indicadores bibliométricos empleados.	48
Cuadro 5. Inventario del ciclo de vida (ICV) por etapa del sistema de producción de frambuesa.	75
Cuadro 6. Categorías de impacto seleccionadas para la evaluación del ciclo de vida	76
Cuadro 7. Comparación de la vida útil de los componentes del macrotúnel reportada en la literatura.	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la tesis	14
Figura 2. Producción global de berries (%)	34
Figura 3. Volumen de la producción nacional (miles de toneladas)	35
Figura 4. Exportaciones (millones de dólares)	36
Figura 5. Porcentaje de la producción por Entidad federativa	37
Figura 6. Superficie por entidad de la región Centro occidente	38
Figura 7. Evolución del número de publicaciones que analizan la temática de interés.	49
Figura 8. Colaboración en base al número de autores por publicación.	50
Figura 9. Mapa bibliométrico de la red de co-ocurrencias.	51
Figura 10. Evolución del abordaje de clústeres temáticos.	53
Figura 11. Redes de colaboración (países-autores-instituciones).	54
Figura 12. Evolución de términos clave de la temática de interés.	55
Figura 13. Límites del sistema de producción de frambuesa analizado.	73
Figura 14. Categorías de impacto ambiental analizadas en el sistema de producción.	86
Figura 15. Análisis de contribuciones del sistema de producción	92

ABREVIATURAS UTILIZADAS

ACB	Análisis Costo-Beneficio
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
CGV	Cadenas Globales de Valor
CPG	Cadenas de Producción Global
EC	Economía Circular
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
kg	Kilogramo
LCC	Análisis de Costos del Ciclo de Vida
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
PIB	Producto Interno Bruto
SADER	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
SIG	Sistemas de Información Geográfica

DEDICATORIA

A mi mamá, por ser mi apoyo y estar siempre a mi lado. Por todo tu amor, por creer siempre en mí, incluso cuando yo misma dudaba, y por acompañarme en cada paso de este camino. Por enseñarme con tu ejemplo a seguir adelante y no rendirme. Este logro también es tuyo.

A la memoria de mi abuela, una mujer que dejó una huella muy especial en mi vida. Por sus enseñanzas, sus recuerdos y por inspirarme a siempre seguir adelante. Aunque ya no estés aquí, sé que una parte de ti siempre me acompaña.

A mis hermanas, por todo su amor y apoyo incondicional. Por estar para mí, por creer en mí y por acompañarme en cada momento. Son una parte esencial de mi vida y un gran ejemplo de fortaleza y superación.

A mis amigos, por acompañarme durante esta etapa, por su cariño, buenos deseos y por estar siempre presentes. Por hacer más bonito este camino y compartir conmigo este logro.

A Bruno, Capu y Max mis compañeros de noches de desvelo, por recibirme siempre con alegría y por hacer que las noches más largas se sintieran un poquito menos pesadas

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma Chapingo** y al **Centro Académico y de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM)**, por brindarme la oportunidad de fortalecer mi formación académica y profesional, así como por ofrecer un espacio para el aprendizaje, la reflexión y el desarrollo de este trabajo.

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)** por el apoyo financiero otorgado, el cual fue fundamental para llevar a cabo mis estudios de posgrado.

A la **Dra. María Isabel Palacios Rangel**, por su orientación, paciencia, tiempo y acompañamiento a lo largo del desarrollo de esta investigación; por compartir generosamente sus conocimientos y por su disposición para atender mis dudas y contribuir a mi formación académica.

Al **Dr. Jorge Aguilar Ávila**, por sus observaciones, experiencia y valiosas aportaciones, las cuales contribuyeron a fortalecer y enriquecer el desarrollo de esta investigación

Al **Dr. Félix Rafael Ramírez Árpide**, por compartir sus conocimientos, por su amabilidad y por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo.

A los **productores de frambuesa** que colaboraron, por su tiempo, disposición y por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias. Su valiosa participación hizo posible el desarrollo de este trabajo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Dulce Esmeralda Almaraz Ruiz nació el 12 de octubre del 2000 en Villa de Zaachila, Oaxaca, México. Realizó la preparatoria y cursó la licenciatura en Ingeniería Agroindustrial en la Universidad Autónoma Chapingo, de la cual egresó en 2022.



Durante su formación académica participó en la formulación de un plan HACCP para la elaboración de Jocoque en la empresa COVADONGA S.A de C.V. Asimismo, realizó sus prácticas preprofesionales en F.D. Berries, donde desarrolló un manual de responsabilidad social del esquema GLOBAL G.A.P en Gómez Farias, Jalisco. En 2022, cursó el Diplomado en Inocuidad y seguridad alimentaria, organizado por el Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Durante el periodo 2022-2024 laboró en el departamento de calidad e inocuidad en la empresa “Grupo Los Cerritos”.

Finalmente, durante el periodo 2024-2026, fue estudiante de la Maestría en Ciencias en Estrategia Agroempresarial en el CIESTAAM, destacando su participación como ponente en el Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas, en sus ediciones 2025 y 2026.

RESUMEN GENERAL

DESEMPEÑO AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE FRAMBUESA: UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA¹

El sector agrícola enfrenta crecientes desafíos ambientales derivados de la presión sobre los recursos naturales y la necesidad de transitar hacia sistemas de producción más sostenibles. En este contexto, la producción de frambuesa en Puebla ha registrado un crecimiento significativo, por lo que hace necesario evaluar su desempeño ambiental. El objetivo de este estudio fue analizar dicho desempeño mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con el propósito de identificar los principales impactos ambientales y proponer acciones de mejora. La investigación se desarrolló en dos etapas. La primera consistió en un análisis bibliométrico de la literatura científica sobre ACV, con el fin de identificar tendencias de investigación. Los resultados evidenciaron un incremento en los estudios relacionados con la sostenibilidad, la economía circular y la evaluación de impactos ambientales. En la segunda etapa, se aplicó el ACV a tres unidades de producción representativas de frambuesa en Puebla, considerando las fases de cultivo y empaque. Los resultados, respaldados mediante análisis estadístico, muestran que los mayores impactos ambientales se asocian al consumo de agua, la ecotoxicidad terrestre, la toxicidad humana y el potencial de calentamiento global, principalmente por el uso de agroquímicos, energía e insumos productivos. Asimismo, se observó que los sistemas con menor rendimiento generan mayores impactos por unidad de producto. El análisis de contribución evidenció que la infraestructura del macrotúnel constituyó el principal punto crítico en el sistema de menor productividad, mientras que los procesos asociados al sistema de fertirriego adquirieron mayor relevancia conforme aumentó el rendimiento. Estos resultados aportan evidencia para orientar estrategias de mejora ambiental en sistemas de producción de frambuesa.

Palabras clave: Sostenibilidad; Agricultura protegida; Impacto ambiental; Economía circular.

¹ Tesis de Maestría en Ciencias en Estrategia Agroempresarial, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Dulce Esmeralda Almaraz Ruiz

Directora de tesis: Dra. María Isabel Palacios Rangel

ABSTRACT

ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF RASPBERRY PRODUCTION: A LIFE CYCLE ASSESSMENT¹

Agricultural systems face increasing environmental challenges resulting from pressure on natural resources and the need to transition toward more sustainable production systems. In this context, raspberry production in the state of Puebla, Mexico, has experienced significant growth, making it necessary to evaluate its environmental performance. The objective of this study was to assess the environmental performance of raspberry production through a Life Cycle Assessment (LCA) in order to identify the main environmental impacts and propose improvement strategies. The research was conducted in two stages. The first stage consisted of a bibliometric analysis of the scientific literature on Life Cycle Assessment to identify major research trends. The results revealed a growing body of research focused on sustainability, the circular economy, and environmental impact assessment. In the second stage, an LCA was applied to three representative raspberry production units in Puebla, considering both the cultivation and packing stages. The results, supported by statistical analysis, indicate that the greatest environmental impacts are associated with water consumption, terrestrial ecotoxicity, human toxicity, and global warming potential, mainly due to the use of agrochemicals, energy, and other production inputs. Furthermore, production systems with lower yields generated greater environmental impacts per unit of product. The contribution analysis showed that the macro-tunnel infrastructure was the main hotspot in the system with the lowest productivity, while the processes associated with the fertigation system became more significant as yields increased. These results provide evidence to guide environmental improvement strategies in raspberry production systems.

Keywords: Sustainability; Protected agriculture; Environmental Impact; Circular economy.

¹ Master of Science thesis in the Agribusiness Strategy Programme, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Dulce Esmeralda Almaraz Ruiz Supervisor: Dr. María Isabel Palacios Rangel

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El sector agrícola en México constituye un elemento fundamental de la economía nacional, representando aproximadamente el 3.8% del Producto Interno Bruto (PIB) (INEGI, 2024). Además, esta actividad resulta esencial para el desarrollo del empleo en áreas rurales y la seguridad alimentaria (Salinas-Velandia et al., 2022). Sin embargo, se enfrenta a desafíos asociados al cambio climático, tales como el aumento de la temperatura, la variabilidad de las precipitaciones y los eventos extremos que afectan la productividad agrícola (Villagran et al., 2024). En este contexto, la agricultura protegida ha adquirido relevancia debido a su capacidad de optimizar el uso del agua y de los insumos (Budavári et al., 2024).

Esta modalidad tecnológica ha favorecido la expansión del cultivo de frutos rojos, como la fresa, el arándano, la zarzamora y la frambuesa (Palonen et al., 2017). El crecimiento de la superficie dedicada al cultivo de la frambuesa es un fenómeno notable, con un incremento de 894 hectáreas en 2010 a 9,873 en 2024. Este aumento se ve reflejado en un incremento paralelo en el rendimiento medio por hectárea, que pasó de 16,043.6 kg/ha a 17,779.7 durante el mismo periodo (FAO, 2024). Este desarrollo se ha asociado a la implementación de tecnologías y sistemas de cultivo controlados, lo que ha fortalecido su presencia en los mercados nacional e internacional.

Según informes de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), en 2016 la producción de frambuesa en México superó las 54 000 toneladas, lo que equivale a un crecimiento del 111 %, situando al país como el quinto productor mundial de este cultivo. A nivel regional, Jalisco, Michoacán, Baja California, Estado de México, Guanajuato y Puebla se erigen como los principales estados productores al concentrar más de 98 % del volumen nacional (SADER, 2017; SIAP, 2025).

No obstante, a pesar del incremento de la superficie dedicada a este cultivo, de su mayor productividad y de las mejoras en la eficiencia del uso de recursos derivados de estos sistemas de producción, persisten desafíos ambientales

relacionados con el cambio climático y la presión sobre los recursos naturales. En la actualidad, la producción de berries en su conjunto, y en particular la de frambuesa, afronta retos importantes relacionados con el desecho de plásticos, la acumulación de residuos en el suelo procedentes del uso de agroquímicos y la consiguiente contaminación tóxica de las aguas subterráneas. En este sentido, resulta imperativo examinar los impactos ambientales asociados a estos sistemas para identificar prácticas más sostenibles y orientar la toma de decisiones de productores y consumidores (Tabatabaie & Murthy, 2016).

En el presente análisis, se considera un factor de prioridad el impacto del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos, la reducción de la productividad agrícola y el progresivo compromiso de la estabilidad de los sistemas alimentarios (Alhassan et al., 2026). Por lo tanto, se evidencia la necesidad imperante de adoptar modelos agrícolas sostenibles capaces de mitigar los impactos ambientales y fortalecer la seguridad alimentaria a largo plazo. En este contexto, las prácticas agrícolas convencionales, caracterizadas por el uso intensivo de químicos y recursos naturales, han demostrado ser insostenibles (Ellen MacArthur Foundation, 2013). En este sentido, se considera esencial disponer de metodologías que permitan la evaluación del desempeño ambiental de los sistemas productivos.

En este entorno problemático, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se erige como una herramienta metodológica destinada a la evaluación de los impactos ambientales asociados a un producto a lo largo de todas sus etapas, abarcando desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (ISO, 2006a).

De igual manera, en el contexto actual, el enfoque de la economía circular (EC) emerge como un modelo que propone transformar los sistemas de producción y consumo lineales en modelos circulares. Contraviniendo la regla del modelo tradicional, basado en el lema “extraer, producir y desechar”, este modelo busca mantener el mayor tiempo posible en uso productos, materiales y recursos productivos, optimizando su utilidad y promoviendo la regeneración de los sistemas naturales (Kirchherr & Piscicelli, 2019). Como señalan Pearce y Turner

(1990), este enfoque implica no solo la transformación de los residuos generados por los procesos productivos en nuevas materias primas, sino también la emulación de los ciclos que caracterizan a la naturaleza.

La EC se fundamenta en principios que operan dentro de los límites de los recursos renovables y que tienen como propósito la reducción de los procesos de degradación ambiental. En concordancia con ello, la EC integra dimensiones económicas, ambientales y sociales (Nassereddine et al., 2021; Okorie et al., 2018). Por lo tanto, se ha aplicado ampliamente en diferentes sectores productivos (Fiore et al., 2020; Van Langen et al., 2021).

Al abordar el tema de la producción de berries, el aumento sostenido de su demanda global ha favorecido la expansión de su producción, particularmente en México, donde existen ventajas competitivas asociadas a los costos de producción y a la calidad del producto (González-Ramírez et al., 2023). En este sentido el análisis de los impactos ambientales derivados de los sistemas agrícolas en que se produce este cultivo, se revela como un componente esencial en la formulación de estrategias de sostenibilidad territorial de los recursos naturales en los entornos locales.

En el contexto de las entidades productoras, Puebla ha destacado por su incremento en la participación en la producción de frambuesa (SIAP, 2025). Sin embargo, la carencia de estudios que evalúen los impactos negativos en los recursos naturales asociados a la productividad, no permite determinar las afectaciones actuales en las regiones poblanas donde se siembra de este cultivo.

La introducción del cultivo de la frambuesa en el estado de Puebla, se inició a mediados de la década de 2000 en municipios caracterizados por su clima templado. El municipio de Huejotzingo presenta los mayores niveles productivos en esa entidad federativa. No obstante, el éxito comercial de este cultivo ha hecho que la superficie productiva se haya ido expandiendo hacia otros municipios con vocación frutícola, como Zacatlán y Yaonáhuac (SIAP, 2025). Los primeros huertos se iniciaron a partir de siembras de traspatio y en parcelas

experimentales, para posteriormente pasar al uso de macrotúneles que protegían el cultivo de las heladas tempranas y las lluvias excesivas, fenómenos recurrentes a los que se enfrentan las actividades agrícolas en ese estado.

En este sentido, el análisis de los impactos ambientales derivados de los sistemas agrícolas es esencial para formular estrategias de sostenibilidad. En este ámbito, las transformaciones dadas en la producción de frambuesa en el estado de Puebla durante los últimos años hacen patente la necesidad de llevar a cabo un análisis exhaustivo de los impactos ambientales asociados a los sistemas de producción de este cultivo.

1.1 Antecedentes

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se ha consolidado como una de las principales metodologías para evaluar el desempeño ambiental de los sistemas agroalimentarios. Esta metodología se centra en cuantificar los impactos asociados a un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida, desde la abarcando desde la obtención de las materias primas hasta la etapa definida por los límites del sistema (ISO, 2006a). Además, permite identificar los procesos con mayor contribución a los impactos estudiados, comparar alternativas de producción y orientar estrategias para mejorar la sostenibilidad del entorno en cuestión.

En el sector agrícola, su aplicación se ha visto incrementada en respuesta a la necesidad de reducir los efectos derivados del empleo intensivo de insumos, energía y recursos naturales. El presente estudio tiene como finalidad principal evaluar el desempeño ambiental del cultivo de frambuesa, así como identificar puntos críticos asociados a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), consumo de recursos y otras categorías de impacto. Como han señalado (Nemecek & Schnetzer, 2012; Tabatabaie & Murthy, 2016), esta evaluación es fundamental para comprender los impactos ambientales globales y desarrollar estrategias efectivas para su mitigación. En consecuencia, el ACV se ha consolidado como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el diseño de sistemas más eficientes (Feijoo & Moreira, 2020).

En lo que respecta a los cultivos de frutillas, los estudios basados en ACV se han desarrollado en Europa, particularmente en Italia y España, así como en Estados Unidos, donde la investigación se ha centrado en el cultivo de fresa, seguido por la frambuesa y, en menor medida, el arándano (Galafton et al., 2023; Ilari et al., 2021; Licastro et al., 2025; Parajuli et al., 2022; Romero-Gómez & Suárez-Rey, 2020; Tabatabaie & Murthy, 2016). En conjunto, estas investigaciones han permitido identificar procesos, insumos y etapas determinantes del desempeño ambiental.

En el ámbito de la investigación agrícola, diversos estudios han analizado sistemas de producción hortofrutícola, incluyendo campo abierto, macrotúneles, microtúneles, invernaderos y sistemas sin suelo. Estos trabajos han explorado, además esquemas de manejo convencional, integrado y orgánico, así como esquemas técnicos de manejo convencional de manejo y aprovechamiento, además, diferentes materiales de acolchado, sustratos y estructuras de protección (Frakolaki et al., 2026; Galafton et al., 2023; Ilari et al., 2021; Romero-Gómez & Suárez-Rey, 2020). La diversidad metodológica evidencia el interés por identificar aquellas prácticas que incrementen la productividad sin comprometer el desempeño ambiental.

Existe consenso sobre los principales procesos responsables de los impactos ambientales. La producción y aplicación de fertilizantes minerales nitrogenados, se asocia con el potencial de calentamiento global, la acidificación y la eutrofización, debido a emisiones derivadas de su fabricación y a las pérdidas de nitrógeno en campo (Frakolaki et al., 2026; Ilari et al., 2021; Tabatabaie & Murthy, 2016; Vásquez-Ibarra et al., 2021). Asimismo, el uso de combustibles y electricidad en el riego y en las labores agrícolas constituye otra fuente relevante de impacto.

La infraestructura en agricultura protegida constituye un aspecto crítico (Licastro et al., 2025). En sistemas bajo túneles e invernaderos, los materiales empleados, tales como acero galvanizado y polietileno de baja densidad, contribuyen al agotamiento de recursos, al cambio climático y a la ecotoxicidad (Boakye-yiadom

et al., 2025; Galafton et al., 2023; Ilari et al., 2021). En la literatura reciente, se ha evidenciado la incorporación de la problemática ambiental emanada de la contaminación por plásticos agrícolas y el desarrollo de alternativas, tales como materiales biodegradables y estrategias de reciclaje, con el propósito de reducir la carga ambiental (Galafton et al., 2023).

Otro aspecto relevante es el rendimiento, que incide en los resultados del ACV. Los sistemas que exhiben mayores requerimientos de infraestructura o insumos tienden a presentar un desempeño ambiental por kilogramo de fruta más deficiente, dado que el mayor rendimiento puede compensar el uso de recursos por unidad de superficie (Licastro et al., 2025; Malefaki et al., 2025; Rantanen et al., 2024; Romero-Gómez & Suárez-Rey, 2020). La productividad es factor clave para la ecoeficiencia en el cultivo de frutillas, lo que explica que los sistemas protegidos puedan alcanzar niveles de rendimiento comparables o superiores a los obtenidos en campo abierto por unidad de producto.

Además de identificar los principales impactos ambientales, estudios recientes evidencian una evolución del ACV hacia enfoques más integrales. Mientras que los primeros trabajos se centraban en categorías como el potencial de calentamiento global, la acidificación y la eutrofización (Girgenti et al., 2013; Tabatabaie & Murthy, 2016), los estudios más recientes incorporan dimensiones como la eficiencia en el uso de recursos, la economía circular y la viabilidad económica de los sistemas productivos (Legua et al., 2021; Malefaki et al., 2025; Pergola et al., 2023).

Diversos estudios han evaluado materiales y prácticas alternativas con el objetivo de reducir los impactos ambientales en la producción de berries. Se observan sustratos derivados de sedimentos portuarios tratados, materiales biodegradables para acolchado y empaque, así como compost e insumos orientados a reducir el uso de recursos no renovables y aprovechar residuos (Galafton et al., 2023; Legua et al., 2021; Pergola et al., 2023). Estas estrategias evidencian una transición hacia modelos de economía circular, orientados a mantener el valor de los recursos y minimizar la generación de residuos.

De manera paralela, el ACV se ha integrado con otras herramientas. Malefaki et al. (2025) combinaron el Análisis de Costos del Ciclo de Vida (LCC por sus siglas en inglés) con el propósito de evaluar el desempeño ambiental y económico en frambuesa. En el estudio realizado por Boakye-yiadom et al. (2025), se incorporaron atributos de calidad del fruto. Por otro lado, en el trabajo de Parajuli et al. (2022), se expandieron los límites del sistema hasta el consumidor final, incluyendo pérdidas y desperdicio de alimentos.

En conjunto, la literatura evidencia la evolución del ACV hacia herramientas de apoyo a la toma de decisiones. Sin embargo, los estudios sobre berries se centran predominantemente en la fresa en la Unión Europea y Estados Unidos. En contraste, la investigación en frambuesa es limitada y se restringe a estudios particulares en Italia, Finlandia, Chipre, Reino Unido y Chile (Boakye-Yiadom et al., 2025; Foster et al., 2014; Malefaki et al., 2025; Rantanen et al., 2024; Vásquez-Ibarra et al., 2021), lo que evidencia la necesidad de ampliar este tipo de evaluaciones en otros países productores.

En América Latina, la evidencia es limitada y se centra en el caso de Chile. (Vásquez-Ibarra et al. (2021). Estos investigadores evaluaron la producción de frambuesa en pequeños sistemas del Maule y encontraron que la variabilidad en el manejo influye en los impactos ambientales, identificando la fertilización como principal punto crítico debido al uso excesivo de nutrientes sin incremento proporcional en el rendimiento. Este hallazgo evidencia la necesidad de optimizar el manejo agronómico para mejorar la eficiencia ambiental.

Estos resultados sugieren que las condiciones locales, el nivel tecnológico y el manejo ejercen una influencia significativa en el desempeño ambiental de los sistemas agrícolas. En consecuencia, la extrapolación de resultados obtenidos entre países debe realizarse con cautela, ya que factores como el clima, el suelo, el agua y los insumos pueden modificar los impactos ambientales estimados mediante el ACV (Tabatabaie & Murthy, 2016; Vásquez-Ibarra et al., 2021). Este hallazgo resalta la necesidad de implementar evaluaciones personalizadas que

consideren las características y necesidades específicas de cada contexto productivo.

En el contexto mexicano, la producción de berries ha experimentado un notable crecimiento en las últimas dos décadas, impulsada por factores como la demanda internacional y las ventajas asociadas al clima, la mano de obra y la agricultura protegida (González-Ramírez et al., 2023; SIAP, 2025). Este incremento ha consolidado la posición de México como uno de los grandes exportadores de frambuesa a nivel global. Sin embargo, la evidencia sobre ACV es limitada. La investigación nacional se ha enfocado en aspectos agronómicos, económicos y comerciales, mientras que los estudios sobre impactos ambientales en frambuesa son escasos.

En particular, no se identificaron investigaciones de ACV en frambuesa en Puebla, entidad con creciente participación en este cultivo (SIAP, 2025). Esta ausencia, a su vez, limita la identificación de procesos críticos y estrategias de eficiencia de recursos. En este sentido, el presente estudio evalúa el desempeño ambiental de la producción de frambuesa en Puebla, mediante el ACV, aportando información para la toma de decisiones en materia ambiental y garantizando la sostenibilidad del sistema de producción.

1.2 Justificación

El incremento en el cultivo de la frambuesa ha ocasionado un aumento en su relevancia tanto económica como social. Sin embargo, se ha producido un incremento en el uso de fertilizantes, agua, energía y materiales de cobertura, lo que ha generado presiones ambientales (Tilman et al., 2002). La producción hortícola intensiva puede tener implicaciones ambientales significativas, como emisiones, degradación del suelo y acumulación de residuos, si no se identifican los procesos críticos del sistema productivo (Campbell, 2022). En este contexto, el ACV permite evaluar el desempeño ambiental del sistema productivo y evitar que mejoras implementadas en una etapa trasladen los impactos a otras fases (ISO, 2006a).

En este sentido, para hacer frente al cambio climático y a las crecientes exigencias de los mercados agroalimentarios, resulta imperativo avanzar hacia sistemas de producción sostenibles. En este sentido, la economía circular propone reducir la extracción de insumos, la valorización de subproductos y la reincorporación de materiales al proceso productivo, con el fin de mejorar la eficiencia en el uso de recursos y reducir los impactos ambientales (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr & Piscicelli, 2019).

Si bien la implementación del ACV en berries ha experimentado un progreso en la Unión Europea y Estados Unidos, la evidencia disponible para la frambuesa es limitada y, en América Latina, se concentra principalmente en Chile. A pesar de que México se ha posicionado como uno de los principales exportadores mundiales de frambuesa y el estado de Puebla ocupa el quinto lugar a nivel nacional en términos de producción (SIAP, 2025), no se han llevado a cabo estudios que evalúen el impacto ambiental de este cultivo mediante el análisis de ciclo de vida (ACV) bajo las condiciones productivas específicas del estado. La ausencia de datos limita la identificación de puntos críticos y el diseño de estrategias para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos y la sostenibilidad del sistema productivo frambuesa.

En este contexto, el principal aporte de la presente investigación radica en generar evidencia original y contextualizada sobre el desempeño ambiental de la producción de frambuesa en el estado de Puebla, mediante la aplicación del ACV bajo sus condiciones productivas específicas. De esta manera el estudio contribuirá a cubrir un vacío de conocimiento existente en el ámbito nacional y regional, al proporcionar información sobre los procesos y etapas que presentan una mayor contribución a los impactos ambientales. Asimismo, sus resultados constituirán una base de referencia para futuras investigaciones. Desde el ámbito aplicado, los resultados permitirán identificar los procesos con mayor contribución a los impactos ambientales y proporcionar información para productores, investigadores y tomadores de decisiones, con el fin de orientar estrategias que promuevan el uso eficiente de los recursos.

1.3 Planteamiento del problema

En la actualidad, el sector agroalimentario se enfrenta a una presión cada vez mayor, originada por el incremento en la demanda de alimentos y la imperativa necesidad de reducir su impacto ambiental, especialmente aquellos asociados al uso intensivo de recursos y a las emisiones contaminantes. En este contexto, los modelos de producción agrícola lineales prevalecen, lo que conlleva una alta dependencia de insumos externos y la generación de residuos que impactan la salud del suelo y los ecosistemas, además de limitar el uso eficiente del agua y otros recursos naturales (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

En el contexto mexicano, esta problemática se ha visto exacerbada por el incremento en el cultivo de berries, que ha experimentado un notable aumento en su extensión y nivel de tecnificación en las últimas décadas. En el contexto del grupo en cuestión, la frambuesa se distingue por su relevancia económica y su presencia en los mercados internacionales, así como por su expansión en estados productores como Puebla (SIAP, 2025). Sin embargo, este crecimiento ha estado acompañado de un incremento en el uso de fertilizantes, agua, energía y materiales de infraestructura, lo que puede incrementar la presión ambiental del sistema productivo.

Desde una perspectiva ambiental, la literatura evidencia que los principales impactos en sistemas hortícolas intensivos se asocian al uso de fertilizantes nitrogenados, al consumo energético, la utilización de plásticos agrícolas y la infraestructura de sistemas protegidos, los cuales contribuyen al cambio climático, la eutrofización y la degradación de recursos naturales (Licastro et al., 2025; Tabatabaie & Murthy, 2016; Tilman et al., 2002). No obstante, no se han identificado estudios que, mediante la aplicación del ACV, permitan identificar integralmente los impactos ambientales asociados a la producción de frambuesa y determinar los procesos, insumos o etapas que contribuyen en mayor medida a estos impactos bajo condiciones agroclimáticas, tecnológicas y de manejo propias de la región (Vásquez-Ibarra et al., 2021).

Esta falta de evidencia limita la identificación de los puntos ambientales críticos del sistema productivo, dificulta la formulación de estrategias orientadas a mejorar la eficiencia en el uso de recursos y reducir los impactos ambientales de la producción. Por ello, el problema de investigación radica en la insuficiencia de información para identificar y evaluar los principales impactos ambientales y los procesos críticos asociados a la producción de frambuesa en el estado de Puebla. De esta forma, resulta necesario aplicar ACV para generar evidencia que permita conocer cuáles son las etapas y procesos del sistema productivo que presentan mayor contribución a los impactos ambientales y que, por tanto, requieren mayor atención prioritaria para avanzar hacia una producción más sostenible.

En este sentido, la pregunta de investigación se formula de la siguiente manera: ¿Cuáles son los principales impactos ambientales asociados a la producción de frambuesa en Puebla y qué procesos del sistema productivo concentran dichos impactos?

1.4 Objetivos de la investigación

Con la finalidad de establecer los alcances de la investigación se plantean los siguientes objetivos:

1.4.1 Objetivo general

Analizar el desempeño ambiental de la producción de frambuesa en el estado de Puebla, mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), para identificar los principales impactos ambientales y procesos críticos del sistema productivo.

1.4. 2 Objetivos específicos

O1. Describir el estado actual del conocimiento sobre los impactos ambientales y económicos del sector agrícola, mediante un análisis bibliométrico para identificar tendencias temáticas, actores principales y lagunas de conocimiento que orienten investigaciones futuras.

O2. Analizar el desempeño ambiental de la producción de frambuesa en Puebla, mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), identificando los principales impactos ambientales asociados al sistema productivo.

O3. Proponer acciones de mejora orientadas a la sostenibilidad del sistema productivo de frambuesa en el estado de Puebla.

1.5 Preguntas de investigación

P1: ¿Cuál es el estado actual del conocimiento sobre los impactos ambientales y económicos del sector agrícola?

P2: ¿Cuáles son los principales impactos ambientales y procesos críticos asociados a la producción de frambuesa en Puebla identificados mediante ACV?

P3: ¿Qué acciones de mejora pueden contribuir a mejorar la sostenibilidad del sistema de producción de frambuesa en Puebla a partir de los resultados del ACV?

1.6 Hipótesis de la investigación

Hi1: La literatura científica del sector agrícola refleja un interés creciente sobre los impactos ambientales y económicos de este sector con una estrecha vinculación hacia los enfoques de economía circular.

Hi2: La producción de frambuesa en Puebla presenta impactos ambientales asociados al uso de fertilizantes nitrogenados, el consumo de agua e infraestructura agrícola.

Hi3: La identificación de los procesos críticos mediante ACV permite formular acciones de mejora orientadas a la reducción de impactos ambientales y al incremento de la sostenibilidad del sistema productivo.

1.7 Estructura de la tesis

La presente tesis se compone de cinco capítulos, de los cuales dos derivan en artículos científicos, cuyo esquema de integración se presenta en la Figura 1.

En este sentido, posterior a este capítulo introductorio, se desarrolla el capítulo 2, que integra la revisión de literatura, la cual se ha estructurado en dos apartados. El primero, corresponde al marco teórico-conceptual, donde se abordan las principales teorías y conceptos relacionados con el objeto de estudio. El segundo, presenta el marco de referencia, en el cual se expone el contexto del cultivo de frambuesa, así como las condiciones nacionales y regionales en las que se inserta este sector.

El tercer capítulo corresponde al primer artículo científico, el cual desarrolla un análisis bibliométrico a partir de una base de datos obtenida de Scopus.

Posteriormente, el cuarto capítulo corresponde al segundo artículo, en el cual se identifican los principales impactos ambientales y procesos críticos, mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El análisis de la información se realizó en el Software Open LCA.

Finalmente, el quinto capítulo integra los principales hallazgos derivados de los capítulos previos, articulando los resultados en función de las preguntas de investigación y destacando las contribuciones de la tesis.

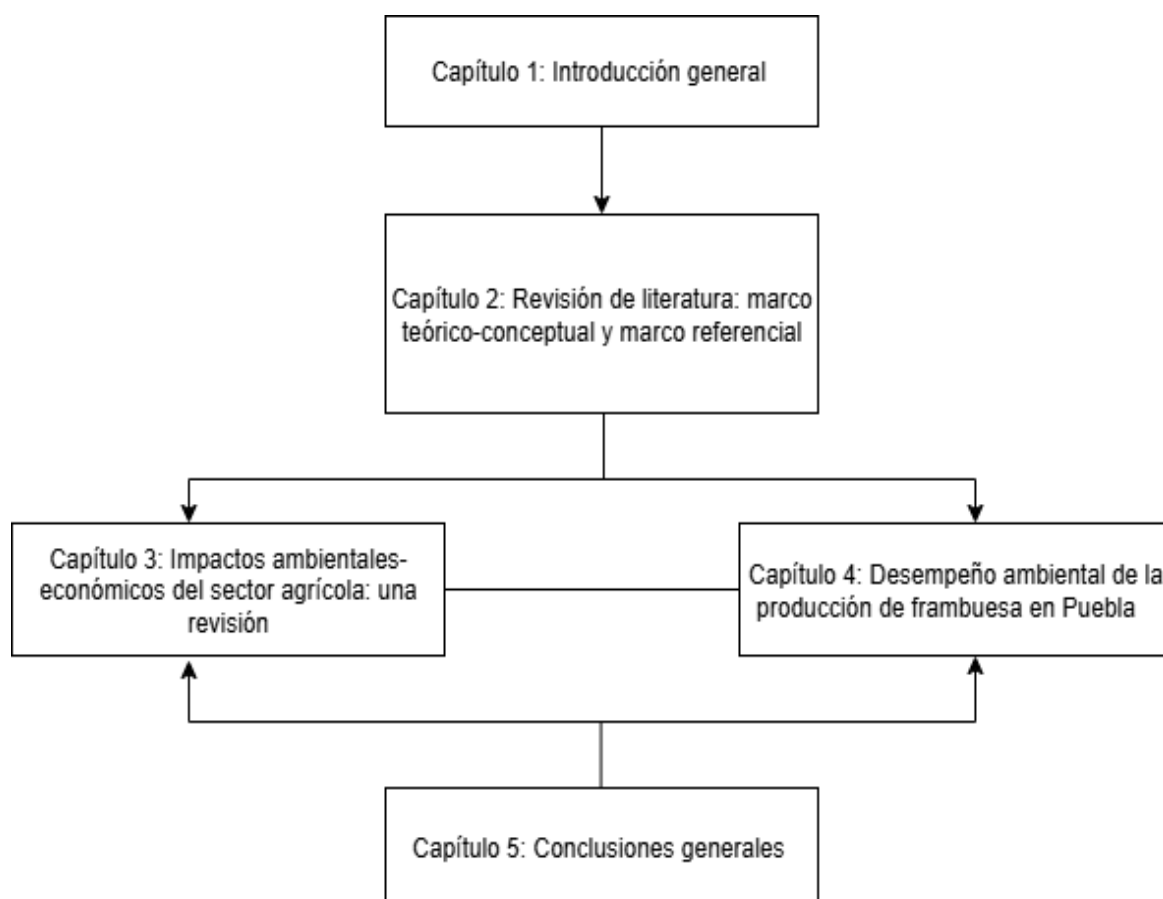


Figura 1. Estructura de la tesis

Fuente: Elaboración propia

1.8 Literatura citada

- Alhassan, A., Angeles, M., & Galagedara, L. W. (2026). Integrating climate change , food security , and innovative agriculture in Newfoundland and Labrador (NL): A Water-Energy-Food (WEF) nexus approach. *Global Transitions*, 8(1), 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2025.08.002>
- Boakye-Yiadom, K. A., Ilari, A., Olivi, L., Zucchi, P., Osti, L., Mezzetti, B., & Duca, D. (2025). Environmental sustainability and quality assessment of new raspberry genotypes cultivated in a soilless system. *Sustainable Production and Consumption*, 54(February), 502–515. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.01.020>
- Budavári, N., Pék, Z., Helyes, L., Takács, S., & Nemeskéri, E. (2024). An Overview on the Use of Artificial Lighting for Sustainable Lettuce and Microgreens Production in an Indoor Vertical Farming System. *Horticulturae*, 10(9), 938. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090938>
- Campbell, B. (2022). *Climate change impacts and adaptation options in the agrifood system*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0425en>

- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition (Vol. 1)*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>
- FAO. (2024). *FAOSTAT statistical yearbook: Global agriculture trends*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2020). *Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono: Casos prácticos*. Universidad de Santiago de Compostela.
- Fiore, E., Stabellini, B., & Tamborrini, P. (2020). A systemic design approach applied to rice and wine value chains. The case of the innovaecofood project in piedmont (italy). *Sustainability (Switzerland)*, 12(9272), 1–28. <https://doi.org/10.3390/su12219272>
- Foster, C., Guében, C., Holmes, M., Wiltshire, J., & Wynn, S. (2014). The environmental effects of seasonal food purchase : a raspberry case study. *Journal of Cleaner Production*, 73, 269–274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.077>
- Frakolaki, G., Parcharidou, M., Boukouvalas, C., Papadaki, S., Panagiotou, N., Valanides, N., Kokkini, A., Georgiadou, E. C., Milivojević, J., Tsormpatsidis, E., Raffaelli, D., Mezzetti, B., Manganaris, G. A., & Krokida, M. (2026). Comparative climate change impacts of different strawberry cultivation systems in Southeastern Europe: A study across open-field and protected cultivation systems towards sustainable production models. *Journal of Agriculture and Food Research*, 26(April 2025), 102589. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102589>
- Galafton, C., Maga, D., Sonnemann, G., & Thonemann, N. (2023). Life cycle assessment of different strawberry production methods in Germany with a particular focus on plastic emissions. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(6), 611–625. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02167-9>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. (2017). La Economía Circular: ¿Un nuevo paradigma de sostenibilidad? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Girgenti, V., Peano, C., Bounous, M., & Baudino, C. (2013). Science of the Total Environment A life cycle assessment of non-renewable energy use and greenhouse gas emissions associated with blueberry and raspberry production in northern Italy. *Science of the Total Environment*, The, 458–460, 414–418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.060>
- González-Ramírez, M. G., Santoyo-Cortés, V. H., Arana-Coronado, J. J., Muñoz-Rodríguez, M., & Albis-Salas, N. (2023). Global traders and the integration

- of Chile and Mexico into the configuration of the global value chain of berries. *International Food and Agribusiness Management Review*, 26(2), 225–242. <https://doi.org/10.22434/IFAMR2021.0152>
- Ilari, A., Toscano, G., Boakye-Yiadom, K. A., Duca, D., & Foppa Pedretti, E. (2021). Life Cycle Assessment of Protected Strawberry Productions in Central Italy. *Sustainability*, 13(9), 4879. <https://doi.org/10.3390/su13094879>
- INEGI. (2024). *Producto Interno Bruto*. <https://www.inegi.org.mx/temas/pib/>
- ISO. (2006). ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. *International Organization for Standardization*. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Kirchherr, J., & Piscicelli, L. (2019). Towards an Education for the Circular Economy (ECE): Five Teaching Principles and a Case Study. *Resources, Conservation and Recycling*, 150(104406). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104406>
- Legua, P., Hernández, F., Tozzi, F., Martínez-Font, R., Jorquera, D., Jiménez, C. R., Giordani, E., Martínez-Nicolás, J. J., & Melgarejo, P. (2021). Application of LCA methodology to the production of strawberry on substrates with peat and sediments from ports. *Sustainability*, 13(11), 6323. <https://doi.org/10.3390/su13116323>
- Licastro, A., Salomone, R., Mondello, G., & Calabrò, G. (2025). Soil-less is more? A comparative life cycle assessment case study of agricultural growing methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 30(8), 1705–1723. <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02467-2>
- Malefaki, A. X., Valanides, N., Manganaris, G. A., DeVetter, L. W., Papadaki, S., Krokida, M., Vyrkou, A., & Angelis-Dimakis, A. (2025). A comprehensive assessment of life cycle environmental impact and economic feasibility of different red raspberry (*Rubus idaeus* L) cultivation systems. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 11(May), 100150. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2025.100150>
- Nassereddine, H., Seo, K. W., Rybkowski, Z. K., Schranz, C., & Urban, H. (2021). Propositions for a Resilient, Post-COVID-19 Future for the AEC Industry. *Frontiers in Built Environment*, 7(687021), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.687021>
- Nemecek, T., & Schnetzer, J. (2012). *Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems*.
- Okorie, O., Salonitis, K., Charnley, F., Moreno, M., Turner, C., & Tiwari, A. (2018). Digitisation and the circular economy: A review of current research and

future trends. *Energies*, 11(3009), 1–31.
<https://doi.org/10.3390/en11113009>

Palonen, P., Pinomaa, A., & Tommila, T. (2017). The influence of high tunnel on yield and berry quality in three florican raspberry cultivars. *Scientia Horticulturae*, 214, 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.049>

Parajuli, R., Matlock, M. D., & Thoma, G. (2022). Environmental life cycle impact assessment of fresh California strawberries: A full supply chain perspective. *Cleaner and Responsible Consumption*, 6(August), 100073. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2022.100073>

Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1990). *Economics of natural resources and the environment*. Johns Hopkins University Press.

Pergola, M., Maffia, A., Carlucci, G., Persiani, A., Palese, A. M., Zaccardelli, M., Altieri, G., & Celano, G. (2023). An Environmental and Economic Analysis of Strawberry Production in Southern Italy. *Agriculture*, 13(9), 1705. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091705>

Rantanen, M., Joensuu, K., Silvenius, F., Usva, K., Rikala, K., & Karhu, S. (2024). Life cycle assessment of red raspberry production – a comparative case study of open field and tunnel production in Finland. *International Society for Horticultural Science*, 165–170. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1388.25>

Romero-Gámez, M., & Suárez-Rey, E. M. (2020). Environmental footprint of cultivating strawberry in Spain. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(4), 719–732. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01740-w>

Salinas-Velandia, D. A., Romero-Perdomo, F., Numa-Vergel, S., Villagrán, E., Donado-Godoy, P., & Galindo-Pacheco, J. R. (2022). Insights into circular horticulture: Knowledge diffusion, resource circulation, one health approach, and greenhouse technologies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12053. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912053>

SIAP. (2025). Panorama Agroalimentario 2025. *Panorama Agroalimentario*.

Tabatabaie, S., & Murthy, G. S. (2016). Cradle to farm gate life cycle assessment of strawberry production in the United States. *Journal of Cleaner Production*, 127, 548–554. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.175>

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671–677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>

- Urbinati, A., Chiaroni, D., & Chiesa, V. (2017). Towards a new taxonomy of circular economy business models. *Journal of Cleaner Production*, 168, 487–498. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.047>
- Van Langen, S. K., Vassillo, C., Ghisellini, P., Restaino, D., Passaro, R., & Ulgiati, S. (2021). Promoting circular economy transition: A study about perceptions and awareness by different stakeholders groups. *Journal of Cleaner Production*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128166>
- Vásquez-Ibarra, L., Iriarte, A., Rebolledo-Leiva, R., Vásquez, M., Angulo-Meza, L., & González-Araya, M. C. (2021). Considering the influence of the variability in management practices on the environmental impacts of fruit production: A case study on raspberry production in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 313(May), 127609. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127609>
- Villagran, E., Toro-Tobón, G., & Estrada-Bonilla, G. A. (2024). Integration of IoT Technologies and High-Performance Phenotyping for Climate Control in Greenhouses and Mitigation of Water Deficit : A Study of High-Andean Oat. *AgriEngineering*, 6, 4011–4040. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040227>

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco teórico-conceptual

Este capítulo presenta las teorías que sustentan el análisis del impacto en la producción de berries. Se comenzará con el concepto de desarrollo sostenible, posteriormente se abordan los impactos de las actividades productivas y la necesidad de valorar los recursos naturales para mitigar los efectos negativos en el medio ambiente.

2.1.1 Acerca del desarrollo sostenible

El concepto de desarrollo sostenible se deriva de la evolución de la teoría del desarrollo económico y de las críticas al modelo de crecimiento ilimitado. En la economía del desarrollo clásica, el crecimiento se entendía como un proceso lineal asociado a la industrialización, la acumulación de capital y la modernización de las economías, como lo plantea Rostow (1960).

Sin embargo, este enfoque comenzó a ser cuestionado al incorporarse la dimensión ambiental como un límite estructural del sistema económico. Desde la economía ecológica, se plantea que la actividad económica se encuentra necesariamente contenida dentro de un sistema biofísico finito. En este sentido, Georgescu-Roegen (1971) argumentan, desde la ley de la entropía, que todo proceso económico implica degradación irreversible de energía, lo que impone restricciones físicas al crecimiento. En conjunto, estas críticas redefinen el desarrollo al incorporar la noción de límites ecológicos como condición del sistema económico.

El concepto de desarrollo sostenible se formaliza en el Informe Brundtland (WCED, 1987) donde se define como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras. Esta definición integra dimensiones económicas, sociales y ambientales como parte de un mismo sistema.

A partir de esta formulación, el concepto se ha dividido en dos enfoques teóricos principales. La sostenibilidad débil, desde la economía neoclásica ambiental,

sostiene que el capital natural puede ser sustituido por capital manufacturado bajo un principio de compensación (Solow, 1974). En contraste, la sostenibilidad fuerte, desarrollada desde la economía ecológica, establece que existen componentes del capital natural que no son sustituibles debido a su función ecológica crítica (Daly, 1996).

Esta distinción resulta fundamental para el análisis de sistemas agrícolas intensivos, en los que recursos como el suelo y el agua presentan límites de regeneración y sustitución.

2.1.1.1 Intensificación agrícola y límites del crecimiento

En el ámbito agrícola, la intensificación productiva se ha planteado como una estrategia para incrementar la productividad por unidad de superficie. Tilman et al. (2002) señalan que este proceso puede mejorar la eficiencia en el uso de recursos por unidad de producto, aunque no necesariamente reduce el impacto ambiental total del sistema.

Este comportamiento se asocia al efecto rebote, donde los incrementos en eficiencia pueden conducir a un aumento del consumo agregado de recursos debido a la expansión de la producción o del mercado. En términos agrícolas, esto implica que la tecnificación puede reducir impactos relativos, pero no necesariamente los impactos absolutos del sistema productivo (Vásquez-Ibarra et al., 2021). En sistemas como la producción de frambuesa, este fenómeno es relevante debido al uso intensivo de insumos y energía asociado a la intensificación productiva (SIAP, 2025).

2.1.1.2 Enfoques sistémicos del desarrollo sostenible en la agricultura

Desde el enfoque de sistemas socio ecológicos, la agricultura se entiende como un sistema integrado en el que interactúan de manera dinámica los sistemas sociales y ecológicos. Berkes et al. (2003) y Holling. (2001) proponen que estos sistemas son complejos, adaptativos y están caracterizados por procesos de retroalimentación entre sociedad y naturaleza. Bajo esta perspectiva, las decisiones tecnológicas, productivas e institucionales influyen directamente en la

estructura y funcionamiento de los ecosistemas, al mismo tiempo que los límites ecológicos condicionan dichas decisiones (Holling, 2001).

2.1.1.3 Metabolismo socio ecológico y flujos de recursos

El enfoque del metabolismo socio ecológico permite analizar los sistemas productivos en términos de flujos de energía y materiales que los atraviesan. Fischer-Kowalski & Haberl (2007) señalan que las sociedades pueden entenderse como sistemas que transforman energía y materia a través de procesos productivos.

En el caso de la agricultura, estos flujos incluyen entradas como agua, fertilizantes y energía, que se transforman en biomasa, productos agrícolas y emisiones residuales. Este enfoque permite conceptualizar la agricultura como un sistema abierto dependiente de recursos externos y generador de impactos ambientales en distintas etapas del ciclo productivo.

2.1.1.4 Capital natural y límites biofísicos

El capital natural se refiere al conjunto de recursos y funciones ecosistémicas que sostienen los procesos productivos, incluyendo suelo, agua, biodiversidad y ciclos biogeoquímicos (Costanza et al., 1997). Estos elementos no solo funcionan como insumos del sistema productivo, sino que también regulan su estabilidad ecológica.

Desde la economía ecológica, se reconoce que este capital presenta límites biofísicos que condicionan el funcionamiento de los sistemas agrícolas. Daly, (1996) enfatiza que dichos límites no pueden ser compensados completamente mediante capital manufacturado, lo que refuerza la necesidad de considerar restricciones ecológicas en el análisis productivo. En consecuencia, la intensificación agrícola debe interpretarse no solo como un proceso de eficiencia, sino también como una reconfiguración de la presión sobre el capital natural.

En conjunto, los enfoques revisados permiten comprender la producción de frambuesa como un sistema socio ecológico sujeto a flujos materiales y

energéticos finitos. Bajo esta perspectiva, la tecnificación puede mejorar la eficiencia productiva, pero no elimina los límites biofísicos del sistema ni las presiones ambientales asociadas (Fischer-Kowalski & Haberl, 2007; Tilman et al., 2002). Por ello, el análisis del desempeño ambiental requiere integrar simultáneamente la estructura del sistema productivo, el uso de capital natural y la dinámica de los flujos metabólicos que lo sostienen.

2.1.2 Acerca de los impactos

El concepto de impacto se refiere a los cambios significativos a largo plazo que una acción, política o intervención puede provocar, ya sean esperados o no. Según Weiss (1998), en la teoría del cambio, estos impactos son consecuencias duraderas sobre las condiciones de vida de la población, resultantes de una cadena causal. El ámbito económico, Krugman (1991), a partir de la teoría del comercio y geografía económica, entiende el impacto como las repercusiones en la eficiencia del mercado y la distribución de ingresos, considerando tanto beneficios como costos.

En el plano social, Sen (1999), a través de la teoría de las capacidades, destaca las transformaciones en la calidad de vida y el acceso a oportunidades. En el ámbito ambiental, Glasson et al. (2013), señalan que las actividades humanas provocan alteraciones directas e indirectas sobre los ecosistemas y el entorno biofísico. De este modo los impactos pueden evaluarse en diferentes ámbitos (económico, social y ambiental).

2.1.2.1 Tipología de impactos

A) Impactos ambientales

El impacto ambiental se refiere a cualquier alteración en el medio ambiente, ya sea positiva o negativa, como resultado de acciones humanas o procesos naturales. Estos efectos pueden manifestarse en la calidad del aire, el agua, el suelo y la biodiversidad, afectando tanto a los ecosistemas como al bienestar humano (EPA, 2023). Por ello, comprender y medir el impacto ambiental resulta

esencial para gestionar los recursos naturales y garantizar un desarrollo sostenible

La medición del impacto ambiental es un proceso que combina métodos cualitativos y cuantitativos para evaluar la magnitud, duración y alcance de los efectos de las actividades humanas. Herramientas como el ACV, permiten cuantificar los impactos asociados a todas las etapas de un producto o servicio. Otros indicadores incluyen la huella de carbono, la huella hídrica y métricas relacionadas con la pérdida de biodiversidad. Además, estos estudios emplean metodologías como las matrices de Leopold y sistemas de información geográfica (SIG) para identificar y valorar los efectos ambientales de manera integral y detallada.

Medir el impacto ambiental es crucial ya que proporciona información para tomar decisiones responsables y sostenibles. A nivel gubernamental, estas evaluaciones son esenciales para determinar la viabilidad de proyectos (Glasson et al., 2013). En el sector empresarial, la medición ayuda a identificar riesgos ambientales, optimizar procesos y reducir impactos negativos. Finalmente, estas mediciones contribuyen a la educación y sensibilización de la sociedad, promoviendo la adopción de prácticas responsables y fomentando una mayor conciencia sobre la importancia de proteger los ecosistemas.

De acuerdo con lo anterior, los impactos se presentan y pueden ser evaluados en todas las actividades productivas, es decir, en los diferentes sectores (primario, secundario y terciario).

B) Impactos ambientales en el sector primario

La agricultura, si bien es esencial para la producción de alimentos, genera impactos ambientales significativos que deben ser abordados. Uno de los problemas destacados es el uso excesivo de agroquímicos, que, según Gliessman (2015), promueve la resistencia de plagas y crea un ciclo de dependencia insostenible. Este fenómeno se agrava en sistemas agrícolas intensivos, donde el monocultivo y la labranza excesiva contribuyen a la

degradación del suelo. Según Montgomery (2012), estas prácticas no solo afectan la salud del suelo, sino que también comprometen la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas agrícolas.

En este sentido, la conversión de ecosistemas naturales en tierras agrícolas provoca una considerable pérdida de biodiversidad. La expansión agrícola es una de las principales causas de reducción de la diversidad biológica (Winkler et al., 2021). Asimismo, dichas prácticas alteran el ciclo del agua, lo que puede llevar a una escasez hídrica en regiones vulnerables (Postel & Carpenter, 1997). A esto se suma el hecho de que la agricultura es responsable de emisiones de gases de efecto invernadero, como metano y óxido nitroso, derivados principalmente de la ganadería y el uso de fertilizantes (Campbell, 2022).

Además, estos impactos ambientales tienen implicaciones directas sobre la salud humana. En particular, la exposición prolongada a agroquímicos puede generar problemas de salud en los trabajadores agrícolas y comunidades cercanas (Pimentel, 2005). Por lo tanto, ante estos desafíos, es esencial adoptar métodos sostenibles, como enfoques agroecológicos y tecnologías limpias, para minimizar los efectos adversos.

C) Impactos ambientales en la agricultura protegida

La agricultura protegida, que incluye técnicas como invernaderos y sistemas de cultivo controlado, presenta diversos impactos ambientales. Si bien esta práctica tiene el potencial de reducir la presión sobre los suelos al permitir cultivos intensivos en áreas pequeñas, una gestión inadecuada puede derivar en la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad. En este contexto, Grover et al. (2024) destacan la importancia de adoptar prácticas de manejo sostenible para preservar la salud del suelo y proteger los ecosistemas circundantes.

En lo que respecta al consumo de agua, aunque la agricultura protegida, suele ser más eficiente en términos hídricos en comparación con la agricultura convencional, el uso de técnicas de riego ineficientes puede llevar a un consumo excesivo, afectando negativamente las fuentes hídricas locales (Ferreira et al.,

2024). Por lo tanto, es fundamental implementar sistemas de riego eficientes que optimicen el uso del agua.

Asimismo, en relación con el uso de productos químicos, la aplicación de pesticidas y fertilizantes en la agricultura protegida puede aumentar la producción, pero también conlleva riesgos de contaminación del suelo y del agua. Damalas & Eleftherohorinos (2011) sugieren explorar alternativas sostenibles, como la agricultura orgánica, para mitigar estos efectos. Su trabajo resalta la necesidad de abordar las repercusiones negativas que estos productos pueden tener en el medio ambiente y en la salud pública.

Otro aspecto a considerar es el impacto energético de la agricultura protegida. El funcionamiento de los invernaderos está asociado con emisiones de gases de efecto invernadero, debido a la energía consumida para su operación. No obstante, la adopción de tecnologías renovables puede ayudar a mitigar este impacto (Ridzuan et al., 2020). En este sentido, Chataut et al. (2023) afirman que la implementación de prácticas sostenibles en este tipo de agricultura es esencial para reducir su huella de carbono.

Finalmente, aunque la agricultura protegida puede ofrecer hábitats seguros para ciertos organismos beneficiosos, la homogeneización de cultivos y el uso intensivo de recursos pueden resultar en una pérdida de biodiversidad. Murawska & Goryńska-Goldmann (2023) enfatizan la importancia de integrar estrategias de conservación en estos sistemas, con el fin de asegurar su sostenibilidad. En este contexto, aunque la agricultura protegida tiene el potencial de ser más sostenible que la convencional, su implementación debe ser consciente y responsable.

2.1.2.2 Evaluaciones de impactos

La evaluación de impactos es un proceso fundamental en la planificación y gestión de proyectos, ya que permite identificar y mitigar sus efectos en las áreas ambiental, económica y social. Cada una con métodos específicos, respaldados por diversas teorías.

En el ámbito ambiental, la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es una herramienta para identificar, predecir y mitigar las repercusiones negativas de un proyecto en el entorno natural (Canter, 1996). Esta evaluación se complementa con el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que examina el impacto ambiental de un producto a lo largo de todas sus fases, desde la extracción de recursos hasta su disposición final, proporcionando una visión más completa del impacto a largo plazo.

Por su parte, en el análisis de los impactos económicos, el Análisis Costo-Beneficio (ACB) desarrollado por Little & Mirrlees (1974), constituye un enfoque que permite que comparar costos y beneficios económicos. Asimismo, los modelos econométricos, basados en la teoría de sistemas dinámicos de Forrester (1961), ofrecen un marco para analizar la relación entre variables económicas y los efectos que un proyecto puede tener a lo largo del tiempo.

Finalmente, los métodos de evaluación de impactos son fundamentales para asegurar la sostenibilidad y viabilidad de los proyectos. A continuación, se presenta un resumen de las principales categorías e indicadores utilizados en estos métodos (Cuadro 1):

Cuadro 1. Métodos de evaluación de impactos

Categoría de Impacto	Métodos de Evaluación	Descripción	Concepto	Indicadores	Referencias
	EIA	Identifica y evalúa los efectos ambientales de un proyecto antes de su aprobación, incluyendo análisis de alternativas y participación pública.	Sostenibilidad	-Calidad del aire -Calidad del agua -Pérdida de biodiversidad (No. de especies afectadas) -Uso de recursos naturales (agua, suelo, minerales) -Cambios en el uso del suelo (deforestación, urbanización) - Generación de residuos sólidos y líquidos -Efectos en hábitats críticos -Riesgos de accidentes ambientales	Canter, 1996
	ACV	Evalúa el impacto ambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida, considerando desde la extracción de materias primas hasta el desecho final.	Sostenibilidad	- Huella de carbono (emisiones de CO₂) - Consumo de energía - Generación de residuos (por tipo) - Efectos sobre la salud humana (exposición a tóxicos) - Impacto en ecosistemas (servicios ecosistémicos) - Recursos consumidos (agua, materia prima) - Costos ambientales (en términos monetarios)	(ISO, 2006a) Baker & McLachlan, 2021
	Modelos de Simulación	Simula escenarios ambientales para prever impactos a largo plazo, ayudando en la toma de decisiones informadas.	Modelado Ambiental	- Proyecciones de contaminación (aire, agua, suelo) - Cambios en el uso del suelo (áreas afectadas) - Efectos acumulativos a largo plazo - Interacciones entre variables ambientales - Cambios en la calidad de vida de las comunidades	Rauscher et al., 2010

Ambientales

Económicos	ACB	Compara costos y beneficios económicos de un proyecto, evaluando su viabilidad económica y la optimización de recursos.	Teoría económica clásica	- Tasa de retorno de inversión (ROI) - Costo total del proyecto - Beneficio neto (ingresos menos gastos) - Valor presente neto (VPN) - Impacto económico a largo plazo (sostenibilidad)	Little & Mirrlees, 1974
	Modelos Econométricos	Analiza y prevé efectos económicos utilizando datos estadísticos, permitiendo modelar relaciones y tendencias.	Teoría de sistemas dinámicos	- PIB local (crecimiento o decrecimiento) - Tasa de empleo (por sector) - Inversión extranjera (monto y tipo) - Efecto multiplicador en la economía local - Cambios en ingresos familiares - Análisis de precios (inflación, precios de bienes)	Forrester, 1961
	Impacto Fiscal	Evalúa repercusiones fiscales en la recaudación de impuestos y en el gasto público, ofreciendo información crucial para la planificación financiera	Análisis Fiscal	-Ingresos fiscales -Gasto público -Cambio en la deuda pública -Impacto en inversiones públicas -Sostenibilidad fiscal (capacidad de financiar proyectos a futuro)	Aghion & Howitt, 2009

Fuente: Elaboración propia

2.1.2.3 Marco político legal

El marco político legal que regula los impactos ambientales, económicos y sociales es fundamental para el desarrollo sostenible. Este marco está basado en normativas y acuerdos que buscan equilibrar el crecimiento económico con la conservación del medio ambiente y el bienestar social.

En el ámbito internacional, la legislación ambiental internacional ha evolucionado desde la Conferencia de Estocolmo en 1972, destacando el Informe Brundtland (1987) que definió el desarrollo sostenible como aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las de las futuras generaciones. Este principio ha guiado acuerdos, como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, centrados en la mitigación del cambio climático.

En este contexto, México ha implementado la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), que establece lineamientos para la conservación y el uso sustentable de los recursos naturales, promoviendo la participación de la sociedad civil en la toma de decisiones (Ley General Del Equilibrio Ecológico y La Protección Al Ambiente, 1988)

No obstante, la explotación de recursos naturales puede generar crecimiento económico a corto plazo, pero también conlleva riesgos significativos de degradación ambiental (Pearce & Turner, 1990). En este sentido, Costanza et al. (1997) enfatizan la importancia de los servicios ecosistémicos, cuyos costos a menudo son subestimados en los análisis económicos. El desarrollo sostenible, por tanto, debe integrar los derechos y necesidades de las comunidades vulnerables.

Asimismo, las EIA son herramientas esenciales para la regulación de proyectos con potenciales impactos ambientales, ya que permiten anticipar y mitigar efectos negativos (Glasson et al., 2013). Finalmente, la formulación de políticas públicas que integren aspectos ambientales, económicos y sociales es un componente clave de un marco sostenible. En este sentido, la economía circular y la responsabilidad social corporativa emergen como estrategias fundamentales

para promover una gestión responsable de los recursos y asegurar un crecimiento equilibrado (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

2.1.2.4 Desafíos en la medición de impactos

La medición de impactos en el sector agrícola enfrenta desafíos en tres áreas: causalidad, calidad de los datos y heterogeneidad de los efectos. En cuanto a la causalidad, establecer relaciones entre la actividad agrícola y sus efectos en el ecosistema es complejo, ya que la agricultura puede dañar a la biodiversidad como a los recursos hídricos. Aunque los ensayos controlados aleatorizados se consideran el estándar, su aplicación no siempre es factible, esto ha llevado al uso de métodos como el propensity score matching (PSM) y la diferencia en diferencias (DiD) (Heckman & Vytlacil, 2007; Imbens & Wooldridge, 2009).

Por otro lado, la calidad de los datos es fundamental para la falta de evaluación precisa de los impactos. Sin embargo, la falta de información detallada sobre el uso de recursos naturales, como el agua o los fertilizantes, limita la evaluación de los efectos de la producción agrícola (Morris et al., 2009). Asimismo, la escasez de datos sobre ingresos y costos de producción dificulta el análisis de la rentabilidad en las explotaciones agrícolas (Ravallion, 2001). Además, la falta de datos suficientes sobre el impacto social de las actividades agrícolas complica la evaluación de las dinámicas sociales y los efectos sobre las comunidades (Heckman & Vytlacil, 2007).

Finalmente, la heterogeneidad de los efectos es otro desafío significativo. Los impactos de las prácticas agrícolas varían según la ubicación geográfica y las prácticas agrícolas específicas, lo que sugiere que las políticas deben adaptarse a contextos específicos (Deaton, 2010). Además, la rentabilidad, puede diferir entre pequeños y grandes productores.

A continuación, se presenta un resumen de los desafíos en la medición de impactos (Cuadro 2):

Cuadro 2. Desafíos en la medición de impactos

Área	Desafío	Descripción	Relevancia	Referencias
Identificación de Causalidad	Complejidad en relaciones causales	Dificultad para aislar los efectos de la actividad agrícola en el ecosistema.	Implica la utilización de métodos cuasi-experimentales	Heckman & Vytlačil, 2007; Imbens & Wooldridge, 2009
	Validación de métodos alternativos	Dependencia de supuestos rigurosos en técnicas como PSM y DiD.	Afecta la validez de los resultados.	Imbens & Wooldridge, 2009
	Falta de información precisa	Limitaciones en la evaluación de los efectos en los ecosistemas, especialmente en agricultura intensiva.	Dificultades en el análisis de sostenibilidad.	Morris et al. (2009)
	Escasez de datos económicos	Dificultad para analizar la rentabilidad de prácticas agrícolas en comunidades rurales.	Complica la evaluación de políticas agrícolas.	Ravallion, 2001
Heterogeneidad de Efectos	Insuficiencia de datos sociales	Dificultades para evaluar el impacto en la comunidad, como la generación de empleo y cohesión social.	Afecta la comprensión de las dinámicas sociales.	Heckman et al., 1997
	Variación de efectos según contexto	Los efectos de la producción agrícola varían según ubicación y prácticas, lo que sugiere políticas específicas.	Necesidad de adaptación de políticas a contextos locales.	Deaton, 2010
	Diferencias en rentabilidad	La rentabilidad de la producción puede diferir entre pequeños y grandes productores.	Requiere análisis desagregado para conclusiones precisas.	Banerjee & Duflo, 2011
	Beneficios desiguales entre segmentos poblacionales	Las intervenciones pueden beneficiar a algunos segmentos de la población más que a otros.	Importante para comprender las dinámicas de inclusión/exclusión.	Morris et al. (2009)

Fuente: Elaboración propia

2.1.3 Economía Circular

En términos históricos, la economía circular no surge como un concepto aislado, sino como resultado de la convergencia de diversas corrientes teóricas relacionadas con la economía ambiental y la ecología industrial. En particular, la ecología industrial aportó una visión clave al cuestionar los sistemas de producción lineales y proponer esquemas basados en flujos cerrados de materiales y energía (Erkman, 2003; Frosch, 1992).

Desde esta perspectiva, se plantea que los sistemas industriales pueden reorganizarse de manera similar a los ecosistemas naturales, donde los residuos de un proceso se integran como insumos de otro, reduciendo la generación de desechos y optimizando el uso de recursos. Este enfoque marcó un cambio importante respecto a los modelos tradicionales de producción (Frosch, 1992). Posteriormente, autores como Stahel (2010) introducen el concepto de economía del rendimiento, en el cual el valor no se centra en la propiedad del bien, sino en su uso y durabilidad, lo que refuerza la idea de ciclos cerrados de producción y consumo.

En una etapa posterior Pearce & Turner (1990) formalizan el concepto de economía circular al analizar la relación entre economía y medio ambiente desde una lógica sistémica, destacando que el funcionamiento de los sistemas naturales se basa en ciclos continuos donde no existe el concepto de residuo como tal. Este planteamiento se refuerza con los aportes de la termodinámica económica, particularmente a partir de Boulding (1996) y Georgescu - Roegen, (1971), incorporan el concepto de entropía para explicar las limitaciones físicas del sistema económico.

En décadas más recientes, la economía circular ha sido enriquecida por enfoques como la biomímesis, la economía azul y el modelo “cradle to cradle”. Estos enfoques comparten la idea central de imitar los procesos de la naturaleza para diseñar sistemas productivos más eficientes y regenerativos (Benyus, 1997; McDonough-Braungart, 2022; Pauli, 2011).

En particular, el enfoque cradle to cradle distingue entre ciclos biológicos y técnicos, donde los materiales deben ser diseñados para regresar de manera segura al sistema natural o ser reutilizados de forma continua en procesos industriales, reduciendo así la pérdida de valor de los recursos.

De manera paralela, la economía circular ha sido incorporada en la agenda global de sostenibilidad, especialmente a través de su vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y políticas como el Pacto Verde Europeo. En este contexto, se reconoce su potencial para reducir emisiones, optimizar recursos y mejorar la resiliencia de los sistemas productivos (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Finalmente, la economía circular se posiciona como una alternativa al modelo lineal tradicional basado en la lógica de “extraer–producir–desechar”, proponiendo en su lugar sistemas regenerativos orientados al cierre de ciclos materiales. Su relevancia actual radica no solo en su dimensión ambiental, sino también en sus implicaciones económicas y productivas, particularmente en sectores intensivos en recursos como la agricultura.

2.2 Marco de referencia

2.2.1 Producción mundial de berries

México ocupa posiciones destacadas en la producción mundial de berries. En arándano, se ubica en el sexto lugar, con una contribución del 3.7% al volumen global, siendo Estados Unidos el principal productor. En frambuesa, ocupa el segundo lugar, con un 18.3% del volumen global, con Rusia como líder. En fresa, México se encuentra en el quinto lugar, representando el 5.9% de la producción mundial, con China a la cabeza. Finalmente, en zarzamora, México se posiciona en el primer lugar, con una contribución del 21.8%, consolidándose como el mayor productor mundial.

Este panorama refleja la competitividad de México en el mercado global de berries, destacándose especialmente en zarzamora, donde ocupa el primer lugar mundial (Figura 2).

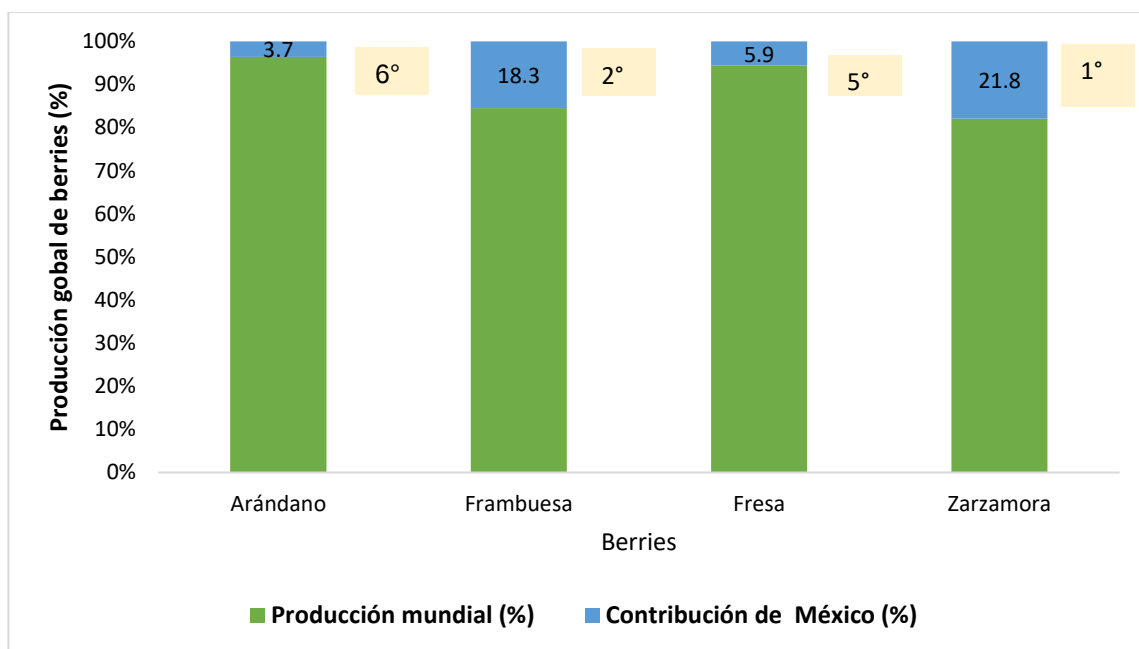


Figura 2. Producción global de berries (%)

Fuente: SIAP, 2024

2.2.2 Producción nacional de berries

La producción nacional de berries en México ha mostrado un crecimiento notable durante el periodo 2010–2023, consolidándose como un sector estratégico para la exportación. En 2023, la producción de fresa alcanzó 642 mil toneladas, lo que representa un incremento del 11% respecto al año anterior y 61 mil toneladas por encima del promedio de la última década. La frambuesa registró una producción de 190 mil toneladas, con un aumento del 6.6% en comparación con 2022 y una tasa media de crecimiento anual del 20.5% durante los últimos diez años.

En arándano, por su parte, alcanzó una producción de 80 mil toneladas en 2023, lo que representa un incremento del 19.9% respecto al año previo y una tasa media de crecimiento anual del 18.0% en la última década. Finalmente, la zarzamora alcanzó 238 mil toneladas, con un aumento del 7% frente a 2022 y un 4.8% superior al promedio decenal. Estos resultados (Figura 3), destacan el dinamismo del sector de berries, que se ha consolidado como un pilar clave para la diversificación y fortalecimiento de la producción agrícola nacional.

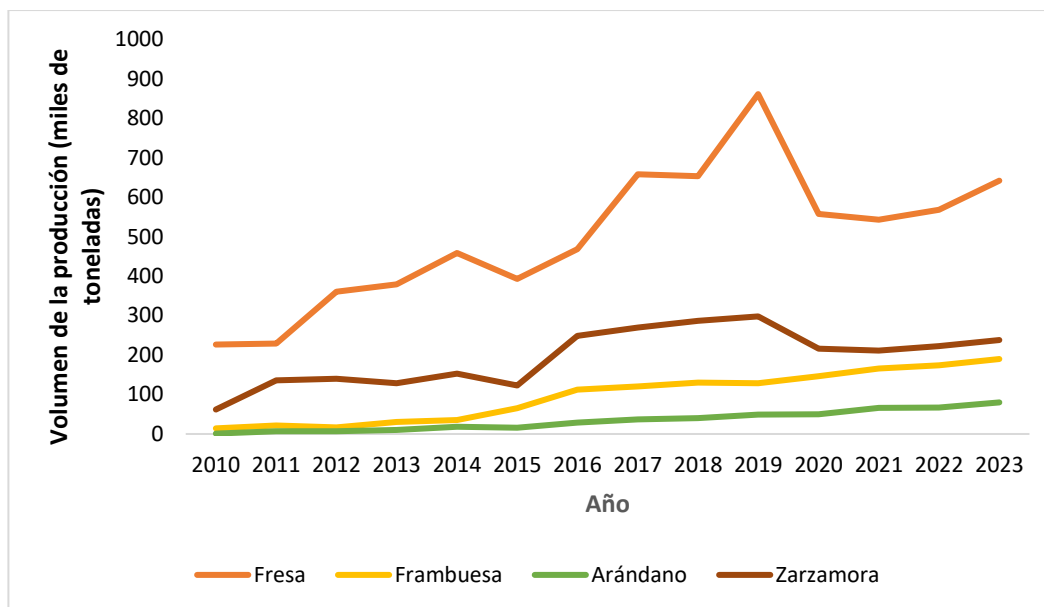


Figura 3. Volumen de la producción nacional (miles de toneladas)

Fuente: SIAP, 2024

2.2.3 Exportaciones de berries

Entre 2010 y 2023, México se consolidó como uno de los principales exportadores de berries a nivel global, con un crecimiento notable en las exportaciones de fresa, frambuesa, zarzamora y arándano. Las exportaciones de fresa aumentaron de 511 a 1,220 millones de dólares, mientras que la frambuesa aumentó de 508 a 1,314 millones de dólares en el mismo periodo (SIAP, 2024).

Por su parte, las exportaciones de arándano pasaron de 121 a 649 millones de dólares, y las de la zarzamora ascendieron de 280 a 754 millones. Este incremento sostenido (Figura 4) refleja la competitividad de México en el mercado global, respaldada por la calidad del producto, la adopción de tecnología en los procesos productivos y estrategias comerciales efectivas que lo posicionan como un actor clave en el comercio agrícola internacional.

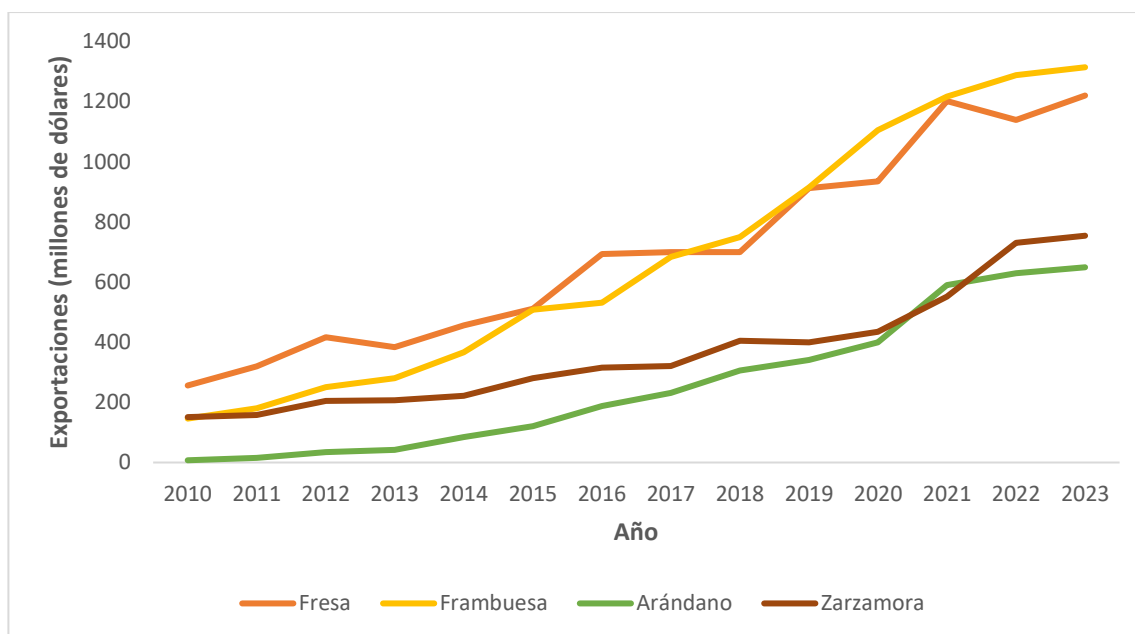


Figura 4. Exportaciones (millones de dólares)
Fuente: SIAP, 2024

2.2.4 Producción por Entidad Federativa

La producción de berries en México está altamente concentrada en ciertas regiones, lo que refleja el liderazgo de algunos estados en el ámbito nacional. En el caso de la fresa, Michoacán aportó el 58.7% del valor total de la producción nacional. En frambuesa, Jalisco se consolidó como el principal productor del país. Por su parte, Jalisco también lideró la producción de arándano. En el caso de la zarzamora, los municipios de Los Reyes, Peribán, Tocumbo y Tacámbaro en Michoacán concentraron el 79.7% de la producción estatal, lo que refleja su relevancia en el panorama nacional (Figura 5).

Este panorama evidencia la concentración regional en la producción de berries, destacando la importancia de ciertos estados y municipios en la cadena productiva nacional.

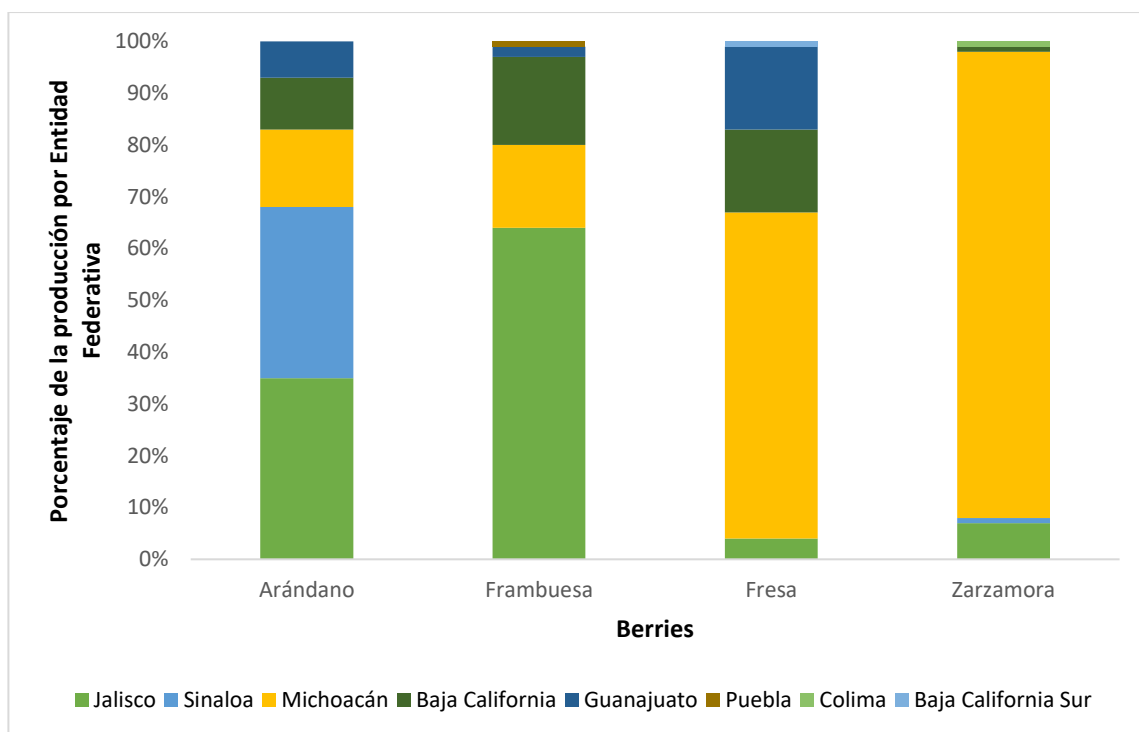


Figura 5. Porcentaje de la producción por Entidad federativa

Fuente: SIAP, 2024

2.2.5 Agricultura protegida en México

La agricultura protegida se define como aquella que se realiza bajo estructuras especializadas, como invernaderos, casa sombra y túneles, con la finalidad de disminuir las restricciones impuestas por el medio ambiente. Según datos del SIAP (2024), la región centro occidente concentra una superficie de 44,551 hectáreas lo que equivale al 47% del total nacional.

En términos estatales, Michoacán se posiciona como la entidad con mayor extensión destinada a la agricultura protegida, destacando los municipios de Zamora y Chilchota (Figura 6). Estos datos subrayan la relevancia de la región en la adopción de tecnologías agrícolas avanzadas para mejorar la productividad y enfrentar los retos ambientales.



Figura 6. Superficie por entidad de la región Centro occidente

Fuente: SIAP, 2024

Literatura citada

- Aghion, P., & Howitt, P. (2009). *The Economics of Growth*. MIT Press.
- Baker, J., & McLachlan, W. (2021). *Impact assessment and project appraisal* (2nd ed.). Routledge.
- Banerjee, A., & Duflo, E. (2011). *Poor Economics: A radical rethinking of the way to fight global poverty*. PublicAffairs.
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*.
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2003). *Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press.
- Boulding, K. E. (1996). The economics of the coming spaceship earth. *Resources for the Future*, 3–14.
- Campbell, B. (2022). *Climate change impacts and adaptation options in the agrifood system*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0425en>
- Canter, L. . (1996). *Environmental impact assessment*. McGraw-Hill.
- Chataut, G., Bhatta, B., Joshi, D., Subedi, K., & Kafle, K. (2023). Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11(100533). <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100533>

- Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & Van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Daly, H. E. (1996). *Beyond growth: The economics of sustainable development*. Beacon Press.
- Damalas, C. A., & Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide Exposure, Safety Issues, and Risk Assessment Indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), 1402–1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>
- Deaton, A. (2010). Understanding the mechanisms of economic development. *Journal of Economic Perspectives*, 24(3), 3–16. <https://doi.org/10.1257/jep.24.3.3>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition* (Vol. 1). <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>
- EPA. (2023). *Principles of Environmental Impact Assessment*.
- Erkman, S. (2003). Industrial ecology: An historical view. *Journal of Cleaner Production*, 5, 1–10.
- Ferreira, C. S. S., Soares, P. R., Guilherme, R., Vitali, G., Boulet, A., Harrison, M. T., Malamiri, H., Duarte, A. C., Kalantari, Z., & Ferreira, A. J. D. (2024). Sustainable Water Management in Horticulture: Problems, Premises, and Promises. *Horticulturae*, 10(951). <https://doi.org/10.3390/horticulturae1009095>
- Fischer-Kowalski, M., & Haberl, H. (2007). *Socioecological transitions and global change: Trajectories of social metabolism and land use*.
- Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press.
- Frosch, R. A. (1992). Industrial ecology: a philosophical introduction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89(3), 800–803. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.3.800>
- Georgescu Roegen, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press.
- Glasson, J., Therivel, R., & Chadwick, A. (2013). *Introduction to environmental impact assessment* (4th ed.). Routledge.

- Gliessman, S. R. (2014). *Agroecology: The ecology of sustainable food systems* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17881>
- Grover, D., Mishra, A. K., Rani, P., Kalonia, N., Chaudhary, A., & Sharma, S. (2024). Soil Management in Sustainable Agriculture: Principles and Techniques. In P. Kumar & Aishwarya (Eds.), *Technological Approaches for Climate Smart Agriculture*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-52708-1>
- Heckman, J. J., Ichimura, H., & Todd, P. E. (1997). Matching As An Econometric Evaluation Estimator: Evidence from Evaluating a Job Training Programme. *The Review of Economic Studies*, 64(4), 605–654. <https://doi.org/10.2307/2971733>
- Heckman, J. J., & Vytlačil, E. J. (2007). Chapter 70 Econometric Evaluation of Social Programs, Part I: Causal Models, Structural Models and Econometric Policy Evaluation. *Handbook of Econometrics* (pp. 4779–4874). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1573-4412\(07\)06070](https://doi.org/10.1016/S1573-4412(07)06070)
- Holling, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 4(5), 390–405.
- Imbens, G. W., & Wooldridge, J. M. (2009). Recent Developments in the Econometrics of Program Evaluation. *Journal of Economic Literature*, 47(1), 5–86. <https://doi.org/10.1257/jel.47.1.5>
- ISO. (2006). ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. *International Organization for Standardization*. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Krugman, P. R. (1991). *Geography and trade*. MIT Press.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (1988).
- Little, I. M. D., & Mirrlees, J. A. (1974). *Project appraisal and planning for developing countries*. Heinemann Educational.
- McDonough-Braungart. (2022). *Design Chemistry*. How to Get C2c Certified; MBDC. <https://mbdc.com/about-mbdc/>
- Montgomery, D. R. (2012). *Dirt: The erosion of civilizations*. University of California Press.
- Murawska, A., & Goryńska-Goldmann, E. (2023). Greenhouse Gas Emissions in the Agricultural and Industrial Sectors—Change Trends, Economic Conditions, and Country Classification: Evidence from the European Union. *Agriculture*, 13(1354). <https://doi.org/10.3390/agriculture13071354>

- Pauli, G. (2011). *La economía azul: 10 años, 100 innovaciones, 100 millones de empleos: Un informe para el club de Roma*.
- Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1990). *Economics of natural resources and the environment*. Johns Hopkins University Press.
- Pimentel, D. (2005). Environmental and Economic Costs of the Application of Pesticides Primarily in the United States. *Environment, Development and Sustainability*, 7(2), 229–252. <https://doi.org/10.1007/s10668-005-7314-2>
- Postel, S. L., & Carpenter, S. R. (1997). Freshwater ecosystem services. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems* (pp. 195–214). Island Press.
- Rauscher, S. A., Coppola, E., Piani, C., & Giorgi, F. (2010). Resolution effects on regional climate model simulations of seasonal precipitation over Europe. *Climate Dynamics*, 35(4), 685–711. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0607-7>
- Ravallion, M. (2001). Growth, Inequality and Poverty: Looking Beyond Averages. *World Development*, 29(11), 1803–1815. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(01\)00072-9](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(01)00072-9)
- Ridzuan, N. H. A. M., Marwan, N. F., Khalid, N., Ali, M. H., & Tseng, M.-L. (2020). Effects of agriculture, renewable energy, and economic growth on carbon dioxide emissions: Evidence of the environmental Kuznets curve. *Resources, Conservation and Recycling*, 160(January), 104879. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104879>
- Rostow, W. (1960). *Las etapas del crecimiento económico: Un manifiesto no comunista*. Fondo de Cultura Económica.
- Sen, A. (1999). *Development as freedom*. Knopf.
- SIAP. (2024). *Panorama agroalimentario*.
- SIAP. (2025). *Panorama Agroalimentario 2025*. In *Panorama Agroalimentario*.
- Solow, R. M. (1974). The economics of resources or the resources of economics. *The American Economic Review*, 64(2), 1–14.
- Stahel, W. R. (2010). *The performance Economy* (2nd ed.). Palgrave Macmillan. https://www.globe-eu.org/wp-content/uploads/THE_PERFORMANCE_ECONOMY1.pdf
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671–677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>

- Vásquez-Ibarra, L., Iriarte, A., Rebolledo-Leiva, R., Vásquez, M., Angulo-Meza, L., & González-Araya, M. C. (2021). Considering the influence of the variability in management practices on the environmental impacts of fruit production: A case study on raspberry production in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 313(May), 127609. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127609>
- WCED. (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press.
- Weiss, C. H. (1998). *Evaluation: Methods for studying programs and policies*. Prentice Hall.
- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., & Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, 12(2501). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>

CAPÍTULO 3. IMPACTOS AMBIENTALES - ECONÓMICOS DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN

Dulce Esmeralda Almaraz-Ruiz¹, María Isabel Palacios-Rangel²

RESUMEN

La variabilidad climática y demanda mundial de alimentos, en conjunto con el crecimiento poblacional y presión sobre los recursos naturales, evidencia la necesidad de la transición hacia sistemas agrícolas sostenibles y con ello el análisis de los impactos ambientales y económicos del sector agrícola. Así, el objetivo fue analizar el estado actual del conocimiento sobre los impactos ambientales y económicos del proceso productivo agrícola, mediante un análisis bibliométrico con metadatos del repositorio Scopus sistematizados en VOSviewer y Bibliometrix (R), con la finalidad de identificar las tendencias de investigación. Los resultados reflejan que, la producción científica presenta un incremento notable a partir de 2018, con un interés centrado en líneas de investigación como sostenibilidad e impactos ambientales, bioenergía y control de emisiones, y economía circular, es decir, el abordaje del tema ha evolucionado desde la medición de impactos hacia enfoques orientados a la mitigación climática, la eficiencia en el uso de recursos y el cierre de ciclos materiales en los sistemas agroalimentarios. Se concluye que, se trata de un campo en consolidación, con oportunidades para profundizar en la articulación entre sostenibilidad ambiental, viabilidad económica y modelos productivos resilientes.

Palabras clave: Cambio climático, sector agrícola, impactos ambientales, sostenibilidad, bibliometría.

¹ Centro de Investigaciones Económicas Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. (CIESTAAM). Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carretera México-Texcoco. CP 56230. Chapingo, Estado de México. ORCID: 0009-0001-4014-360X. Dirección de correo electrónico: dulce.almaraz@ciestaam.edu.mx

² Centro de Investigaciones Económicas Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. (CIESTAAM). Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carretera México-Texcoco. CP 56230. Chapingo, Estado de México. ORCID: 0000-0001-9382-863X. Dirección de correo electrónico: marisa@ciestaam.edu.mx

ABSTRACT

Climate variability and global food demand, combined with population growth and pressure on natural resources, underscore the need for a transition to sustainable agricultural systems and, consequently, for an analysis of the environmental and economic impacts of the agricultural sector. Thus, the objective was to analyze the current state of knowledge regarding the environmental and economic impacts of the agricultural production process through a bibliometric analysis using metadata from the Scopus repository organized in VOSviewer and Bibliometrix (R), with the aim of identifying research trends. The results show that scientific output has increased significantly since 2018, with a focus on research areas such as sustainability and environmental impacts, bioenergy and emissions control, and the circular economy; that is, the approach to the topic has evolved from measuring impacts toward approaches focused on climate mitigation, resource efficiency, and closing material cycles in agri-food systems. It is concluded that this is a field in the process of consolidation, with opportunities to deepen the integration of environmental sustainability, economic viability, and resilient production models.

Keywords:

Climate change, agricultural sector, environmental impacts, sustainability, bibliometrics.

1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática reflejada en los cambios en la precipitación y frecuencia de eventos extremos, junto con el crecimiento poblacional proyectado en 9.7 mil millones de habitantes hacia 2050, con una demanda de alimentos aumentada en un 70%, incrementan la presión sobre los sistemas agroalimentarios y constituyen un factor determinante del rendimiento agrícola y la estabilidad productiva (IPCC, 2021; FAO, 2023), lo que se traduce en la necesidad de transitar hacia modelos agrícolas sostenibles (Myhre et al., 2019; Rabbi & Amin, 2024).

La agricultura representa un sector estratégico para la economía y seguridad alimentaria mundial, al generar aproximadamente 3.8 billones de dólares en valor agregado, aportar el 4% del PIB global y emplear el 26% de la fuerza laboral mundial (FAO, 2024). En el caso específico de México, su relevancia económica reside en el hecho de que contribuye con el 3.8 % del Producto Interno Bruto (PIB) (Banco Mundial, 2024; INEGI, 2024).

En función de su dependencia de insumos externos o de procesos ecológicos, el sector distingue dos modelos productivos, mismos que pueden ser extensivos, basados en procesos ecosistémicos como la polinización, regulación biológica de plagas y nutrientes, etc., (Costanza et al., 1997; Klein et al., 2007) o intensivos caracterizados por una alta productividad por unidad de superficie y sustentados en insumos externos como pesticidas y fertilizantes sintéticos, con impactos adversos sobre la biodiversidad y degradación del (Bakhshandeh et al., 2017).

La agricultura protegida como parte del modelo intensivo, cobra relevancia por incrementar la productividad mediante tecnologías y ambientes controlados, especialmente en cultivos como las berries, pese a las presiones sobre el suelo y agua (Brackin et al., 2017; Brown et al., 2010; Zoltán-Pék et al., 2024). Lo anterior, origina procesos globales de contaminación y deterioro, por ello, comienza a incorporar prácticas orientadas a la sostenibilidad con el manejo ecológico de insumos y eficiencia en el uso de recursos (Abler, 2015; Lederer et al., 2017).

Mejorar la productividad demanda prácticas que mantengan o incrementen los rendimientos con menores impactos ambientales (Gibbons et al., 2014). Por ello, la intensificación ecológica propone aprovechar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en sustitución de insumos externos (Bommarco et al., 2013); sin embargo, su adopción es limitada por la percepción de riesgo, la falta de información integrada, la complejidad de los agroecosistemas y la escasa capacitación técnica (Haruvy et al., 1997; Han & Zhao, 2009; Kleijn et al., 2019).

En este contexto, se requiere de enfoques analíticos que permitan integrar la evidencia científica disponible, ya que, la literatura sobre la temática es dispersa y dificulta la identificación de redes investigación, vacíos de conocimiento y tendencias. El análisis bibliométrico representa una herramienta útil para examinar dicha evidencia y con ello orientar la generación de conocimiento y diseño de estrategias para transitar hacia sistemas agrícolas sostenibles que garanticen la seguridad alimentaria (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Hew & Lo, 2018; Mohadab et al., 2020).

Con base en los elementos anteriores y la urgencia de alternativas productivas equilibradas, el objetivo de esta investigación fue analizar el estado actual del conocimiento sobre los impactos ambientales y económicos del proceso productivo agrícola, mediante un análisis bibliométrico, con el fin de identificar tendencias de investigación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de solventar el objetivo propuesto, el estudio se organizó en dos etapas: la primera incluyó la recopilación de información necesaria y en la segunda etapa se procedió a su análisis con herramientas y técnicas bibliométricas

Recopilación y origen de la información

Se realizó una búsqueda de información en el repositorio Scopus, por ser una de las bases de datos más relevantes para la producción científica internacional (Forliano et al., 2021), considerando artículos publicados entre 2007 y 2024, y los criterios de inclusión y exclusión detallados en el Cuadro 3. La estrategia de búsqueda se realizó en noviembre de 2025, basada en palabras clave, sinónimos y traducciones al inglés, permitiendo recuperar 178 artículos, mediante la ecuación siguiente.

Cuadro 3. Estrategia de búsqueda en Scopus.

Estrategia de búsqueda	Criterios de inclusión	Criterio de exclusión
(TITLE-ABS-KEY ("environmental impact OR "environmental deterioration" OR "environmental impact assessment") OR TITLE-ABS-KEY ("economic impact" OR "Economic evaluation" OR "Economic analysis") AND TITLE-ABS-KEY ("Circular economy" OR bioeconomy) AND TITLE-ABS-KEY ("Value chain") OR TITLE-ABS-KEY ("agricultural sector" OR agriculture OR "agricultural production" OR "food production")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "art") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"AGRI") OR LIMIT-TO(SUBJAREA,"SOCI")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English"))	Tipo de documentos: artículos científicos	Áreas de conocimiento: energía, química, psicología, neurociencia

Fuente: Elaboración propia.

Sistematización de la información

Los documentos obtenidos de Scopus se exportaron en formato CSV y se analizaron mediante el software VOSViewer y el paquete Bibliometrix de R (Van

Eck & Waltman, 2010; Pacheco-Almaraz et al., 2021), examinando los indicadores del Cuadro 4, que consideran aspectos de estructura, evolución e impacto de la producción académica (Cooper, 2015). Del mismo modo, con la técnica de co-ocurrencia se generaron clústeres temáticos para visualizar las relaciones entre términos y definir las redes de investigación.

Cuadro 4. Indicadores bibliométricos empleados.

Tipo de indicador	Indicador	Descripción	Software
Productividad	1.- Artículos publicados	Indica el número de artículos publicados en el periodo de 2007-2024	Excel
	2.- Autores por documento	Refiere al número de autores que participan en un artículo	Excel
	3.- Redes de investigación (co - ocurrencia)	Muestra un panorama de la colaboración que existe entre investigadores que abordan el tema de interés. Refleja el interés científico.	Vosviewer
Relacionales o estructurales	4.- Evolución del abordaje del tema	Cómo ha cambiado la forma en que se investiga y se ha trabajado la temática	Vosviewer
	5.- Colaboración entre países-instituciones-autores	Establece las relaciones de colaboración entre distintos países, autores y centros de investigación	R Studio
	6.- Tendencias de investigación	Hacia donde se dirigen el interés científico en torno al tema	R Studio

Fuente: Elaboración propia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Artículos publicados

Para el período comprendido de análisis, se identificaron 178 artículos y 778 autores. Sin embargo, el periodo que concentra la mayor parte de la producción científica corresponde entre 2018-2024, con 149 artículos publicados (83%), lo que refleja un interés reciente en el abordaje del tema. Lo anterior coincide con el auge de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), que impulsaron

investigaciones relacionadas con la sostenibilidad (Figura 7). En conjunto se observa una creciente consolidación del tema dentro de la agenda científica internacional.

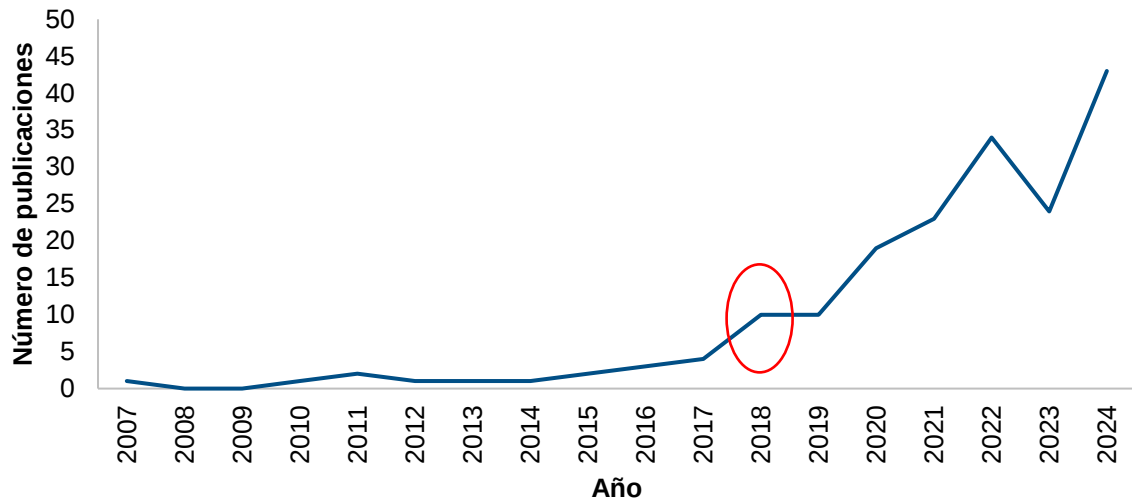


Figura 7. Evolución del número de publicaciones que analizan la temática de interés.

Fuente: Elaboración propia.

El incremento en la producción científica en la temática de interés puede responder a la necesidad de orientar la investigación hacia problemáticas vinculadas con la sostenibilidad ambiental y gestión de recursos naturales, temas centrales de los ODS. De acuerdo con Elsevier (2020) y ONU (2015), los ODS constituyen un marco internacional que impulsa la generación de conocimiento orientado a la toma de decisiones para el desarrollo sostenible.

Autores por documento

En los últimos seis años se observa una mayor colaboración entre investigadores. El número promedio de autores por artículo aumentó de 3.6 en el periodo 2007-2012, a 4.0 en 2013-2018 y 5.0 en 2019-2024, lo que evidencia un fortalecimiento de las redes de coautoría en la generación de conocimiento sobre los impactos ambientales y económicos del sector agrícola. Este patrón refleja una mayor articulación entre instituciones, países e investigadores para generar conocimiento sobre la sostenibilidad del sector (Figura 8) (Donthu et al., 2021).

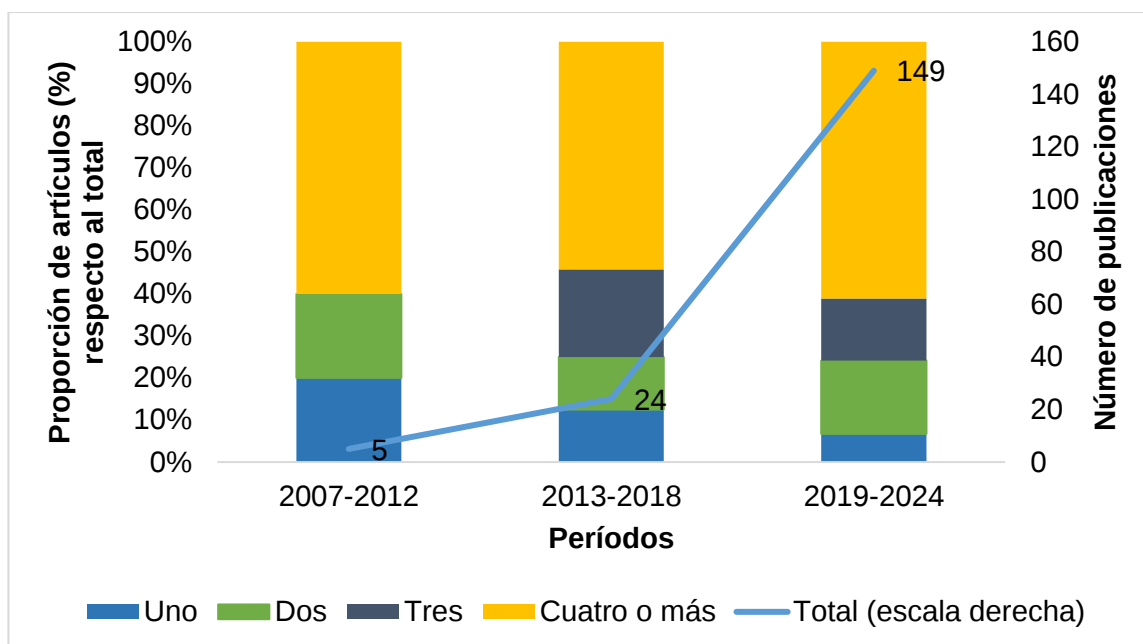


Figura 8. Colaboración en base al número de autores por publicación.
Fuente: Elaboración propia.

La tendencia anterior, puede explicarse por la naturaleza multidisciplinaria de los problemas asociados con la sostenibilidad agrícola, incluyendo perspectivas económicas, agronómicas, ambientales, ecológicas y de políticas públicas. Este hecho contribuye en el intercambio y fortalecimiento de datos, enfoques metodológicos y analíticos para el abordaje de problemáticas relacionadas con la producción agropecuaria. Así, la cooperación científica posibilita la integración de enfoques en estas áreas de investigación que demandan

Redes de investigación (Co-ocurrencia)

Se identificaron tres líneas de investigación relacionadas con aspectos de sostenibilidad e impacto ambiental (color verde), bioenergía y control de emisiones (color rojo) y Economía circular (color azul). Dichas líneas demuestran que los estudios sobre los impactos ambientales y económicos en el sector agrícola, se han diversificado en cuanto a enfoques temáticos (Figura 9).

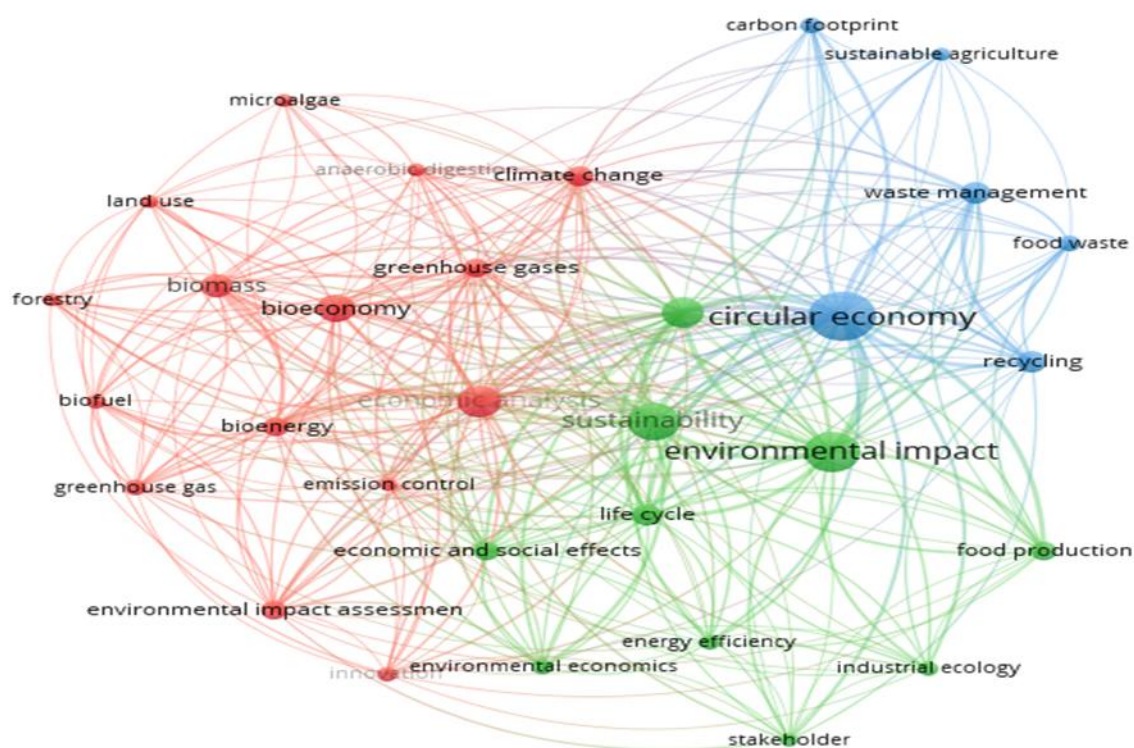


Figura 9. Mapa bibliométrico de la red de co-ocurrencias.

Fuente: Elaboración propia.

Sostenibilidad e impacto ambiental (color verde): caracterizado por términos como “Producción de alimentos”, “Ecología Industrial” y “Ciclo de Vida”. Este grupo analiza la transición de modelos lineales hacia esquemas circulares mediante herramientas como el análisis de Ciclo de Vida y el Costo del Ciclo de Vida (Bigano et al. 2016; Cristóbal et al. 2016; Mathews & Tan, 2011). Enfatiza en la valorización de residuos y la eficiencia en el uso de recursos.

Asimismo, cuantifican impactos del calentamiento global y la eutrofización, integrando dimensiones económicas y regulatorias (Martin et al. 2018; Mattila et al. 2018; y Molina-Moreno et al. 2017). En menor medida vinculan la sostenibilidad ambiental con la competitividad productiva y adaptación climática (Reinales et al. 2020; Cappelli & Cini, 2021; y Panza et al. 2023).

Bioenergía y control de emisiones (color rojo): grupo basado en términos como “Gases de Efecto Invernadero”, “Cambio Climático” y “Uso de la Tierra”. Muestran interés por la mitigación climática y los efectos territoriales de la

bioeconomía. Destacan temas como la competencia por el suelo, asociada al desarrollo de biocombustibles y plantaciones energéticas (Hertel et al. 2013; y Englund et al. 2020), con el uso de modelos macroeconómicos y matrices insumo-producto, para analizar impactos económicos y focos de emisión dentro de las cadenas agroalimentarias (Van Meijl et al. 2018; y O'Donoghue et al. (2019).

Otros estudios examinan la gestión de biomasa residual y el cierre de ciclos de nutrientes como estrategias para reducir emisiones (Duque-Acevedo et al. 2020; Vico et al. 2020; y Badagliacca et al. 2024). De manera general, se enfocan en el estudio de posibles sumideros de emisiones.

Economía circular (color azul): Se compone de palabras como “Gestión de residuos” “Huella de Carbono” y “Reciclaje”, reflejando la valorización de subproductos y medición del desempeño ambiental. Examina alternativas para la valorización agroindustrial en la bioeconomía (Berbel & Posadillo, 2018), la gestión eficiente de nutrientes (Mehr et al. 2018) y el desarrollo de indicadores de sostenibilidad (García-Bustamante et al. 2018).

De igual manera, destaca el uso de la huella de carbono para la evaluación de innovaciones y del comportamiento del consumidor (Yuli et al. 2019; y Lami et al. (2022), así como el estudio del reciclaje de biomasa y compuestos de alto valor agregado, priorizando así el cierre de ciclos materiales como eje central de la economía circular en el sistema agroalimentario (Løes & Adler 2019; Amran et al. 2021; Lavelli & Beccalli, 2022; y Novara et al., 2022).

Evolución en el abordaje del tema

Entre 2019 y 2020, la investigación se orientó principalmente hacia la evaluación del impacto ambiental, la economía ambiental y la eficiencia energética, evidenciando un interés en la medición del desempeño ambiental de los sistemas productivos (Figura 10). Posteriormente, entre 2019 y 2021, se fortalecieron los estudios relacionados con bioeconomía, control de emisiones y gases de efecto

invernadero, reflejando una mayor hacia estrategias de mitigación del cambio climático.

Finalmente, en el periodo 2021–2022, predominan términos economía circular, cambio climático y análisis de ciclo de vida, lo que sugiere una evolución hacia enfoques integrales orientados al cierre de ciclos materiales y a la evaluación sistemática de impactos ambientales en los sistemas agroalimentarios (Lavelli & Beccalli, 2022). Esta evolución pone en relieve una transición conceptual desde la medición de impactos hasta el diseño de modelos productivos más sostenibles.

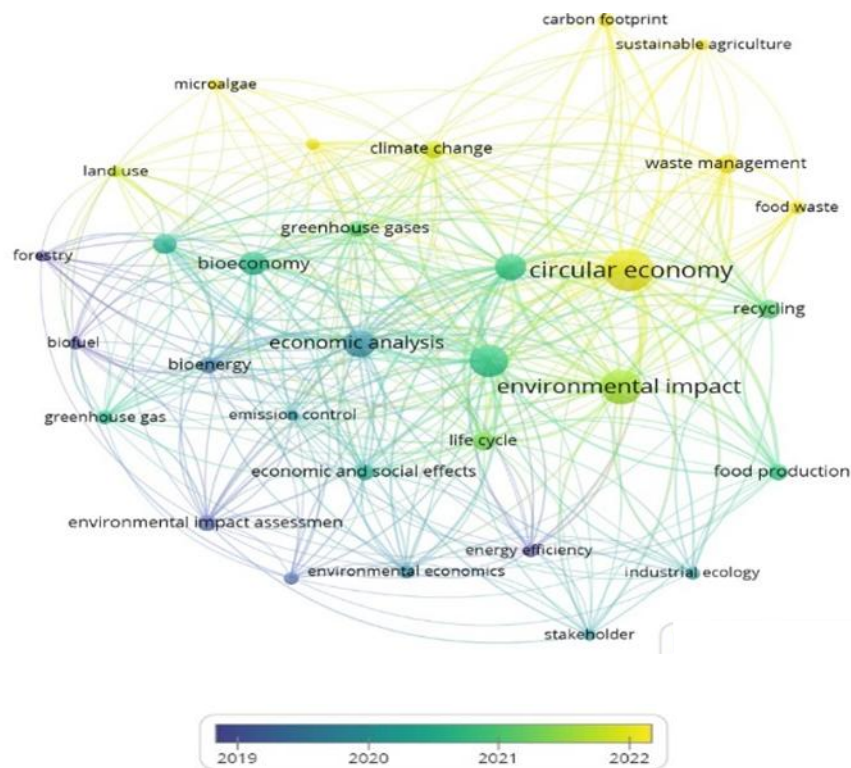


Figura 10. Evolución del abordaje de clústeres temáticos.
Fuente: Elaboración propia.

Colaboración entre países-autores-instituciones

Los países (CO) que muestran mayor colaboración científica y, por lo tanto, lideran las redes son España, Italia y Alemania. Mientras que dentro de las instituciones (UN) destaca la Universidad de Almería, la Universidad Normal de Milán, en conjunto con otros institutos especializados en ciencias ambientales y

agrícolas (Figura 11). Como líderes del listado de autores (AU) que propician estas colaboraciones se encuentran investigadores españoles, mismos que mantienen diversos vínculos de cooperación internacional.

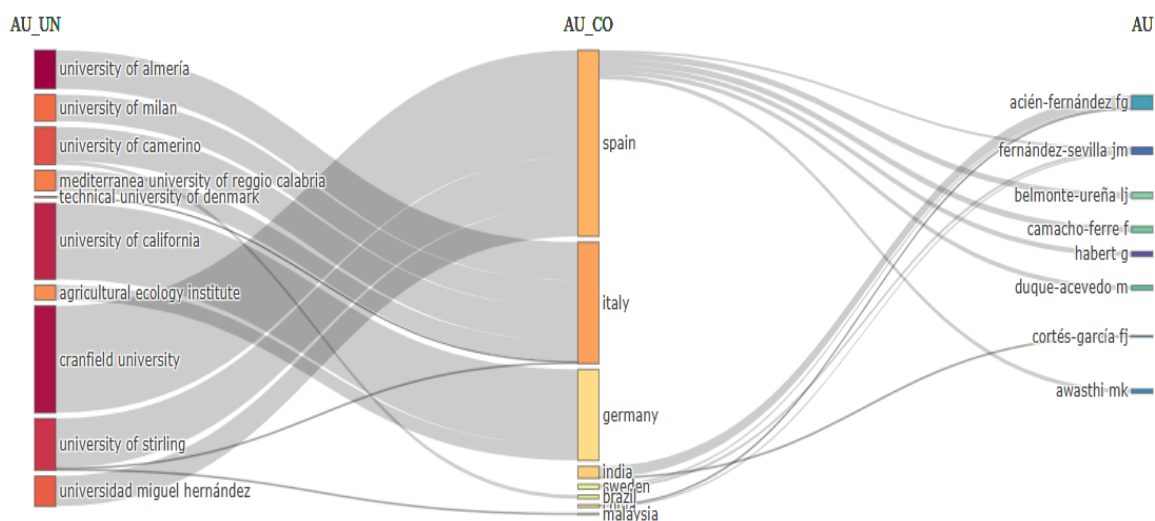


Figura 11. Redes de colaboración (países-autores-instituciones).
Fuente: Elaboración propia.

El patrón observado muestra que la investigación sobre sostenibilidad, desempeño ambiental y el análisis de los impactos económicos y ambientales derivados del sector agrícola, está impulsada por redes científicas europeas y que la cooperación institucional en conjunto con la especialización temática propicia la generación de conocimiento interdisciplinario. De manera general, estas redes favorecen la consolidación de agendas de investigación compartidas y el fortalecimiento de la difusión del conocimiento científico en el ámbito agroambiental.

Tendencias de investigación

La evolución de los términos clave usados en investigaciones asociados a los impactos ambientales y económicos en el sector agrícola, refleja un incremento en la frecuencia de conceptos como “gases de efecto invernadero”, “cambio climático”, “sostenibilidad”, “análisis de ciclo de vida” y “economía circular” (Figura 12), lo que confirma una reorientación de la investigación hacia enfoques

integrales de sostenibilidad, que contribuyen en la evaluación y mitigación de impactos ambientales de los sistemas agroalimentarios (Lavelli & Beccalli, 2022).

Es decir, se trata de un comportamiento con patrones de desplazamiento desde enfoques centrados en la caracterización económica y productiva hacia perspectivas que integran variables ambientales, productivas y tecnológicas, así como herramientas analíticas y marcos conceptuales, que orientan la transición hacia modelos productivos sostenibles.

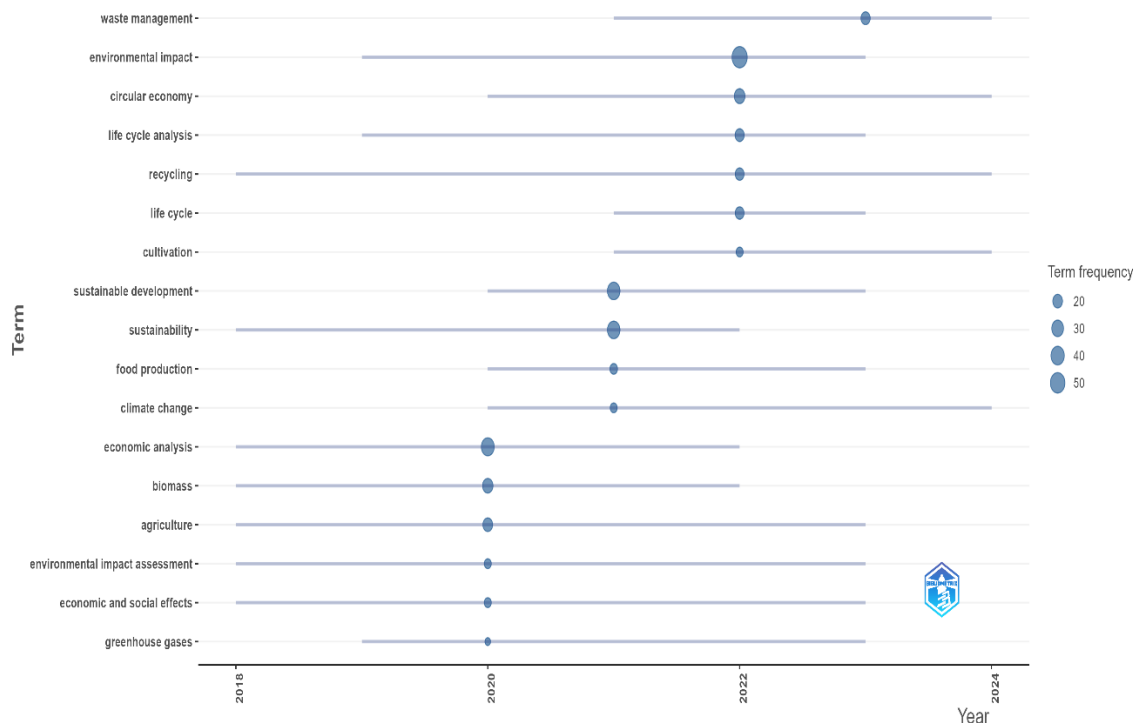


Figura 12. Evolución de términos clave de la temática de interés.

Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

El estado actual del conocimiento sobre los impactos ambientales y económicos en el sector agrícola muestra un interés científico reciente y creciente en la temática, con un mayor número de publicaciones en las últimas décadas, centradas en aspectos de sostenibilidad e impacto ambiental, bioenergía y control de emisiones, y economía circular. Las tendencias reflejan un comportamiento que pasó de la caracterización económica y productiva de

sistemas productivos, hacia perspectivas que integran herramientas analíticas y marcos conceptuales conducentes a modelos productivos sostenibles.

El análisis bibliométrico permitió sistematizar la producción científica, identificar redes de investigación y colaboración, así como la evolución temática, con resultados que dependen de la base de datos utilizada y de la ecuación de búsqueda aplicada. Pese a que Scopus ofrece registros bibliográficos estandarizados y una amplia cobertura internacional, futuras investigaciones podrían ampliar el alcance del análisis mediante la integración de bases de datos complementarias, ofreciendo una visión más amplia de la producción científica.

Se requiere profundizar en investigaciones que integren de manera conjunta los impactos ambientales y económicos de la producción agrícola, particularmente en contextos regionales y cadenas agroalimentarias específicas, donde las condiciones productivas y ambientales difieren significativamente. En ese sentido, la aplicación de herramientas como el análisis de ciclo de vida, indicadores de sostenibilidad y enfoques de economía circular, puede fortalecer evaluaciones integrales del desempeño del sector y orientar el diseño de estrategias productivas más sostenibles.

5. LITERATURA CITADA

- Abler, D. (2015). Economic evaluation of agricultural pollution control options for China. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(6), 1045–1056. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60988-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60988-6)
- Amran, M. A., Palaniveloo, K., Fauzi, R., Satar, N. M., Mohidin, T. B. M., Mohan, G., Razak, S. A., Arunasalam, M., Nagappan, T., & Sathiya Seelan, J. S. (2021). Value-added metabolites from agricultural waste and application of green extraction techniques. *Sustainability*, 13(20), 11432. <https://doi.org/10.3390/su132011432>
- Badagliacca, G., Testa, G., La Malfa, S. G., Cafaro, V., Lo Presti, E., & Monti, M. (2024). Organic fertilizers and bio-waste for sustainable soil management to support crops and control greenhouse gas emissions in Mediterranean agroecosystems: A Review. *Horticulturae*, 10(5), 427. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10050427>

- Bakhshandeh, S., Corneo, P. E., Mariotte, P., Kertesz, M. A., & Dijkstra, F. A. (2017). Effect of crop rotation on mycorrhizal colonization and wheat yield under different fertilizer treatments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 247, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.027>
- Banco Mundial. (2024). *Agriculture, forestry, and fishing, value added (% of GDP)*. <http://data.worldbank.org/indicator/NV.AGR.TOTL.ZS>
- Berbel, J., & Posadillo, A. (2018). Review and analysis of alternatives for the valorisation of agro-industrial olive oil by-products. *Sustainability* (Switzerland), 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.3390/su10010237>
- Bigano, A., Śniegocki, A., & Zotti, J. (2016). Policies for a more dematerialized EU economy. Theoretical underpinnings, political context and expected feasibility. *Sustainability*, 8(8), 717. <https://doi.org/10.3390/su8080717>
- Bommarco, R., Kleijn, D., & Potts, S. G. (2013). Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4), 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.012>
- Brackin, R., Atkinson, B., Sturrock, C., & Rasmussen, A. (2017). Roots-eye view: Using microdialysis and microCT to non-destructively map root nutrient depletion and accumulation zones. *Plant Cell Environ*, 40(12), 3135–3142. <https://doi.org/10.1111/pce.13072>
- Brown, L. E., Mitchell, G., Holden, J., Folkard, A., Wright, N., Beharry-Borg, N., Berry, G., Brierley, B., Chapman, P., & Clarke, S. J. (2010). Priority water research questions as determined by UK practitioners and policy makers. *Science of The Total Environment*, 409(2), 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.040>
- Budavári, N., Pék, Z., Helyes, L., Takács, S., & Nemeskéri, E. (2024). An Overview on the Use of Artificial Lighting for Sustainable Lettuce and Microgreens Production in an Indoor Vertical Farming System. *Horticulturae*, 10(9), 938. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090938>
- Cappelli, A., & Cini, E. (2021). Challenges and opportunities in wheat flour, pasta, bread, and bakery product production chains: A systematic review of innovations and improvement strategies to increase sustainability, productivity, and product quality. *Sustainability*, 13(5), 2608. <https://doi.org/10.3390/su13052608>
- Cooper, I. D. (2015). Bibliometrics basics. *Journal of the Medical Library Association: JMLA*, 103(4), 217–218. <https://doi.org/10.3163/1536-5050.103.4.013>
- Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton,

- P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Cristóbal, J., Matos, C. T., Aurambout, J. P., Manfredi, S., & Kavalov, B. (2016). Environmental sustainability assessment of bioeconomy value chains. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 89, pp. 159–171). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.002>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Plaza-Úbeda, J. A., & Camacho-Ferre, F. (2020). The management of agricultural waste biomass in the framework of circular economy and bioeconomy: An opportunity for greenhouse agriculture in southeast Spain. *Agronomy*, 10(4), 489. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040489>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated transition. *Journal of Industrial Ecology*, 1, 1–98. <https://doi.org/10.1596/37331>
- Elsevier. (2020). *The power of data to advance the SDGs: Mapping research to the Sustainable Development Goals*. <https://www.elsevier.com/research-intelligence/resource-library/sdg-report-2020>
- Englund, O., Börjesson, P., Berndes, G., Scarlat, N., Dallemand, J.-F., Grizzetti, B., Dimitriou, I., Mola-Yudego, B., & Fahl, F. (2020). Beneficial land use change: Strategic expansion of new biomass plantations can reduce environmental impacts from EU agriculture. *Global Environmental Change*, 60, 101990. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101990>
- FAO. (2023). El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2023. In *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2023*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc7724es>
- FAO. (2024). *FAOSTAT statistical yearbook: Global agriculture trends*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Forliano, C., De Bernardi, P., & Yahiaoui, D. (2021). Entrepreneurial universities: A bibliometric analysis within the business and management domains. *Technological Forecasting and Social Change*, 165, 120522. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120522>

- García-Bustamante, C. A., Aguilar-Rivera, N., Zepeda-Pirrón, M., & Armendáriz-Arnez, C. (2018). Development of indicators for the sustainability of the sugar industry. *Environmental and Socio-Economic Studies*, 6(4), 22–38. <https://doi.org/10.2478/environ-2018-0025>
- Gibbons, J. M., Williamson, J. C., Williams, A. P., Withers, P. J. A., Hockley, N., Harris, I. M., Hughes, J. W., Taylor, R. L., Jones, D. L., & Healey, J. R. (2014). Sustainable nutrient management at field, farm and regional level: Soil testing, nutrient budgets and the trade-off between lime application and greenhouse gas emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 188, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.02.016>
- Han, H., & Zhao, L. (2009). Farmers' character and behavior of fertilizer application -evidence from a survey of Xinxiang County, Henan province, China. *Agricultural Sciences in China*, 8(10), 1238–1245. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(08\)60334-X](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(08)60334-X)
- Haruvy, N., Hadas, A., & Hadas, A. (1997). Cost assessment of various means of averting environmental damage and groundwater contamination from nitrate seepage. *Agricultural Water Management*, 32(3), 307–320. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(96\)01268-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(96)01268-1)
- Hertel, T. W., Steinbuks, J., & Baldos, U. (2013). Competition for Land in the Global Bioeconomy. In *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2222243>
- Hew, K. F., & Lo, C. K. (2018). Flipped classroom improves student learning in health professions education: a meta-analysis. *BMC Medical Education*, 18(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s12909-018-1144-z>
- INEGI. (2024). *Producto Interno Bruto*.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: the physical science basis*. Cambridge University Press Cambridge, UK.
- ISO 14040. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. *International Organization for Standardization*, 12.
- Kirchherr, J., & Piscicelli, L. (2019). Towards an Education for the Circular Economy (ECE): Five Teaching Principles and a Case Study. *Resources, Conservation and Recycling*, 150(104406). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104406>

- Kleijn, D., Bommarco, R., Fijen, T. P. M., Garibaldi, L. A., Potts, S. G., & van der Putten, W. H. (2019). Ecological intensification: bridging the gap between science and practice. *Trends in Ecology & Evolution*, 34(2), 154–166. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.11.002>
- Klein, A.-M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1608), 303–313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>
- Lami, O., Mesías, F. J., Balas, C., Díaz-Caro, C., Escribano, M., & Horrillo, A. (2022). Does carbon footprint play a relevant role in food consumer behaviour? A focus on spanish beef. *Foods*, 11(23), 3899. <https://doi.org/10.3390/foods11233899>
- Lavelli, V., & Beccalli, M. P. (2022). Cheese whey recycling in the perspective of the circular economy: Modeling processes and the supply chain to design the involvement of the small and medium enterprises. *Trends in Food Science and Technology*, 126(June), 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.013>
- Lederer, J., Ogwang, F., & Karungi, J. (2017). Knowledge identification and creation among local stakeholders in CDM waste composting projects: A case study from Uganda. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 339–352. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.03.005>
- Løes, A. K., & Adler, S. (2019). Increased utilisation of renewable resources: dilemmas for organic agriculture. *Organic Agriculture*, 9(4), 459–469. <https://doi.org/10.1007/s13165-018-00242-2>
- Martin, M., Røyne, F., Ekvall, T., & Moberg, Å. (2018). Life cycle sustainability evaluations of bio-based value chains: Reviewing the indicators from a swedish perspective. *Sustainability*, 10(2), 547. <https://doi.org/10.3390/su10020547>
- Mathews, J. A., & Tan, H. (2011). Progress Toward a Circular Economy in China. *Journal of Industrial Ecology* (Vol. 15, Issue 3, pp. 435–457). <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00332.x>
- Mattila, T. J., Judl, J., Macombe, C., & Leskinen, P. (2018). Evaluating social sustainability of bioeconomy value chains through integrated use of local and global methods. *Biomass and Bioenergy*, 109, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.019>
- Mehr, J., Jedelhauser, M., & Binder, C. R. (2018). Transition of the swiss phosphorus system towards a circular economy—part 1: Current

- state and historical developments. *Sustainability*, 10(5), 1479. <https://doi.org/10.3390/su10051479>
- Mohadab, M. El, Bouikhalene, B., & Safi, S. (2020). Bibliometric method for mapping the state of the art of scientific production in Covid-19. *Chaos, Solitons & Fractals*, 139, 110052. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110052>
- Molina-Moreno, V., Leyva-Díaz, J., Llorens-Montes, F., & Cortés-García, F. (2017). Design of indicators of circular economy as instruments for the evaluation of sustainability and efficiency in wastewater from pig farming industry. *Water*, 9(9), 653. <https://doi.org/10.3390/w9090653>
- Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C. W., Hodnebrog, Ø., Marelle, L., Samset, B. H., Sillmann, J., Schaller, N., Fischer, E., Schulz, M., & Stohl, A. (2019). Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, 9(1), 16063. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>
- Novara, A., Sampino, S., Paternò, F., & Keesstra, S. (2022). Climate smart regenerative agriculture to produce sustainable beauty products: The case study of snail secretion filtrate (LX360®). *Sustainability*, 14(4), 2367. <https://doi.org/10.3390/su14042367>
- O'Donoghue, C., Chyzheuskaya, A., Grealis, E., Kilcline, K., Finnegan, W., Goggins, J., Hynes, S., & Ryan, M. (2019). Measuring GHG emissions across the agri-food sector value chain: The development of a bioeconomy input-output model. *International Journal on Food System Dynamics*, 10(1), 55–85. <https://doi.org/10.18461/ijfsd.v10i1.04>
- ONU. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Pacheco-Almaraz, V., Palacios-Rangel, M. I., Martínez-González, E. G., Vargas-Canales, J. M., & Ocampo-Ledesma, J. G. (2021). La especialización productiva y agrícola desde su análisis bibliométrico (1915-2019). *Revista Espanola de Documentacion Cientifica*, 44(3), 1–15. <https://doi.org/10.3989/REDC.2021.3.1764>
- Panza, L., Bruno, G., & Lombardi, F. (2023). Integrating absolute sustainability and social sustainability in the digital product passport to promote industry 5.0. *Sustainability*, 15(16), 12552. <https://doi.org/10.3390/su151612552>
- Rabbi, M. F., & Amin, M. Bin. (2024). Circular economy and sustainable practices in the food industry: A comprehensive bibliometric

analysis. *Cleaner and Responsible Consumption*, 14(March), 100206. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100206>

Reinales, D., Zambrana-Vasquez, D., & Saez-De-Guinoa, A. (2020). Social life cycle assessment of product value chains under a circular economy approach: A case study in the plastic packaging sector. *Sustainability*, 12(16), 6671. <https://doi.org/10.3390/su12166671>

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

Van Meijl, H., Tsiropoulos, I., Bartelings, H., Hoefnagels, R., Smeets, E., Tabeau, A., & Faaij, A. (2018). On the macro-economic impact of bioenergy and biochemicals – Introducing advanced bioeconomy sectors into an economic modelling framework with a case study for the Netherlands. *Biomass and Bioenergy*, 108, 381–397. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.040>

Vico, A., Sáez, J. A., Pérez-Murcia, M. D., Martínez-Tomé, J., Andreu-Rodríguez, J., Agulló, E., Bustamante, M. A., Sanz-Cobena, A., & Moral, R. (2020). Production of spinach in intensive mediterranean horticultural systems can be sustained by organic-based fertilizers without yield penalties and with low environmental impacts. *Agricultural Systems*, 178, 102765. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102765>

Yuli, M., Puig, R., Fuentes, M. A., Civancik-Uslu, D., & Capilla, M. (2019). Eco-innovation in garden irrigation tools and carbon footprint assessment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(7), 2937–2950. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1937-y>

ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF RASPBERRY PRODUCTION IN PUEBLA, FROM A LIFE CYCLE ASSESSMENT PERSPECTIVE

CAPÍTULO 4. DESEMPEÑO AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE FRAMBUESA EN PUEBLA, DESDE EL ENFOQUE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Dulce Esmeralda Almaraz-Ruiz^{3*}, María Isabel Palacios-Rangel¹, Félix Rafael Ramírez-Árpide², Jorge Aguilar-Ávila¹

ABSTACT

Raspberry production under protected agriculture is an alternative for increasing productivity; however, information on its environmental performance in Mexico is limited. The objective of this study was to evaluate the environmental performance of three representative raspberry (*Rubus idaeus* L.) units in Huejotzingo, Puebla, using Life Cycle Assessment (LCA). The case studies were selected through a cluster analysis of 83 producers and evaluated using a cradle-to-gate approach. The functional unit was 1 kg of field-packed raspberries. The categories analyzed were global warming potential, terrestrial acidification, freshwater eutrophication, terrestrial ecotoxicity, and water consumption. The results showed that the unit with the lowest productivity had the greatest environmental impacts, while those with the highest yields recorded lower impacts per kilogram of fruit due to the amortization effect of the infrastructure. The contribution analysis revealed that the macro-tunnel infrastructure was the main critical point in the system with the lowest productivity, while processes associated with the fertigation system

¹ Centro de Investigaciones Económicas Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. (CIESTAAM). Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carretera México-Texcoco. CP 56230. Chapingo, Estado de México. México. ORCID: 0009-0001-4014-360X. *Autor de correspondencia: dulce.almaraz@ciestaam.edu.mx

² Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria. (PCyTA). Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carretera México-Texcoco. CP 56230. Chapingo, Estado de México. México.

became more significant as yield increased. These results provide evidence to guide strategies for environmental improvement in raspberry production systems.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), climate change, sustainability, environmental impact, protected agriculture.

RESUMEN

La producción de frambuesa bajo agricultura protegida representa una alternativa para incrementar la productividad; sin embargo, existe información limitada sobre su desempeño ambiental en México. El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño ambiental de tres unidades de producción representativas de frambuesa (*Rubus idaeus* L.) en Huejotzingo, Puebla, mediante Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Las unidades se seleccionaron a partir de un análisis de conglomerados realizado con información de 83 productores y se evaluaron con un enfoque de cuna a puerta, considerando como unidad funcional un kilogramo de frambuesa empacada en campo. Se analizaron cinco categorías de impacto potencial: calentamiento global, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, ecotoxicidad terrestre y consumo de agua. Los resultados mostraron una relación inversa entre productividad e impacto ambiental por unidad de producto: la unidad con menor rendimiento presentó los mayores impactos, mientras que las unidades más productivas registraron menores cargas ambientales por kilogramo de fruta, principalmente debido a la distribución de los impactos asociados con la infraestructura entre un mayor volumen de producción. El análisis de contribución identificó a la infraestructura del macrotúnel como el principal punto crítico en la unidad de menor productividad; en contraste, conforme aumentó el rendimiento, los procesos asociados al sistema de fertirriego adquirieron una mayor contribución relativa. Los resultados evidencian la importancia de considerar conjuntamente la productividad y las fuentes específicas de impacto para mejorar el desempeño ambiental de los sistemas de producción de frambuesa en agricultura protegida y proporcionan elementos para orientar estrategias de manejo dirigidas a reducir su carga ambiental por unidad de producto.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida (ACV), cambio climático, sostenibilidad, impacto ambiental, agricultura protegida.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial y el incremento de la demanda de alimentos han intensificado los desafíos relacionados con la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios (Huang et al., 2019; Laso et al., 2018). En este contexto, la agricultura desempeña un papel estratégico para garantizar la seguridad alimentaria y contribuir al desarrollo económico, pero también es una de las actividades que mayor presión ejerce sobre los recursos naturales debido a su elevado consumo de agua, energía e insumos agrícolas (Liu et al., 2022; Mousavi et al., 2023; Raffaelli et al., 2025).

La intensificación agrícola ha impulsado la incorporación de tecnologías, infraestructura e insumos agrícolas. No obstante, estas prácticas pueden incrementar la presión ambiental asociada a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la degradación del suelo, la contaminación del agua y el agotamiento de recursos naturales (Mousavi et al., 2023; Tricase et al., 2018). Por ello, la evaluación del desempeño ambiental de los sistemas agrícolas es una herramienta para identificar puntos críticos y establecer alternativas orientadas a una producción eficiente y sostenible (Girgenti et al., 2014; Mancuso et al., 2021).

En este sentido, los cultivos de alto valor comercial han experimentado una expansión debido a la demanda internacional, impulsada por sus características nutricionales, calidad y oportunidades de exportación (Durmus et al., 2025; Lopez-Corona et al., 2022; Popovic et al., 2022). Dentro de este grupo, la frambuesa destaca por su relevancia económica y por la adopción de sistemas intensivos basados en agricultura protegida, fertirriego y tecnologías orientadas a incrementar la productividad y prolongar la disponibilidad comercial del fruto (Boakye-Yiadom et al., 2025; Gaskell, 2004; Heindenreich et al., 2012).

La intensificación implica un mayor consumo de recursos e insumos, incluyendo fertilizantes, agua, energía, infraestructura y plásticos, que pueden incidir en el

desempeño ambiental del sistema productivo (Ilari et al., 2021; Licastro et al., 2025; Parajuli et al., 2022).

Sin embargo, al igual que otros sistemas intensivos de producción hortofrutícola, requiere un uso significativo de agua, fertilizantes energía y otros insumos agrícolas que pueden generar un impacto ambiental negativo relevante a lo largo de su ciclo de vida. En este contexto, evaluar estos impactos resulta fundamental para identificar oportunidades de mejora que favorezcan la sostenibilidad del sistema productivo y fortalezcan su competitividad.

El estado de Puebla representa una región productora emergente, donde la incorporación de sistemas bajo macrotúnel y fertirriego ha aumentado la productividad; no obstante, estos sistemas requieren una evaluación ambiental específica que considere las condiciones regionales de producción debido a que las prácticas de manejo, infraestructura, disponibilidad de recursos y características productivas pueden modificar la magnitud y naturaleza de las cargas ambientales asociadas al cultivo (Vásquez-Ibarra et al., 2021). Bajo este escenario, generar evidencia ambiental bajo condiciones regionales resulta necesario para identificar oportunidades de mejora y orientar estrategias de producción sostenible.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) constituye una herramienta metodológica que evalúa los efectos ambientales de productos y sistemas productivos considerando las etapas que conforman su ciclo de vida (ISO, 2006a, 2006b). Asimismo, cuantifica categorías de impacto, identifica procesos críticos y evalúa alternativas de mejora mediante un enfoque basado en flujos de entrada y salida (Cerutti et al., 2014; Fenollosa et al., 2014; Romero-Gámez & Suárez-Rey, 2020). Por esta razón, el ACV se ha consolidado como una de las metodologías más empleadas para evaluar el desempeño ambiental de los sistemas agrícolas, al permitir cuantificar los impactos asociados a todas las etapas del proceso productivo (Alhashim et al., 2021; ISO, 2006a).

Algunos estudios han aplicado el ACV para evaluar diferentes sistemas de producción de berries (Boakye-Yiadom et al., 2025; Ilari et al., 2021; Licastro et al., 2025; Mancuso et al., 2021; Parajuli et al., 2022; Romero-Gámez & Suárez-Rey, 2020). Estos trabajos identifican que los puntos críticos están asociados con el uso de fertilizantes, consumo energético, combustibles, infraestructura y manejo del agua, aunque la magnitud de la presión ambiental depende del sistema de producción, condiciones climáticas, productividad y límites del análisis (Bartzas et al., 2017; Hauck et al., 2014; Notarnicola et al., 2017; Vásquez-Ibarra et al., 2021).

A pesar del creciente número de estudios que aplican el ACV en sistemas de producción de berries, la información disponible sobre la producción de frambuesa continua siendo limitada y se concentra principalmente en Europa y Chile (Boakye-Yiadom et al., 2025; Foster et al., 2014; Licastro et al., 2025; Malefaki et al., 2025a; Rantanen et al., 2024; Vásquez-Ibarra et al., 2021).

En México, existe una marcada escasez de estudios sobre su desempeño ambiental bajo condiciones nacionales. En particular, se identifican pocos estudios que evalúen el desempeño ambiental de la frambuesa en el estado de Puebla mediante el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida. Esta ausencia de información dificulta la identificación de los procesos con mayor contribución a los impactos ambientales y limita la generación de estrategias específicas para mejorar la sostenibilidad de su cultivo.

Contar con información específica para las condiciones productivas de Puebla resulta relevante porque las características climáticas, el manejo agronómico, los insumos utilizados y las prácticas de cultivo pueden difieren significativamente de las reportadas en otras regiones. En consecuencia, extrapolar resultados obtenidos en otros contextos puede conducir a estimaciones poco representativas y limitar la formulación de recomendaciones orientadas a reducir los impactos ambientales.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el desempeño ambiental de la producción de frambuesa (*Rubus idaeus* L.) en Puebla, México, mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con el propósito de identificar los procesos críticos y los principales impactos ambientales del sistema productivo y aportar información que contribuya al diseño de estrategias de mejora para una producción más sostenible.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los impactos ambientales asociados a la producción de frambuesa (*Rubus idaeus* L.) en la región de Huejotzingo, en el estado de Puebla, México, se evaluaron mediante la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), conforme los principios y el marco metodológico establecido en las normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006a, 2006b). El ACV constituye una herramienta ampliamente reconocida para cuantificar los impactos ambientales potenciales asociados a un sistema productivo mediante el análisis de los flujos de materia y energía a lo largo de su ciclo de vida, lo que permite identificar los procesos con mayor contribución ambiental y orientar estrategias de mejora (Finnveden et al., 2009).

El estudio comprendió las cuatro fases definidas por la metodología ACV: a) definición del objetivo y alcance; b) elaboración de inventario del ciclo de vida (ICV); c) evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV), y d) interpretación de resultados. Para ello, se definieron el sistema de producción, los casos de estudio, los límites del sistema, la unidad funcional y el inventario correspondiente, los cuales posteriormente fueron modelados mediante openLCA v2.5.0 empleando la base de datos ecoinvent v3.2 para la evaluación comparativa del desempeño ambiental de tres sistemas representativos de producción de frambuesa.

Lo anterior, se realizó con el propósito de cuantificar y comparar el desempeño ambiental de tres sistemas representativos de producción de frambuesa.

2.1 Descripción del sistema de producción

La frambuesa (*Rubus idaeus* L.) constituye uno de los cultivos hortofrutícolas de mayor importancia económica dentro del sector de las berries debido a la gran demanda que presenta en el mercado mundial y nacional. En México, su expansión ha mostrado un crecimiento favorecido por condiciones agroclimáticas adecuadas, la adopción de sistemas tecnificados y al incremento sostenido de sus exportaciones, lo que ha propiciado una intensificación progresiva de los sistemas de producción (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020).

Actualmente, el país se encuentra entre los principales productores y exportadores de berries, con una producción en estados como Jalisco, Michoacán, Baja California, Guanajuato y Puebla (SIAP, 2025). En estas regiones predominan sistemas de producción intensivos caracterizados por el empleo de fertirriego, infraestructura de agricultura protegida, materiales plásticos, fertilizantes de alta solubilidad y productos fitosanitarios especializados, cuyo uso estimula la productividad, pero también aumenta el consumo de recursos naturales locales y la generación de efectos ambientales diversos. Por ello, estos sistemas representan un caso de estudio adecuado para su evaluación ambiental mediante la herramienta metodológica del Análisis de Ciclo de Vida.

2.2. Descripción de los casos de estudio

La investigación se desarrolló en unidades de producción comercial de frambuesa en el municipio de Huejotzingo, Puebla, México, región que constituye una de las principales zonas productoras del cultivo en el estado. La selección del área respondió a la presencia de unidades de producción con diferentes niveles de tecnificación y capacidad productiva, condiciones que posibilitan representar la variabilidad existente dentro del sistema regional de producción.

Con el propósito de identificar unidades representativas, se realizó un análisis de conglomerados utilizando la información correspondiente al padrón de productores activos de frambuesa del año 2023 (N=83). Se empleó el método jerárquico de Ward con distancia euclidiana al cuadrado, considerando como

variables de clasificación a tres grupos de productores con contrastes en edad, la experiencia en el cultivo, la superficie sembrada, el rendimiento y el índice de equipamiento. La selección de tres conglomerados se estableció a partir de la interpretación del dendrograma y la diferenciación estadística entre los grupos obtenidos, acorde a lo reportado por Peña (2002).

Posteriormente, se seleccionó un caso representativo por conglomerado considerando al productor cuya combinación de variables presentó el comportamiento más cercano al perfil promedio de cada grupo y que, además contaba con información completa para la elaboración del inventario del ciclo de vida. Las unidades de producción se localizaron en las coordenadas C1 (19°09'39.5"N, 98°25'42.6"W), C2 (19°08'09.5"N, 98°24'51.9"W) y C3 (19°07'45.3"N, 98°29'05.7"W).

La región presenta un clima templado subhúmedo C(w2)(w), con precipitación anual de 1,165.46 mm (2024) y temperatura media mensual de 18.2 °C (Servicio Meteorológico Nacional, 2026) y predominio de suelos arenosoles (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017), condiciones que favorecen el establecimiento del cultivo.

Los sistemas productivos evaluados correspondieron a la producción bajo agricultura protegida mediante microtúneles con ventilación lateral establecidos directamente sobre el suelo, sin empleo de acolchado plástico. El manejo agronómico incluyó fertirriego, aplicación periódica de fertilizantes solubles y prácticas fitosanitarias convencionales. Las unidades C1 y C2 correspondieron a la variedad Maravilla, mientras que la unidad C3 cultivó la variedad Maravilla mejorada. Las tres plantaciones presentaban la misma edad y un manejo agronómico comparable, realizándose dos ciclos de cosecha por año.

Con el fin de homogenizar la comparación entre los casos de estudio, toda la información fue estandarizada a una superficie de una hectárea. Los rendimientos obtenidos fueron de 7.5 t/ha en C1, 10 t/ha en C2 y 12 t/ha en C3, respectivamente, considerando fruta empacada en campo. La vida útil del cultivo

se estimó en un máximo de diez años, de acuerdo con el manejo agronómico observado y con lo reportado para sistemas comerciales de producción de frambuesa (Barney et al., 2007).

La información utilizada para elaborar el inventario del ciclo de vida se obtuvo durante el ciclo agrícola 2024 mediante encuestas, entrevistas semiestructuradas y observación directa en campo. A continuación, la consistencia de la información fue verificada mediante la comparación de registros productivos, consumos reportados por los productores y observaciones realizadas durante las visitas técnicas, permitiendo recopilar datos sobre insumos agrícolas, consumo de agua, fertilización y manejo del cultivo, con el fin de asegurar la representatividad y confiabilidad de los datos empleados en la modelación ambiental.

2.3. Límites del sistema y unidad funcional

El estudio adoptó un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida de la cuna a la puerta de la explotación (*Cradle-to-farm gate*), de conformidad con las directrices establecidas en las normas ISO 14040 e ISO 14044 para la definición del objetivo y alcance del estudio (ISO, 2006a, 2006b). Este enfoque permite evaluar los impactos ambientales asociados a la producción primaria de frambuesa hasta la salida del producto de la unidad de producción, excluyendo las etapas posteriores de distribución, comercialización, consumo y disposición final.

Los límites del sistema incluyeron la producción y aplicación de insumos agrícolas, el establecimiento y operación de la infraestructura de agricultura protegida (macrotúneles), las labores de manejo del cultivo, el sistema de fertirriego, las labores culturales, el control fitosanitario, la cosecha y el empaque en campo. Asimismo, se incluyó la fabricación de los materiales que integran la infraestructura del macrotúnel, considerando su vida útil para distribuir proporcionalmente la carga ambiental entre los ciclos productivos. La incorporación de la infraestructura agrícola responde a las recomendaciones metodológicas para sistemas agrícolas intensivos, en los cuales este componente puede representar una contribución significativa en diversas categorías del impacto ambiental (Frischknecht et al., 2007).

Se excluyeron las etapas posteriores a la salida de la unidad de producción, como transporte, almacenamiento, distribución, comercialización, consumo y gestión de residuos posconsumo, bajo el supuesto de que estos procesos serían equivalentes para los escenarios comparados y, por tanto, no modificarían las diferencias relativas entre los sistemas evaluados. Asimismo, la mano de obra no se incorporó al inventario debido a que no constituye un flujo de materia o energía dentro del sistema de producto, criterio ampliamente aceptado en estudios de ACV agrícola (Nemecek & Schnetzer, 2012).

La unidad funcional (UF) se estableció como 1 kg de frambuesa (*Rubus idaeus* L.) empacada en campo y lista para su salida de la unidad de producción, al constituir la unidad de referencia que permite normalizar todos los flujos de materia, energía y emisiones del sistema. La selección de una unidad funcional basada en masa facilita la comparación entre sistemas agrícolas con diferente productividad y es consistente con la práctica metodológica empleada en estudios de ACV de cultivos hortofrutícolas ((ISO, 2006a; Huijbregts et al., 2017). No fue necesario aplicar procedimientos de asignación debido a que el sistema evaluado genera un único producto comercial. El esquema de los límites del sistema se presenta en la Figura 13.

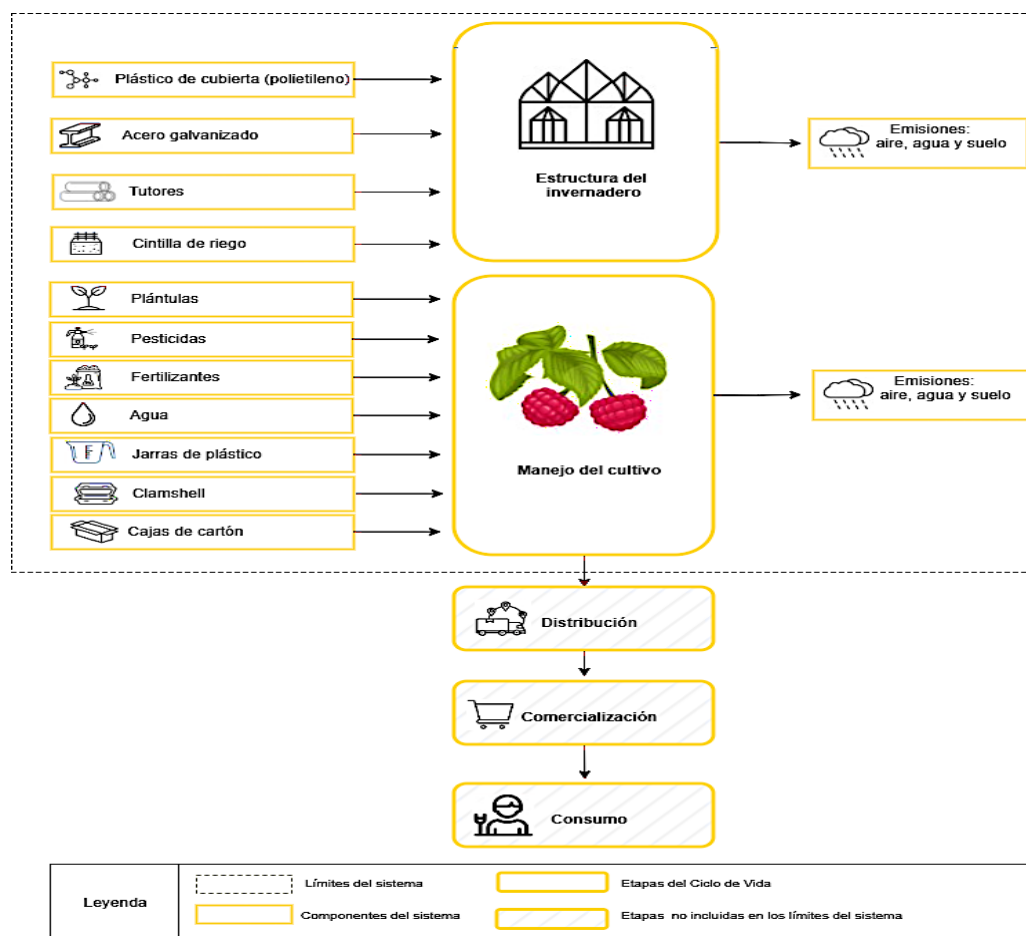


Figura 13. Límites del sistema de producción de frambuesa analizado.

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

2.4 Inventario de Ciclo de Vida (ICV)

El inventario del ciclo de vida (ICV) se elaboró conforme a los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006a, 2006b) mediante la identificación, cuantificación y organización sistemática de los flujos de entrada y salida asociados al sistema de producción de frambuesa. El inventario incluyó tanto los datos primarios obtenidos directamente en campo como los datos secundarios derivados de bases de datos de ACV para la modelación de los procesos establecidos para este estudio.

Los datos primarios correspondieron al ciclo agrícola 2024 y fueron obtenidos mediante encuestas estructuradas, entrevistas semiestructuradas, revisión de registros de producción y observación directa en las tres unidades de producción

seleccionadas. La consistencia de la información se verificó a través de la comparación entre las diferentes fuentes de información disponibles y la revisión de los registros de consumo de insumos, con el propósito de garantizar la representatividad y calidad de los datos empleados en la modelación ambiental.

Aunque las tres unidades de análisis compartieron la misma secuencia de operaciones agrícolas, el inventario se construyó de forma independiente para cada caso de estudio con el fin de representar las diferencias observadas en infraestructura, consumo de insumos, manejo agronómico y rendimiento. Posteriormente, todos los flujos fueron normalizados a la unidad funcional de 1 kg de frambuesa fresca empacada en campo para permitir la comparación ambiental entre los sistemas evaluados.

El inventario comprendió los materiales utilizados en la instalación del macrotúnel, las plántulas, el sistema de fertirriego, el consumo de agua, los fertilizantes, los productos fitosanitarios y los materiales de empaque empleados durante la cosecha. **Los datos de consumo de agua y de aplicación de fertilizantes correspondieron a los registros reportados por cada productor.** La infraestructura agrícola se incorporó considerando la vida útil específica de cada componente para distribuir su carga ambiental durante el periodo de utilización. De acuerdo con las recomendaciones metodológicas del ACV agrícola, la mano de obra fue excluida al no representar un flujo físico dentro del sistema de producción.

La modelación del sistema se realizó mediante el software openLCA v2.5.0 utilizando la base de datos ecoinvent v3.2 para representar los procesos de fondo, mientras que los procesos agrícolas específicos fueron modelados con información primaria recopilada durante el trabajo de campo. La utilización de procesos de fondo provenientes de ecoinvent garantiza la consistencia metodológica y la comparabilidad de los resultados con otros estudios internacionales de ACV agrícola (Weidema et al., 2013).

Las emisiones directas derivadas de la aplicación de fertilizantes se estimaron mediante los factores de emisión propuestos por Nemecek & Schnetzer (2012), incorporando emisiones de amoníaco (NH_3), óxido nitroso (N_2O), óxidos de nitrógeno (NO_x), así como pérdidas de nitratos (NO_3^-) y fósforo por lixiviación y escorrentía. Estas emisiones se incorporaron al inventario para su posterior caracterización mediante el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) (Huijbregts et al., 2017). Los flujos de entrada y salida considerados en el estudio se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Inventario del ciclo de vida (ICV) por etapa del sistema de producción de frambuesa.

Actividad	Insumo / Recurso	Unidad	Caso1	Caso 2	Caso 3
Instalación del macro túnel	Plástico de polietileno	m ²	49600	62000	93000
	Postes metálicos (acero galvanizado)	Piezas	1382	1728	2074
	Arcos	m	6221	7776	10886
	Tutores	piezas	3100	3888	4227
	Cintilla de riego	m	27360	14500	51300
Trasplante	Plántulas trasplantadas	Plantas/ha	96000	120000	144000
Crecimiento vegetativo	Plántulas logradas	Plantas/ha	76800	108000	129600
	Agua para diluir fertilizantes, acaricidas e insecticidas	m ³	8000	10000	12000
	Calcinit	kg	33.76	42.20	50.64
	NKS	kg	22.16	27.20	33.24
	MAP (fosfato monoamónico)	kg	16.88	21.10	25.32
	SOLUB 45	kg	16.00	20	24
	Abamectina	L	1.6	2	3
	Beauveria bassiana	kg	1.6	2	4
	Jabón potásico	L	12.8	16	16
	Sultron 725	L	21.6	27	33
	Plantas logradas	Plantas/ha	69120	97200	116,640
	Jarras de 1.5L	Piezas	80	80	80
Empacado	Fruta empacada	t	7.50	10	12
	Clamshell (250 g)	Piezas	144000	180000	216000
	Cajas de cartón	Piezas	12,000	15,000	18000
	Tarimas de madera	Piezas	40	50	60

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

Los valores reportados en el Cuadro 5 corresponden a los consumos totales registrados durante un ciclo productivo y posteriormente fueron normalizados a la unidad funcional durante la modelación del sistema. Esta estrategia permitió conservar la representatividad de los datos primarios y asegurar la comparabilidad entre las tres unidades de producción evaluadas.

2.5 Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida

La evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) se realizó conforme a las etapas de clasificación y caracterización establecidas en las normas ISO 14040 e ISO 14044. Los flujos del inventario fueron caracterizados mediante el método ReCiPe 2016 Midpoint (H, Hierarchist Perspective), el cual constituye uno de los métodos de evaluación de impacto más ampliamente utilizados en estudios de ACV por integrar modelos científicos actualizados para múltiples categorías de impacto ambiental mediante indicadores de punto medio (Huijbregts et al., 2017).

La selección de las categorías de impacto respondió a los objetivos del estudio, a la naturaleza de los principales flujos ambientales del sistema productivo y a la evidencia reportada en investigaciones previas sobre cultivos de berries. En consecuencia, se analizaron las categorías de calentamiento global, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, ecotoxicidad terrestre y consumo de agua (Cuadro 6), debido a su elevada sensibilidad frente al uso de fertilizantes, productos fitosanitarios, materiales de infraestructura y consumo de agua de riego (Legua et al., 2021).

Cuadro 6. Categorías de impacto seleccionadas para la evaluación del ciclo de vida

Categoría de impacto	Acrónimo	Unidad
Calentamiento global	GWP	kg CO ₂ eq
Acidificación terrestre	TA	kg SO ₂ eq
Eutrofización de agua dulce	FEP	kg P eq
Ecotoxicidad terrestre	TE	kg 1,4-DCB
Consumo de agua	WC	m ³

Fuente: Legua et al. (2021).

La evaluación se limitó a las etapas de clasificación y caracterización, sin aplicar procedimientos de normalización, ponderación, ni análisis de incertidumbre, conforme a las recomendaciones establecidas en las normas ISO para estudios comparativos de Análisis de Ciclo de Vida. Esta aproximación permite presentar los resultados en términos de indicadores ambientales potenciales, evitando la introducción de juicios de valor asociados a la agregación de categorías de impacto (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida se presentan en dos apartados complementarios. En primer lugar, se analiza el desempeño ambiental de las tres unidades de producción mediante las categorías de impacto seleccionadas. Posteriormente, se desarrolla un análisis de contribución con el propósito de identificar los procesos e insumos responsables de los impactos ambientales observados. Esta estructura permite no solo comparar el desempeño ambiental entre los sistemas evaluados, sino también interpretar los factores que determinan las diferencias encontradas y establecer oportunidades de mejora ambiental para la producción bajo agricultura protegida.

3.1 Potencial de calentamiento global (GWP)

El potencial de calentamiento global (GWP), expresado como kg CO₂ eq por kilogramo de frambuesa fresca, mostró diferencias importantes entre las unidades de producción evaluadas. El mayor impacto correspondió al Caso 1 (2.482 kg CO₂ eq), seguido por el Caso 2 (0.911 kg CO₂ eq) y el Caso 3 (0.826 kg CO₂ eq) (Figura 14a). Dado que las tres unidades comparten condiciones agroclimáticas, sistema de producción y límites de evaluación equivalentes, estas diferencias reflejan variaciones en el desempeño y la eficiencia ambiental del sistema productivo, asociadas principalmente al rendimiento obtenido y a la distribución de las cargas ambientales de la infraestructura e insumos sobre la unidad funcional.

Los valores obtenidos para los Casos 2 y 3 se ubican dentro del intervalo reportado para sistemas comerciales de producción de frambuesa bajo agricultura protegida. Estudios recientes informan emisiones comprendidas entre 0.50 y 1.30 kg CO₂ eq dependiendo del sistema de cultivo, el rendimiento y los límites del análisis (Peano et al., 2015; Vásquez-Ibarra et al., 2021; Rantanen et al., 2024; Boakye-Yiadom et al., 2025). De forma similar, reportaron valores de 0.95 y 1.27 kg CO₂ eq, mientras que obtuvieron 0.42 y 0.52 kg CO₂ eq, respectivamente. En contraste el Caso 1 presentó un impacto considerablemente superior, aunque permaneció por debajo (7 kg CO₂ eq) de los valores máximos reportados para sistemas comerciales con límites del sistema más amplios, como los descritos por Foster et al. (2014). Estos resultados indican que los sistemas evaluados presentan un desempeño ambiental comparable con el reportado internacionalmente, excepto cuando la productividad disminuye significativamente.

Las diferencias entre estudios deben interpretarse con cautela debido a que los resultados del ACV dependen de múltiples decisiones metodológicas, entre ellas los límites del sistema, la inclusión de bienes de capital, la calidad del inventario, los factores de emisión empleados y el método de evaluación del impacto. En consecuencia, aun cuando dos investigaciones utilicen la misma unidad funcional, las diferencias en la modelación del sistema pueden modificar de forma importante la magnitud de los impactos estimados, por lo que las comparaciones deben centrarse principalmente en las tendencias observadas y no exclusivamente en los valores absolutos (Finnveden et al., 2009).

La productividad del cultivo emergió como el principal factor que explica las diferencias observadas entre las unidades de producción. a medida que aumenta el rendimiento, los impactos ambientales asociados a la infraestructura, los insumos y las operaciones agrícolas se distribuyen entre una mayor cantidad de producto comercializable, reduciendo el impacto ambiental por kilogramo de frambuesa. Este fenómeno, ampliamente reconocido en estudios de ACV agrícola como efecto de amortización o dilución de los bienes de capital, explica

por qué los Casos 2 (10 t/ha) y C3 (12 t/ha) presentaron menores emisiones que C1 (7.5 t/ha), a pesar de emplear sistemas productivos similares (Boakye-Yiadom et al., 2025; Rantanen et al., 2024) lo que evidencia una mayor eficiencia ambiental por UF.

El análisis de contribución presentado en el apartado 3.2 confirma esta interpretación al evidenciar que la infraestructura del macrotúnel constituyó el principal punto crítico del Caso 1. Conforme aumentó la productividad, la contribución relativa de la infraestructura disminuyó de manera progresiva, lo que permitió amortizar su carga ambiental por unidad funcional. Este comportamiento demuestra que la productividad no solo incrementa la eficiencia económica del sistema, sino que también mejora su desempeño ambiental cuando la infraestructura representa una proporción importante de los impactos del ciclo de vida.

En conjunto, los resultados evidencian que el potencial de calentamiento global de la producción de frambuesa bajo agricultura protegida está determinado por la interacción alcanzada entre la productividad del cultivo y la carga ambiental asociada a la infraestructura distribuidas por unidad funcional. En consecuencia, las estrategias orientadas a incrementar el rendimiento, optimizar la vida útil de los bienes de capital y mejorar la eficiencia en el uso de los insumos pueden representar alternativas efectivas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de producto.

3.2 Eutrofización de agua dulce

La eutrofización de agua dulce, expresada en kg P eq por kg de frambuesa, presentó diferencias entre las unidades evaluadas. El Caso 1 registró el mayor impacto (0.0014 kg P eq), mientras que los Casos 2 y 3 obtuvieron valores considerablemente menores (0.0002 y 0.0003 kg P eq, respectivamente) (Figura 14b). Dado que las tres unidades fueron evaluadas bajo condiciones productivas comparables, estos resultados indican diferencias en la eficiencia ambiental asociadas principalmente al manejo del sistema y al rendimiento alcanzado.

Los valores obtenidos fueron del mismo orden de magnitud que los reportados para sistemas comerciales de producción de frambuesa. Al respecto, Boakye-Yiadom et al. (2025), reportaron valores de 3.13×10^{-4} y 3.48×10^{-4} kg P eq para dos sistemas bajo túnel. Asimismo, Rantanen et al. (2024) registraron 1.3 y 3.2 g PO₄ eq para cultivos en túnel y campo abierto, respectivamente, mientras que Vásquez-Ibarra et al. (2021), utilizando el método CML 2001, obtuvieron 5.36×10^{-3} kg PO₄ eq. Por su parte, Foster et al. (2014) informaron valores cercanos entre 0.004 y 0.005 kg PO₄ eq para un sistema con límites de cuna al centro de distribución.

No obstante, la comparación entre estudios depende del método de evaluación del impacto empleado, las categorías de caracterización (kg P eq o kg PO₄ eq) y los límites del sistema considerados.

La eutrofización de agua dulce está asociada con las pérdidas de nitrógeno y fósforo derivadas del manejo de fertilizantes, especialmente por procesos de lixiviación y escorrentía (Foster et al., 2014; Vásquez-Ibarra et al., 2021). Asimismo, Boakye-Yiadom et al. (2025) señalan que la infraestructura agrícola también puede contribuir a la eutrofización cuando se incorpora dentro de los límites del sistema.

Además, una mayor productividad reduce el impacto por kilogramo de fruta al distribuir las cargas ambientales entre una mayor producción (Boakye-Yiadom et al., 2025; Rantanen et al., 2024). En este estudio, los Casos 2 y 3 presentaron menores valores de eutrofización que el Caso 1, resultado consistente con sus mayores rendimientos.

Estos resultados indican que la reducción del potencial de eutrofización no depende exclusivamente de disminuir la aplicación de fertilizantes, sino también de incrementar la eficiencia en su aprovechamiento y mejorar la productividad del cultivo, factores que reducen la carga ambiental expresada por unidad funcional. En este contexto, el análisis de contribución presentado en el apartado 4 permite

identificar los procesos específicos responsables de esta categoría de impacto y orientar estrategias de mejora del sistema productivo.

3.3 Consumo de agua

El consumo de agua, expresado en m^3 por kilogramo de frambuesa fresca, presentó valores muy similares entre las tres unidades de producción. El Caso 1 registró el mayor consumo ($1.098 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), mientras que los Casos 2 y 3 alcanzaron valores de 1.008 y $1.007 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, respectivamente (Figura 14c). La reducida variación observada indica que el incremento del rendimiento no estuvo acompañado por un aumento proporcional del consumo hídrico. Lo que evidencia una mayor eficiencia en el uso del agua en las unidades de mayor productividad, lo cual resulta consistente con el uso del mismo sistema de fertirriego por goteo y prácticas agronómicas similares.

Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de variación reportado para sistemas comerciales de producción de berries, aunque la comparación debe realizarse con cautela debido a las diferencias en los métodos utilizados para evaluar el consumo de agua y la huella hídrica. Estudios recientes reportan valores desde 0.085 hasta $7.09 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ dependiendo del sistema de cultivo, el método de evaluación, la tecnología de riego y las condiciones climáticas (Foster et al., 2014; Malefaki et al., 2025; Boakye-Yiadom et al., 2025). En contraposición, Vásquez-Ibarra et al. (2021) documentaron un consumo aproximado de $1100 \text{ m}^3/\text{ha}$ bajo condiciones de riego superficial tradicional. Estas diferencias ponen de manifiesto la elevada sensibilidad de esta categoría frente a las características particulares de cada sistema productivo.

Además de las diferencias metodológicas, el consumo de agua depende de la interacción entre las condiciones climáticas, la disponibilidad hídrica, el sistema de cultivo, la eficiencia del riego y el rendimiento alcanzado. En sistemas de agricultura protegida, la reducción de las pérdidas por evaporación y el suministro localizado mediante fertirriego favorecen un uso más eficiente del recurso hídrico respecto a sistemas convencionales. Diversos estudios han demostrado que la

adopción de tecnologías de riego presurizado permite incrementar la productividad sin aumentar proporcionalmente el consumo de agua por unidad de producto (Boakye-Yiadom et al., 2025; Malefaki et al., 2025).

En conjunto, los resultados indican que el incremento de la productividad constituye un mecanismo eficaz para mejorar la eficiencia hídrica del sistema, ya que permite obtener una mayor cantidad de fruta utilizando prácticamente el mismo volumen de agua por unidad de superficie. Este comportamiento representa una ventaja ambiental relevante para los sistemas de producción bajo macrotúnel y será analizado con mayor detalle mediante el análisis de contribución presentado en el apartado 4.

3.4 Ecotoxicidad terrestre

La ecotoxicidad terrestre, expresada en kg 1,4-DCB eq por kg de frambuesa, presentó una marcada diferencia entre las unidades evaluadas. El Caso 1 presentó el mayor impacto (15.691 kg 1,4-DCB eq kg⁻¹), mientras que los Casos 2 y 3 registraron valores considerablemente menores y prácticamente equivalentes (0.992 y 0.991 kg 1,4-DCB eq kg⁻¹, respectivamente) (Figura 14d). Dado que las tres unidades fueron evaluadas bajo condiciones productivas comparables, estas diferencias reflejan cambios importantes en la eficiencia ambiental del sistema conforme aumenta la productividad.

La comparación con estudios previos resulta limitada debido a que la ecotoxicidad terrestre es una de las categorías menos reportadas en investigaciones de ACV sobre frambuesa. No obstante, investigaciones realizadas en otros cultivos de berries evidencian que la ecotoxicidad terrestre constituye una categoría relevante cuando se utilizan métodos como ReCiPe. Aunque las diferencias metodológicas impiden realizar comparaciones cuantitativas directas, diversos estudios realizados en cultivos hortofrutícolas bajo agricultura protegida coinciden en que esta categoría suele estar determinada por el manejo agronómico, la infraestructura y los insumos utilizados

durante el cultivo, así como por las emisiones asociadas a su utilización (Legua et al., 2021; Frakolaki et al., 2026; Parajuli et al., 2022),.

Los resultados obtenidos sugieren que la elevada ecotoxicidad observada en el Caso 1 no responde exclusivamente al uso de insumos agrícolas, sino al efecto combinado de una menor productividad y de la distribución de las cargas ambientales asociadas a la infraestructura sobre una menor cantidad de fruta producida. Conforme aumenta el rendimiento, dichas cargas se amortizan y disminuye el impacto expresado por unidad funcional, comportamiento consistente con el observado en las restantes categorías ambientales evaluadas.

En el presente estudio, la marcada diferencia observada entre el Caso 1 y las demás unidades sugiere una menor eficiencia ambiental del sistema de menor productividad, al concentrar una mayor carga ambiental por kilogramo de fruta producido. En contraste, los mayores rendimientos alcanzados en los Casos 2 y 3 favorecieron una reducción importante del impacto por unidad funcional. No obstante, esta diferencia no puede atribuirse exclusivamente al rendimiento, ya que la contribución de los distintos procesos e insumos del sistema productivo también influye en esta categoría de impacto.

El análisis de contribución presentado en el apartado 4 permite corroborar esta interpretación al identificar los procesos responsables de la ecotoxicidad terrestre y cuantificar la participación relativa de la infraestructura, el sistema de riego y los insumos agrícolas en esta categoría de impacto.

3.5 Acidificación terrestre

El potencial de acidificación terrestre, expresado en kg SO₂ eq por kilogramo de frambuesa, mostró diferencias entre las unidades de producción evaluadas. El mayor impacto correspondió al Caso 1 (0.0118 kg SO₂ eq kg⁻¹), seguida por el Caso 2 (0.0029 y 0.0026 kg SO₂ eq kg⁻¹), y el Caso 3 (0.0026 Kg SO₂ eq kg⁻¹) (Figura 14e). Dado que los tres sistemas fueron analizados bajo condiciones metodológicas equivalentes, estos resultados evidencian una mejora progresiva del desempeño ambiental conforme aumenta la productividad del cultivo.

Al comparar estos valores con la literatura, el Caso 1 fue ligeramente superior al reportado por Vásquez-Ibarra et al. (2021) quienes registraron una mediana de $1.05 \times 10^{-2} \text{ kg SO}_2 \text{ eq kg}^{-1}$, para la producción de frambuesa en Chile. En contraste, los Casos 2 y 3 fueron similares a los reportados por Foster et al. (2014), quienes obtuvieron valores entre 0.003 y 0.010 $\text{kg SO}_2 \text{ eq kg}^{-1}$ para distintos escenarios de suministro de frambuesa. No obstante, las comparaciones deben interpretarse con cautela debido a las diferencias en los métodos de evaluación, los límites del sistema y los modelos de caracterización empleados.

La acidificación terrestre se encuentra estrechamente asociada con las emisiones de amoníaco (NH_3) y óxidos de nitrógeno generadas durante la aplicación de fertilizantes nitrogenados. No obstante, cuando el ACV incorpora la infraestructura agrícola dentro de los límites del sistema, la infraestructura agrícola también puede representar una contribución importante, especialmente en sistemas protegidos (Boakye-Yiadom et al., 2025; Vásquez-Ibarra et al., 2021). Al respecto, Foster et al. (2014) atribuyeron una mayor contribución al transporte refrigerado, debido al alcance considerado en su evaluación.

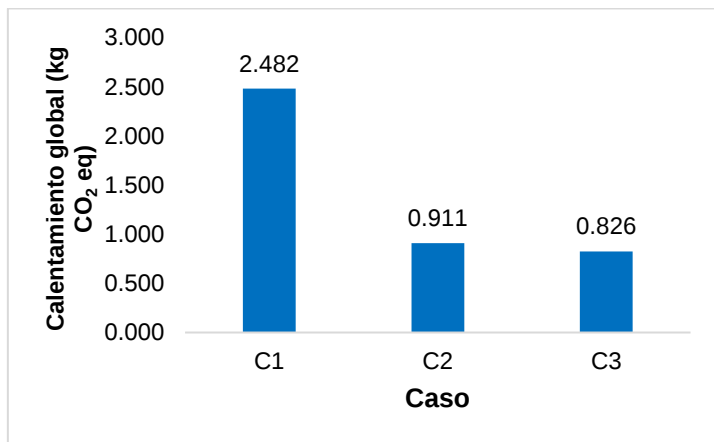
En el presente estudio, los Casos 2 y 3 presentaron menores impactos que el Caso 1, lo cual coincide con sus mayores rendimientos y sugiere una mayor eficiencia ambiental por kilogramo de fruta. Sin embargo, esta diferencia también puede estar relacionada con la contribución de los distintos procesos e insumos considerados en el inventario del ciclo de vida.

En conjunto, los resultados confirman que la acidificación terrestre depende tanto del manejo de fertilizantes como de las decisiones metodológicas relacionadas con la modelación de la infraestructura agrícola. Por ello, las estrategias dirigidas a incrementar la productividad y optimizar el uso de fertilizantes constituyen alternativas complementarias para reducir esta categoría en sistemas comerciales de producción de frambuesa.

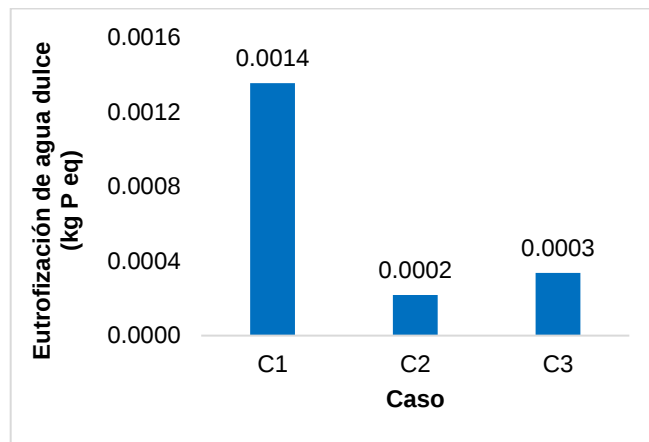
En términos generales, las cinco categorías de impacto evaluadas mostraron un mismo patrón consistente: el sistema de menor productividad presentó los mayores impactos ambientales por unidad funcional, mientras que los sistemas con mayor rendimiento registraron una reducción progresiva en prácticamente todas las categorías analizadas. De manera específica, si se analizan las cinco categorías presentadas hasta aquí, todas muestran el mismo patrón:

- El Caso 1, con menor rendimiento, concentra los mayores impactos ambientales.
- Conforme aumenta la productividad, disminuye el impacto por unidad funcional.
- El impacto generado por la infraestructura pierde peso relativo.
- El sistema de riego adquiere mayor relevancia.
- La eficiencia ambiental mejora sin necesidad de incrementar proporcionalmente el consumo de recursos.

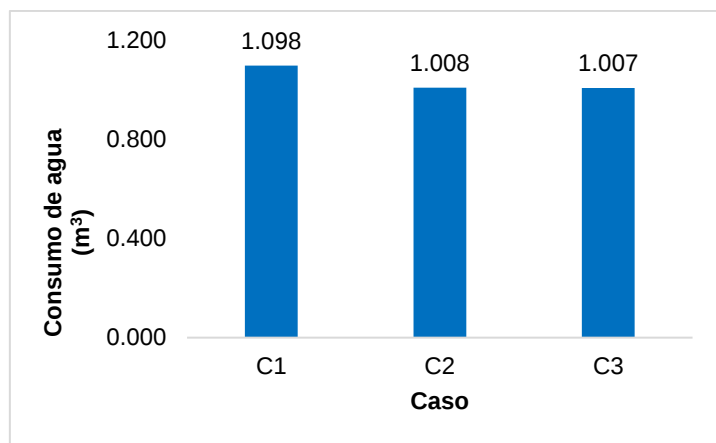
Este comportamiento no es una coincidencia, sino que muestra un comportamiento consistente que atraviesa todas las categorías evaluadas. Evidencia que la productividad, como eje motriz del nivel de eficiencia que alcanzan los elementos que intervienen en el sistema de producción, actúa como un factor estructurante de los hotspots ambientales en la producción de frambuesa bajo agricultura protegida, ya que modifica simultáneamente la distribución de las cargas ambientales asociadas a la infraestructura, el sistema de riego y el manejo agronómico. Estos resultados proporcionan un marco interpretativo para comprender los cambios observados en el análisis de contribución presentado en el siguiente apartado.



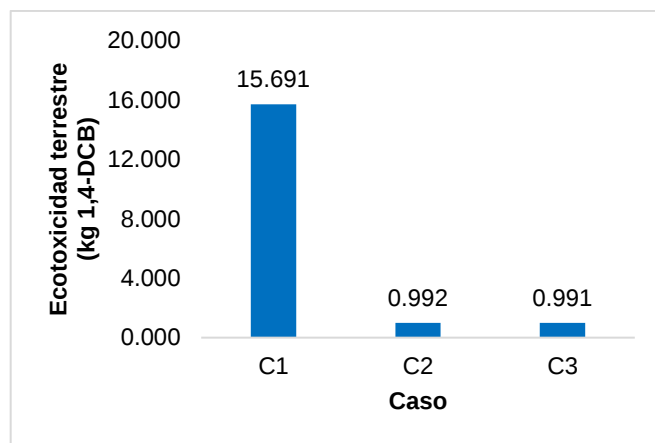
a) Potencial de calentamiento global (GWP)



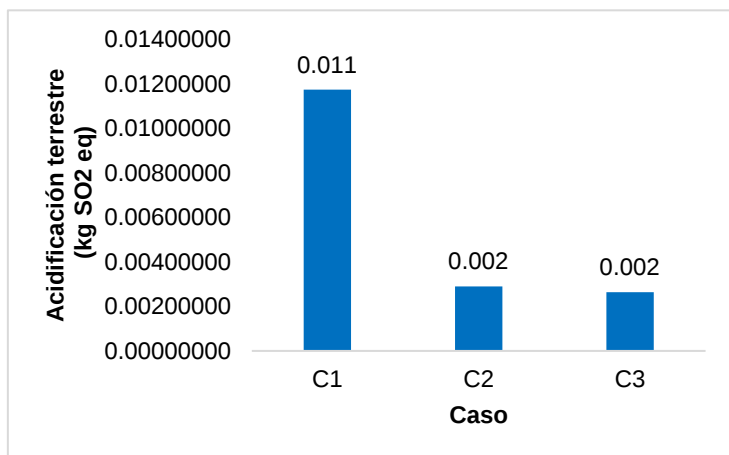
b) Eutrofización de agua dulce (FEP)



c) Consumo de agua



d) Ecotoxicidad terrestre



e) Acidificación terrestre

Figura 14. Categorías de impacto ambiental analizadas en el sistema de producción.

Fuente: Elaboración propia.

4. Análisis de la contribución de las etapas del sistema

El análisis de contribución permitió identificar los procedimientos e insumos que actuaron como principales puntos críticos (hotspots) dentro del sistema producción frambuesa. Esta ordenación constituye una de las principales fortalezas del Análisis del Ciclo de Vida, ya que permite explicar el origen de los impactos ambientales observados y orientar estrategias de mejora dirigidas a los procesos con mayor contribución relativa (Finnveden et al., 2009).

En términos generales, la infraestructura del macrotúnel constituyó el principal contribuyente en el sistema de menor productividad. Sin embargo, conforme aumentó el rendimiento del cultivo, la contribución relativa de la infraestructura disminuyó progresivamente y adquirieron mayor importancia los procesos asociados al sistema de riego y al marco agronómico. Este comportamiento evidencia que la productividad modifica la distribución de las cargas ambientales dentro del sistema, alterando los procesos que determinan el desempeño ambiental de la producción de frambuesa. Lo anterior, destaca la idea de que la contribución de la infraestructura y de las operaciones agrícolas dependen de la productividad alcanzada y de los supuestos considerados en la modelación del ACV (Parajuli et al., 2022; Vásquez-Ibarra et al., 2021).

4.1 Caso 1. Menor productividad bajo macrotúnel

La Figura 15a muestra que la infraestructura del macrotúnel constituyó el principal punto crítico del sistema de menor productividad, al contribuir con el 82.53 % del potencial de calentamiento global, 83.27 % de la eutrofización de agua dulce, 87.31 % de la acidificación terrestre y el 93.32 % de la ecotoxicidad terrestre. Esta elevada participación indica que, bajo condiciones de baja productividad, los impactos asociados a la fabricación de la infraestructura predominan sobre aquellos derivados del manejo agronómico.

La elevada contribución de la infraestructura coincide con estudios de ACV que incorporan los bienes de capital dentro de los límites del sistema, los cuales han demostrado que la fabricación de estructuras metálicas y cubiertas plásticas

representan una fuente importante de impactos ambientales en sistemas de agricultura protegida (Boakye-Yiadom et al., 2025; Ilari et al., 2021). En el presente estudio, esta situación se explica porque la carga ambiental asociada a la al macrotúnel fue distribuida entre una producción relativamente baja de fruta, incrementando su contribución por unidad funcional.

Desde la perspectiva del ACV, este comportamiento refleja un proceso de amortización ambiental insuficiente de los bienes de capital. Los requerimientos de materiales estructurales permanecen prácticamente constantes por unidad de superficie, independientemente del rendimiento obtenido. Por ello, cuando la productividad disminuye, la carga ambiental atribuida a la infraestructura aumenta significativamente por kilogramo de producto. Este fenómeno ha sido descrito en la literatura como uno de los principales factores que explican la variabilidad ambiental entre sistemas agrícolas protegidos con diferentes niveles de productividad (Boakye-Yiadom et al., 2025; Vásquez-Ibarra et al., 2021).

4.2 Caso 2. Productividad intermedia bajo macrotúnel

Con un rendimiento de 10 t ha^{-1} , el Caso 2 mostró una modificación importante en la distribución de las contribuciones ambientales respecto al Caso 1 (Figura 15b). La participación relativa de la infraestructura disminuyó hasta representar el 59.00 % del potencial de calentamiento global y el 51.85 % de la acidificación terrestre, evidenciando el efecto de amortización ambiental derivado del incremento de la productividad.

Como consecuencia de esta disminución relativa, el sistema de riego emergió como un nuevo punto crítico del sistema productivo. Esta etapa concentró el 87.77 % de la eutrofización del agua dulce, el 90.24 % de la ecotoxicidad terrestre y el 44.58 % de la acidificación terrestre, lo que pone de manifiesto que, una vez amortizada parcialmente la infraestructura, los procesos operativos adquieren una mayor importancia relativa dentro del perfil ambiental.

Este cambio en la distribución de los impactos constituye uno de los hallazgos más relevantes del estudio. Los resultados indican que las prioridades para

mejorar el desempeño ambiental no permanecen constantes, sino que evolucionan conforme aumenta la productividad del sistema. Mientras que en sistemas de menor rendimiento las estrategias deberían orientarse hacia la optimización de la infraestructura, en sistemas de productividad intermedia resulta prioritario incrementar la eficiencia del manejo hídrico y del fertirriego.

4.3 Caso 3. Sistema de mayor productividad

El Caso 3 alcanzó el mayor rendimiento del estudio (12 t ha^{-1}), lo que favoreció una distribución más equilibrada de las contribuciones ambientales entre la infraestructura del macrotúnel y el sistema de riego (Figura 15c). La infraestructura contribuyó con el 54.00 % del potencial de calentamiento global y el 47.38 % de la acidificación terrestre, mientras que el sistema de riego representó el 43% y 48.89 %, respectivamente.

En contraste, con las de modalidades de menor productividad, el sistema de riego concentró prácticamente la totalidad de los impactos asociados al consumo de agua (99.63 %) y de la ecotoxicidad terrestre (99.60 %), indicando que, conforme aumenta el rendimiento, los procesos asociados al suministro y manejo del agua adquieren una mayor influencia relativa dentro del perfil ambiental. Este comportamiento coincide con estudios recientes que identifican al riego como uno de los principales procesos determinantes del desempeño ambiental en sistemas agrícolas protegidos altamente productivos (Peano et al., 2015; Boakye-Yiadom et al., 2025).

Asimismo, la reducida contribución de los productos fitosanitarios fue inferior al 3 % en todas las categorías evaluadas, lo que sugiere que, bajo las condiciones del presente estudio, estos insumos tuvieron papel secundario respecto a la infraestructura y al sistema de riego. Sin embargo, esta contribución puede modificarse en otros sistemas de producción dependiendo del tipo de ingrediente activo, la dosis aplicada y el método de evaluación ambiental empleado.

En conjunto, los tres casos analizados muestran que el incremento de la productividad no implica necesariamente un aumento del impacto ambiental por

kilogramo de frambuesa producido. Por el contrario, una mayor productividad favorece la amortización de las cargas ambientales asociadas a la infraestructura agrícola y modifica progresivamente la distribución de los puntos críticos del sistema. En consecuencia, las estrategias para mejorar el desempeño ambiental deben adaptarse al nivel de productividad alcanzado: en sistemas de menor rendimiento (Caso 1) resulta prioritario optimizar la infraestructura, mientras que en sistemas de mayor productividad (Casos 2 y 3) las mayores oportunidades de mejora se concentran en la eficiencia del manejo hídrico y del fertirriego.

Finalmente, estos resultados evidencian la influencia de los supuestos de modelación utilizados en el ACV, particularmente en lo relacionado con la vida útil asignada a los bienes de capital. De igual forma, la infraestructura agrícola constituye un componente relevante en sistemas bajo agricultura protegida, sin embargo, su contribución ambiental depende de los criterios empleados para su amortización temporal.

La comparación presentada en el Cuadro 7 evidencia que la vida útil asignada a la infraestructura agrícola constituye una de las principales fuentes de variabilidad metodológica entre estudios de ACV en agricultura protegida. Un ejemplo de esto, es que la literatura reporta una amplia variabilidad en la vida útil del acero galvanizado (5–30 años) y de las cubiertas de polietileno de baja densidad (2–5 años) (Boakye-Yiadom et al., 2025; Frakolaki et al., 2026; Ilari et al., 2021; Malefaki et al., 2025; Romero-Gámez & Suárez-Rey, 2020).

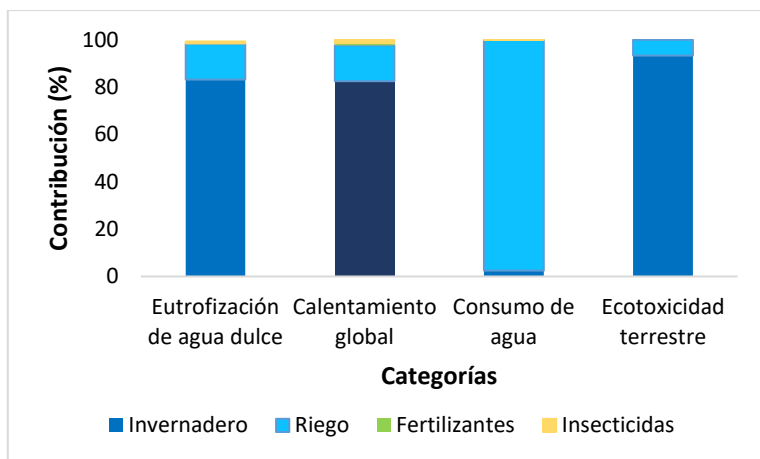
En consecuencia, las diferencias observadas entre investigaciones pueden atribuirse no sólo a las características de los sistemas productivos evaluados, sino también a los supuestos empleados para amortizar ambientalmente los bienes de capital. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de documentar de manera explícita los supuestos empleados para favorecer la comparabilidad y reproducibilidad de los estudios de ACV.

Así, la productividad se convierte en un punto nodal, ya que es el factor que modifica la jerarquía de los hotspots ambientales del sistema de producción y cambia los procesos que dominan el perfil ambiental del sistema.

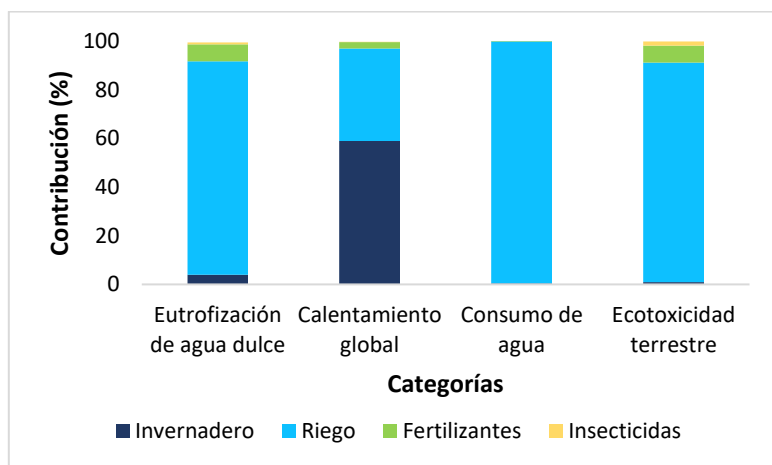
Cuadro 7. Comparación de la vida útil de los componentes del macrotúnel reportada en la literatura.

Autor (año)	Sistema	Vida útil – estructura de acero (años)	Vida útil – cubierta plástica (años)	Resultado
Romero-Gámez & Suárez-Rey (2020)	Cultivo protegido	15	2	Reportan la menor durabilidad para películas plásticas de LDPE.
Ilari et al. (2021)	Túneles altos	10	3	Estiman un periodo intermedio de renovación para la cubierta transparente.
Boakye-Yiadom et al. (2025)	Sin suelo / Túnel	30	3	Consideran estructura de hierro galvanizado; las tuberías de cromo pueden superar los 50 años.
Malefaki et al. (2025)	Macrotúnel específico	5	5	Reportan un ciclo de reemplazo acelerado para componentes metálicos.
Frakolaki et al. (2026)	Túnel convencional	25	4	Utilizan parámetros estándar para la región mediterránea

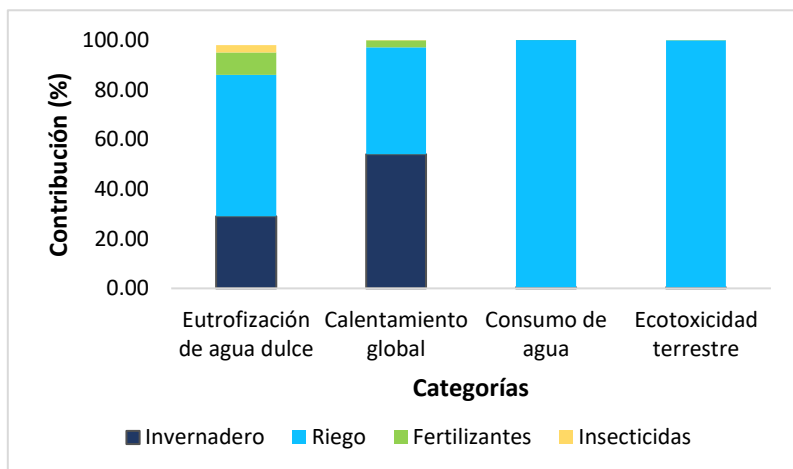
Fuente: Elaboración propia



a) Caso 1



b) Caso 2



c) Caso 3

Figura 15. Análisis de contribuciones del sistema de producción
Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que el desempeño ambiental de los sistemas comerciales de producción de frambuesa bajo agricultura protegida está estrechamente determinado por la productividad del cultivo. Mediante la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) fue posible identificar que las unidades con mayor rendimiento presentaron menores impactos ambientales por kilogramo de fruta producida, debido al efecto de amortización de las cargas ambientales asociadas a la infraestructura agrícola. Estos resultados evidencian que la productividad constituye un factor clave para incrementar simultáneamente la eficiencia productiva y la eficiencia ambiental del sistema.

El análisis de la contribución permitió identificar que la infraestructura del macrotúnel representa el principal punto crítico ambiental en sistemas con baja productividad. Conforme aumenta el rendimiento del cultivo, la contribución relativa de los bienes de capital disminuye progresivamente al distribuirse sus cargas ambientales entre una mayor cantidad de producto, mientras que procesos operativos como el sistema de riego y el fertirriego adquieren una mayor importancia relativa. Este comportamiento demuestra que el incremento de la productividad modifica la jerarquía de los procesos responsables de los impactos ambientales dentro del sistema productivo.

Desde una perspectiva de gestión ambiental, los resultados indican que las estrategias de mitigación deben adaptarse al nivel de productividad del sistema. En unidades de bajos rendimientos, las acciones prioritarias deberían orientarse hacia la optimización de la infraestructura agrícola y el incremento de la productividad, mientras que en sistemas de mayor rendimiento resulta fundamental mejorar la eficiencia del manejo hídrico, del fertirriego y el uso de insumos agrícolas. En consecuencia, la mejora del desempeño ambiental requiere un enfoque integral que combine eficiencia agronómica con una gestión sostenible de los recursos.

Desde el punto de vista metodológico, la integración del análisis de conglomerados con el Análisis de Ciclo de Vida permitió comparar unidades

productivas representativas con diferentes niveles de tecnificación dentro de una misma región agrícola. Esta aproximación permite el análisis de sistemas heterogéneos y constituye una estrategia metodológica replicable para evaluar el desempeño ambiental de otros sistemas hortofrutícolas en los que la variabilidad entre productores puede influir significativamente en la magnitud y distribución de los impactos ambientales.

Los resultados obtenidos proporcionan información útil para orientar la toma de decisiones de los productores, asesores técnicos y responsables de generar políticas de gobierno y públicas dirigidas a promover sistemas de producción de frambuesa más sostenibles. Asimismo, aportan evidencia científica que respalda la incorporación del Análisis de Ciclo de Vida como herramienta para diseñar estrategias de intensificación sostenible, capaces de incrementar la productividad sin comprometer el desempeño ambiental de los sistemas agrícolas.

En términos generales, esta investigación demuestra que el incremento de la productividad no solo reduce los impactos ambientales expresados por unidad funcional, sino que transforma la estructura interna del sistema al modificar la importancia relativa de los procesos que generan dichos impactos. Este hallazgo aporta evidencia de que la eficiencia productiva y la sostenibilidad ambiental pueden avanzar de manera complementaria cuando las decisiones de manejo agronómico e inversión en infraestructura se orientan hacia la optimización integral del sistema productivo.

Aunque el presente estudio constituye una de las primeras evaluaciones del desempeño ambiental de sistemas comerciales de producción de frambuesa bajo macrotúnel en Puebla, México, sus resultados deben interpretarse considerando el alcance del estudio y el número de unidades productivas analizadas. Investigaciones futuras deberían incorporar un mayor número de casos de estudio, análisis de incertidumbre y sensibilidad, así como la evaluación de escenarios de mejora relacionados con la vida útil de la infraestructura, la eficiencia del fertirriego y la incorporación de tecnologías de menor impacto ambiental. Estos avances permitirán fortalecer la robustez de las evaluaciones y

contribuir al diseño de estrategias para una producción de frambuesa más sostenible.

5. LITERTURA CITADA

- Alhashim, R., Deepa, R., & Anandhi, A. (2021). Environmental impact assessment of agricultural production using lca: A review. *Climate*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/cli9110164>
- Barney, D. ., Cogger, C., Fitzpatrick, S. ., Hart, J., Miles, C., Miller, T., Moore, P., & Rempel, H. (2007). *Commercial red raspberry production*.
- Bartzas, G., Vamvuka, D., & Komnitsas, K. (2017). Comparative life cycle assessment of pistachio, almond and apple production. *Information Processing in Agriculture*, 4(3), 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.04.001>
- Boakye-Yiadom, K. A., Ilari, A., Olivi, L., Zucchi, P., Osti, L., Mezzetti, B., & Duca, D. (2025). Environmental sustainability and quality assessment of new raspberry genotypes cultivated in a soilless system. *Sustainable Production and Consumption*, 54(February), 502–515. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.01.020>
- Cerutti, A. K., Beccaro, G. L., Bruun, S., Bosco, S., Donno, D., Notarnicola, B., & Bounous, G. (2014). Life cycle assessment application in the fruit sector : State of the art and recommendations for environmental declarations of fruit products. *Journal of Cleaner Production*, 73, 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.017>
- Durmus, A., Ayyıldız, B., & Erdal, G. (2025). Revealed comparative advantage of strawberry production in international trade. *Applied Fruit Science*, 67. <https://doi.org/10.1007/s10341-025-01690-3>
- Fenollosa, M. ., Ribal, J., Lidón, A., Bautista, I., Juraske, R., Clemente, G., & Sanjuan, N. (2014). Influence of management practices on economic and environmental performance of crops. A case study in Spanish horticulture. *Agroecol. Sustain. Food Syst*, 38, 635–659. <https://doi.org/10.1080/21683565.2014.896302>.
- Finnveden, G., Hauschild, M., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., & Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Foster, C., Guében, C., Holmes, M., Wiltshire, J., & Wynn, S. (2014). The environmental effects of seasonal food purchase : a raspberry case study.

- Frakolaki, G., Parcharidou, M., Boukouvalas, C., Papadaki, S., Panagiotou, N., Valanides, N., Kokkini, A., Georgiadou, E. C., Milivojević, J., Tsormpatsidis, E., Raffaelli, D., Mezzetti, B., Manganaris, G. A., & Krokida, M. (2026). Comparative climate change impacts of different strawberry cultivation systems in Southeastern Europe: A study across open-field and protected cultivation systems towards sustainable production models. *Journal of Agriculture and Food Research*, 26(April 2025), 102589. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102589>
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hirsch, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., & Spielmann, M. (2007). *Overview and methodology. ecoinvent report No. 1, v2.0. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories*. www.ecoinvent.org
- Gaskell, M. (2004). Field Tunnels permit extended season harvest of small fruits in California. *Acta Horticulturae*, 659, 425–430. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.659.56>
- Girgenti, V., Peano, C., Baudino, C., & Tecco, N. (2014). Science of the Total Environment From “ farm to fork ” strawberry system : Current realities and potential innovative scenarios from life cycle assessment of non-renewable energy use and green house gas emissions. *Science of the Total Environment*, 473–474, 48–53. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.133>
- Hauck, M., Steinmann, Z. J. N., Laurenzi, I. J., Karuppiyah, R., & Huijbregts, M. A. J. (2014). How to quantify uncertainty and variability in life cycle assessment: the case of greenhouse gas emissions of gas power generation in the US. *Environmental Research Letters*, 9(7), 074005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/7/074005>
- Heindenreich, C., Pritts, M., Demchak, K., & Hanson, E. (2012). *High tunnel raspberries and blackberries*. http://www.plantgrower.org/uploads/6/5/5/4/655_4516
- Huang, K., Li, X., Liu, X., & Seto, K. C. (2019). Projecting global urban land expansion and heat island intensification through 2050. *Environmental Research Letters*, 14(11), 114037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4b71>
- Huijbregts, M. ., Steinmann, Z. ., Elshout, P. ., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int. J. Life Cycle Assess*, 22.

- Ilari, A., Toscano, G., Boakye-Yiadom, K. A., Duca, D., & Foppa Pedretti, E. (2021). Life Cycle Assessment of Protected Strawberry Productions in Central Italy. *Sustainability*, 13(9), 4879. <https://doi.org/10.3390/su13094879>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000: serie VI*. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- ISO. (2006a). ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. *International Organization for Standardization*, 2006, 12. <https://www.iso.org/uy/>
- ISO. (2006b). *ISO 14044: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*, International Organization for Standardization.
- Laso, J., Hoehn, D., Margallo-María, García-Herrero, I., Batlle-Bayer, L., Bala, A., Fullana-Palmer, P., Vázquez-Rowe, I., Irabien, A., & Aldaco, R. (2018). Assessing energy and environmental efficiency of the spanish agri-food system using the LCA/DEA methodology. *Energies*, 11(3395). <https://doi.org/10.3390/en1123395>
- Legua, P., Hernández, F., Tozzi, F., Martínez-Font, R., Jorquera, D., Jiménez, C. R., Giordani, E., Martínez-Nicolás, J. J., & Melgarejo, P. (2021). Application of LCA methodology to the production of strawberry on substrates with peat and sediments from ports. *Sustainability*, 13(11), 6323. <https://doi.org/10.3390/su13116323>
- Licastro, A., Salomone, R., Mondello, G., & Calabrò, G. (2025). Soil-less is more? A comparative life cycle assessment case study of agricultural growing methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 30(8), 1705–1723. <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02467-2>
- Liu, M., Huang, J., Sun, A. Y., Wang, K., & Chen, H. (2022). What roles can water-stressed vegetation play in agricultural droughts? *Science of the Total Environment*, 803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149810>
- Lopez-Corona, A. V., Valencia-Espinosa, I., González-Sánchez, F. A., Sánchez-López, A. L., Garcia-Amezquita, L. E., & Garcia-Varela, R. (2022). Antioxidant, anti-inflammatory and cytotoxic activity of phenolic compound family extracted from raspberries (*Rubus idaeus*): A general review. *Antioxidants*, 11(6), 1192. <https://doi.org/10.3390/antiox11061192>
- Malefaki, A. X., Valanides, N., Manganaris, G. A., DeVetter, L. W., Papadaki, S., Krokida, M., Vyrkou, A., & Angelis-Dimakis, A. (2025). A comprehensive assessment of life cycle environmental impact and economic feasibility of different red raspberry (*Rubus idaeus* L) cultivation systems. *Cleaner and*

- Mancuso, I., Natalicchio, A., Panniello, U., & Roma, P. (2021). Understanding the purchasing behavior of consumers in response to sustainable marketing practices: An empirical analysis in the food domain. *Sustainability*, 13(11), 6169. <https://doi.org/10.3390/su13116169>
- Mousavi, M., Taki, M., Ghaseminejd, M., & Soheilifard, F. (2023). Evaluation of energy consumption and environmental impacts of strawberry production in different greenhouse structures using life cycle assessment (LCA) approach. *Energy*, 280(March), 128087. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128087>
- Nemecek, T., & Schnetzer, J. (2012). *Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems*.
- Notarnicola, B., Sala, S., Anton, A., McLaren, S., Saouter, E., & Sonesson, U. (2017). The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems : A review of the challenges. *Journal of Cleaner Production*, 140, 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.071>
- Parajuli, R., Matlock, M. D., & Thoma, G. (2022). Environmental life cycle impact assessment of fresh California strawberries: A full supply chain perspective. *Cleaner and Responsible Consumption*, 6(August), 100073. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2022.100073>
- Peano, C., Baudino, C., Tecco, N., & Girgenti, V. (2015). Green marketing tools for fruit growers associated groups: application of the Life Cycle Assessment (LCA) for strawberries and berry fruits ecobranding in northern Italy. *Journal of Cleaner Production*, 104, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.087>
- Peña, D. (2002). *Análisis de datos multivariantes*. Mc.Graw Hill.
- Popovic, T., Saric, B., Martacic, J., Arsic, A., Jovanov, P., Stokic, E., Misan, A., & Mandic, A. (2022). Potential health benefits of blueberry and raspberry pomace as functional food ingredients: Dietetic intervention study on healthy women volunteers. *Frontiers in Nutrition*, 9(1). <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.969996>
- Raffaelli, D., Qaderi, R., Mazzoni, L., Mezzetti, B., & Capocasa, F. (2025). Yield and sensorial and nutritional quality of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch .) Fruits from plants grown under different amounts of irrigation in soilless cultivation. *Plants*, 14(286). <https://doi.org/10.3390/plants14020286>

- Rantanen, M., Joensuu, K., Silvenius, F., Usva, K., Rikala, K., & Karhu, S. (2024). Life cycle assessment of red raspberry production – a comparative case study of open field and tunnel production in Finland. *International Society for Horticultural Science*, 165–170. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1388.25>
- Romero-Gómez, M., & Suárez-Rey, E. M. (2020). Environmental footprint of cultivating strawberry in Spain. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(4), 719–732. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01740-w>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). *Manual sobre cosecha de berries*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/915859/02_compressed.pdf
- Servicio Meteorológico Nacional. (2026). *Normales climatológicas mensuales. Estación 21046*. Servicio Meteorológico Nacional. https://smn.conagua.gob.mx/tools/REOURCES/Normales_Climatologicas/Mensuales/pue/mes21046.txt
- SIAP. (2025). Panorama Agroalimentario 2025. In *Panorama Agroalimentario*.
- Tricase, C., Lamonaca, E., Ingrao, C., Bacenetti, J., & Lo, A. (2018). A comparative Life Cycle Assessment between organic and conventional barley cultivation for sustainable agriculture pathways. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3747–3759. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.008>
- Vásquez-Ibarra, L., Iriarte, A., Rebolledo-Leiva, R., Vásquez, M., Angulo-Meza, L., & González-Araya, M. C. (2021). Considering the influence of the variability in management practices on the environmental impacts of fruit production: A case study on raspberry production in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 313(May), 127609. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127609>
- Weidema, B. P., Bauer, C., Hischier, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C. O., & Wernet, G. (2013). *Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3*.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES

El estado actual del conocimiento sobre los impactos ambientales y económicos en el sector agrícola muestra un interés científico reciente y creciente en la temática, con un mayor número de publicaciones en las últimas décadas, centradas en aspectos de sostenibilidad e impacto ambiental, bioenergía y control de emisiones, y economía circular. Las tendencias reflejan un comportamiento que pasó de la caracterización económica y productiva de sistemas productivos, hacia perspectivas que integran herramientas analíticas y marcos conceptuales conducentes a modelos productivos sostenibles.

El desempeño ambiental de los sistemas comerciales de producción de frambuesa bajo agricultura protegida está estrechamente determinado por la productividad del cultivo. El análisis de ciclo de vida permitió identificar que la infraestructura del macrotúnel constituyó el principal punto crítico en la unidad de menor productividad; en contraste, conforme aumentó el rendimiento, los procesos asociados al sistema de fertirriego adquirieron una mayor contribución relativa. Los resultados evidencian la importancia de considerar conjuntamente la productividad y las fuentes específicas de impacto para comprender el desempeño ambiental de los sistemas de producción de frambuesa bajo agricultura protegida.

Desde una perspectiva de gestión ambiental, a partir de los puntos críticos identificados, las estrategias de mitigación deben adaptarse al nivel de productividad del sistema. En unidades de bajos rendimientos, las acciones prioritarias deberían orientarse hacia la optimización de la infraestructura agrícola y el incremento de la productividad, mientras que en sistemas de mayor rendimiento resulta fundamental mejorar la eficiencia en el manejo del agua, el fertirriego, y el uso de insumos agrícolas. En consecuencia, la mejora del desempeño ambiental requiere un enfoque integral que combine eficiencia agronómica con una gestión sostenible de los recursos.

Como hallazgo principal, esta investigación demuestra que el incremento de la productividad no solo reduce los impactos ambientales expresados por unidad funcional, sino que transforma la estructura interna del sistema al modificar la importancia relativa de los procesos que generan dichos impactos. Este hallazgo aporta evidencia de que la eficiencia productiva y la sostenibilidad ambiental pueden avanzar de manera complementaria cuando las decisiones de manejo agronómico e inversión en infraestructura se orientan hacia la optimización integral del sistema productivo.

Finalmente, persisten vacíos en el conocimiento sobre el desempeño ambiental de la producción de frambuesa, particularmente en la incorporación de las pérdidas postcosecha y la vida de anaquel en la valoración de los impactos, en la determinación de relaciones de equilibrio entre rendimiento y desempeño ambiental, así como en la integración del balance de carbono asociado con la biomasa y el suelo dentro del Análisis de Ciclo de Vida. Estos aspectos constituyen líneas de investigación relevantes para ampliar la comprensión de la sostenibilidad ambiental del cultivo y a la definición de estrategias para mejorar su desempeño ambiental.