

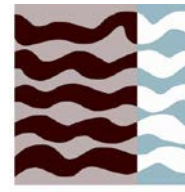


Universidad
Politécnica
de Cartagena



UPCT

Escuela Técnica Superior de
Ingeniería Agronómica



ETSIA

*Máster Universitario
en Ingeniería Agronómica*

Caracterización de las emisiones de gases de
efecto invernadero del cultivo ecológico de
cítricos en el valle del Guadalentín

Autor: Dña. Jennifer Fernanda Espín Espín

Dirección: Dña. Belén Gallego Elvira

Codirección: D. Saker Ben Abdallah

Cartagena, 8 de julio de 2023



Declaración de Honestidad Académica

La alumna Dña. **Jennifer Fernanda Espín Espín**, con DNI **49698952T**,

como autora del TFE de título **Caracterización de las emisiones de gases de efecto invernadero del cultivo ecológico de cítricos en el valle del Guadalentín.**

dirigido por Dña. **Belén Gallego Elvira**

para la obtención del título

- Grado en Ingeniería Agroalimentaria y de Sistemas Biológicos
- Máster Universitario en Ingeniería Agronómica
- Máster Universitario en Técnicas Avanzadas en Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario

DECLARA:

- Que el mencionado TFE es íntegramente de su autoría.
- Que se trata de un trabajo original e inédito en el que no existe plagio.
- Que en todo momento se respeta la propiedad intelectual y en ningún caso se han utilizado como propios resultados ni materiales obtenidos o generados por otros autores.
- Que los resultados y materiales realizados por otros autores han sido debidamente identificados en la memoria.
- Que se ha aplicado al texto íntegro del TFE el control antiplagio que establece la *Normativa de Trabajos Fin de Estudios en la ETSIA*, y acompaña esta declaración de las páginas primera y última del informe obtenido de Turnitin a través de Aul@Virtual.
- Que los directores del TFE conocen y han dado el visto bueno a los resultados del control antiplagio y, en su caso, han informado en la forma que indica el documento *Política de Calidad y Código de Buenas Prácticas*.

Y para que así conste, firma la presente declaración en,

Cartagena, a 6 de julio de 2023



Fdo. Jennifer Fernanda Espín Espín

Caracterización de las emisiones de gases de efecto invernadero del cultivo ecológico de cítricos en el valle del Guadalentín

por JENNIFER FERNANDA ESPÍN ESPÍN

Fecha de entrega: 08-jul-2023 06:07p.m. (UTC+0200)

Identificador de la entrega: 2128134365

Nombre del archivo:

45998_JENNIFER_FERNANDA_ESPIN_ESPIN_Caracterizacion_de_las_emisiones_de_gases_de_efecto_invernadero_del_cultivo_ecologico_de_273375348.pdf
(1.26M)

Total de palabras: 11213

Total de caracteres: 61943

Caracterización de las emisiones de gases de efecto invernadero del cultivo ecológico de cítricos en el valle del Guadalentín

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%	17%	7%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	helvia.uco.es Fuente de Internet	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	Saker Ben Abdallah, Belén Gallego-Elvira, Alberto Imbernón-Mulero, Victoriano Martínez-Alvarez, Jose Maestre-Valero. "Environmental footprint of organic and conventional grapefruit production irrigated with desalinated seawater in Spain", Sustainable Production and Consumption, 2023 Publicación	1%
4	eur-lex.europa.eu Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad Politécnica de Cartagena Trabajo del estudiante	1%
6	corpus.ulaval.ca Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	<1%
8	ria.utn.edu.ar Fuente de Internet	<1%
9	zagan.unizar.es Fuente de Internet	<1%
10	Submitted to Universidad Católica San Pablo	

Belen Gallego Elvira
Universidad Politécnica de Cartagena
ETSIA, Paseo Alfonso XIII, 48.
30203, CARTAGENA (Spain)
Tel: +34 968 17 7741
e-mail: belen.gallego@upct.es

Por el presente escrito, Belén Gallego Elvira, profesora de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, de la Universidad Politécnica de Cartagena, y directora del Trabajo Fin de Máster titulado “Caracterización de las emisiones de gases de efecto invernadero del cultivo ecológico de cítricos en el valle del Guadalentín”, presentado por la alumna Jennifer Fernanda Espín Espín, hace constar que el informe de originalidad indica que el trabajo presenta un índice de similitud del 19% con otras fuentes. Este porcentaje se justifica ya que se ha encontrado similitud con 74 fuentes de información, pero en todas, excepto dos, este es menor del 1%. Las fuentes que superan el 1%, solo alcanzan 2 y 3%, y visto el informe esto se debe al uso de terminología común en los estudios de impacto ambiental de explotaciones agrícolas. Por tanto, el trabajo de la estudiante es original, y desde mi punto de vista puede proceder a ser presentado para su defensa.

Y para que así conste, firmo el presente, en Cartagena, a 10 de julio de 2023.

Belén Gallego-Elvira

Contenido	
Resumen	5
Abstract	6
1. Introducción	7
1.1. Importancia y evolución del sector de cítricos.	7
1.2. Producción ecológica y tradicional.....	11
1.3. Huella ambiental de la producción de cítricos y pomelo.....	13
1.3.1. Emisiones de gases de efecto invernadero.....	13
1.3.2. Aspectos a considerar en la reducción del impacto ambiental.	14
2. Justificación y objetivos del estudio	15
3. Materiales y métodos	16
3.1. Sistema de cultivo de pomelo ecológico	16
3.2. Sistema de cultivo de pomelo convencional.....	20
3.3 Determinación de la huella ambiental	20
3.3.1 Definición del objetivo y alcance	21
3.3.2. Inventario del ciclo de vida.....	23
3.3.3. Análisis del impacto del ciclo de vida	26
4. Resultados y discusión	30
4.1 Impacto ambiental de los sistemas de producción de pomelo.	30
4.1.1 Resultados por hectárea	30
4.1.2 Resultados por tonelada.....	31
4.2. Identificación de los procesos con mayor impacto ambiental.	31
4.3. Discusión	34
5. Conclusiones y recomendaciones	37
6. Bibliografía	39

Índice de figuras

Figura 1. Superficie de cultivo de cítricos en los principales países productores en 2019 y 2020. Fuente: FAO (2022).	8
Figura 2. Toneladas de cítricos producidas por especie en las últimas campañas (2016/17-2020/21) a nivel nacional. Fuente: MAPA (2022).	9
Figura 3. Ranking de comunidades autónomas productores de cítricos en España. Fuente: MAPA (2022).	10
Figura 4: Crecimiento de la superficie ecológica en el mundo, Unión Europea y España. Fuente: MAPA (2020).	12
Figura 5. Vista aérea de la parcela de estudio. Fuente: Visor Sigpac.	17
Figura 6. Finca de pomelos, Cortijos 1. Fuente: Elaboración propia.	18
Figura 7. Finca cortijos 1 afectada por la plaga <i>Phyllocnistis citrella</i> . Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 8. Embalse de cortijos 1. Fuente: Elaboración propia.	20
Figura 9. Fases del marco común para el LCA Fuente: ISO (2006a, 2006b).	21
Figura 10. Diagrama de flujo de la producción de pomelo de la cuna a la puerta de la finca.	25
Figura 11. Contribución de los procesos en cada categoría de impacto para el sistema de pomelo ecológico.	33
Figura 12. Contribución de los procesos en cada categoría de impacto para el sistema de pomelo convencional.	34

Índice de tablas

Tabla 1. Superficie y producción de pomelo de los principales países productores, en ha y t para los años 2019 y 2020. Fuente: FAO (2022).	8
Tabla 2. Principales características de los sistemas de cultivo estudiados.	16
Tabla 3. Fuentes de datos para los procesos incluidos en los sistemas de pomelo seleccionados.	27
Tabla 4. Principales entradas y salidas de los procesos incluidos en las fases del ciclo de vida de los sistemas de producción de pomelo ecológico y convencional.	28
Tabla 5. Impacto ambiental de los sistemas de producción de pomelo por ha. La variación (Δ) se calcula como $[(\text{impacto ecológico} / \text{impacto convencional}) - 1] \times 100$.	30
Tabla 6. Impacto ambiental de los sistemas de producción de pomelo por t. La variación (Δ) se calcula como $[(\text{impacto ecológico} / \text{impacto convencional}) - 1] \times 100$.	31
Tabla 7. Flujos elementales, sistema, y procesos principales de los sistemas de cultivo para cada categoría de impacto.	32

Abreviaturas

ACT: Acidificación terrestre.

ACV: Análisis del ciclo de vida.

AE: Agricultura Ecológica.

AICV: Análisis del impacto del ciclo de vida.

AILIMPO: Asociación interprofesional de limón y pomelo.

AMD: Agua de mar desalinizada.

AOE: Agotamiento del ozono estratosférico.

CARM: Comunidad Autónoma de la región de Murcia.

CE: Conductividad eléctrica.

EAD: Ecotoxicidad del agua.

ESYRCE: Encuestas sobre superficies y rendimientos cultivos.

ETF: Eutrofización del agua.

FAO: Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura.

FEPEX: Productores exportadores de frutas, hortalizas, flores y plantas vivas.

FOE: Formación de ozono en ecosistemas terrestres.

GEI: Gases de efecto invernadero.

ha: hectáreas.

HUC: Huella de carbono.

ICV: Inventario del ciclo de vida.

MAPA: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación.

MITECO: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.

t: Toneladas.

Resumen

El sureste español se caracteriza por la producción, comercialización y exportación de cítricos a Europa. Se trata de un mercado en continuo crecimiento que requiere un punto de inflexión en las técnicas agrícolas de producción, debido a los importantes impactos ambientales causados por la citricultura intensiva. El objetivo del estudio es evaluar y cuantificar mediante indicadores la huella ambiental de la producción de pomelo en ecológico y convencional (predominante en la zona) regados con agua de mar desalinizada (AMD). El método empleado para cuantificar los impactos ambientales es el Análisis del Ciclo de Vida. Los procesos analizados son: el riego, los fertilizantes, la maquinaria y los pesticidas. Los impactos ambientales evaluados son: huella de carbono (HUC), ecotoxicidad del agua (EAD), eutrofización del agua (ETF), acidificación terrestre (ACT), agotamiento del ozono estratosférico (AOE) y formación de ozono en ecosistemas terrestres (FOE). Los resultados se refieren a dos unidades funcionales: 1 hectárea de superficie de pomelo y 1 tonelada de pomelo producido. Los resultados verifican que la producción ecológica tiene un menor impacto por hectárea cultivada. La diferencia de los impactos por tonelada entre los dos sistemas es menor, pero también a favor de la producción ecológica, pese a tener un rendimiento inferior en comparación con el convencional. El riego es el proceso con mayor impacto en las categorías evaluadas, seguido de los fertilizantes. Fomentar el uso de las energías alternativas para la desalinización de agua de mar, como las placas fotovoltaicas, red eólica o digestión anaeróbica, permitirá disminuir la huella ambiental de estos sistemas de producción. La adopción de estas prácticas sostenibles, entre otras, puede mitigar el impacto global de la producción de pomelo, garantizando una gestión más respetuosa con el medio ambiente.

Abstract

The south-eastern region of Spain is characterized by the production, marketing and export of citrus fruits to Europe. It is a continuously growing market that requires a turning point in agricultural production techniques, due to the significant environmental impacts caused by intensive citrus farming. The objective of this study is to evaluate and quantify the environmental footprint of organic and conventional grapefruit production systems (predominant in the area) irrigated with desalinated seawater (DSW). The methodology used to quantify the environmental impacts is Life Cycle Assessment (LCA). The processes analysed are irrigation, fertilisers, machinery and pesticides. The environmental impacts evaluated are: carbon footprint (HUC), freshwater ecotoxicity (EAD), freshwater eutrophication (ETF), terrestrial acidification (ACT), stratospheric ozone depletion (AOE) and ozone formation in terrestrial ecosystems (FOE). Results refer to two functional units: 1 hectare of grapefruit area and 1 ton of grapefruit produced. Results show that organic production has a significantly lower impact per cultivated hectare. The difference in impacts per t between the two systems is less apparent, but also in favor of organic production, despite having lower yield compared to the conventional method. Irrigation is the process with the highest impact in the evaluated categories, followed by fertilizers. Promoting the use of renewable energy sources such as photovoltaic panels, wind power, or anaerobic digestion for desalination will help reduce the environmental footprint of these production systems. The adoption of these sustainable practices, among others, can mitigate the overall impact of grapefruit production, ensuring a more environmentally friendly management.

1. Introducción

1.1. Importancia y evolución del sector de cítricos.

La producción de cítricos es una actividad de relevancia mundial en el sector agroalimentario, superando los 150 millones de toneladas producidas en 2021 (FAO, 2023). España se posicionó como el primer productor de cítricos en Europa y la región mediterránea, con el 4,2% de la producción mundial, seguido de Egipto, Turquía e Italia con el 3,2%, 3% y 2%, respectivamente (Cabot et al., 2022). Es un negocio con alta rentabilidad, debido a la versatilidad del uso que se le puede dar a este fruto, consumo en fresco, procesado destinado a la industria alimentaria o sanitaria y el aprovechamiento de los subproductos gracias a sus valores nutricionales (Çetiner, 2022). Los cítricos se caracterizan por su valor nutritivo y sus propiedades medicinales, siendo fuentes de vitamina C y flavonoides. En 2021, el “informe del Consumo Alimentario elaborado por el Ministerio de Pesca, Agricultura y Alimentación”, posicionó a las naranjas como producto fresco más consumido en España. Es un sector pionero económicamente hablando, pero no ambientalmente, ya que la huella ambiental del sector es mayor que la de otros sistemas agrícolas (Martin-Gorriz et al., 2020).

A continuación, se presenta la importancia del sector de cítricos en términos de producción y superficie a nivel mundial, nacional y regional.

❖ **A nivel mundial**

La Figura 1 detalla los principales países en términos de superficie de cultivo de cítricos en el mundo. En ella, se presentan las hectáreas totales cultivadas por país de limón, naranja, mandarina y pomelo para los años 2019 y 2020. China es el país con mayor superficie y producción de cítricos en el mundo, con 2,8 millones de hectáreas y una media de 38 millones de toneladas producidas. En segundo lugar, se encuentra la India con 974 mil hectáreas y 13 millones de toneladas, seguida de Brasil con 697 mil hectáreas cultivadas y 19 millones de toneladas producidas. España se sitúa como quinto país en cuanto a superficie de cultivo con 295 mil hectáreas y una producción media de 6,3 millones de toneladas (las medias corresponden a los años 2019 y 2020, FAO, 2022).

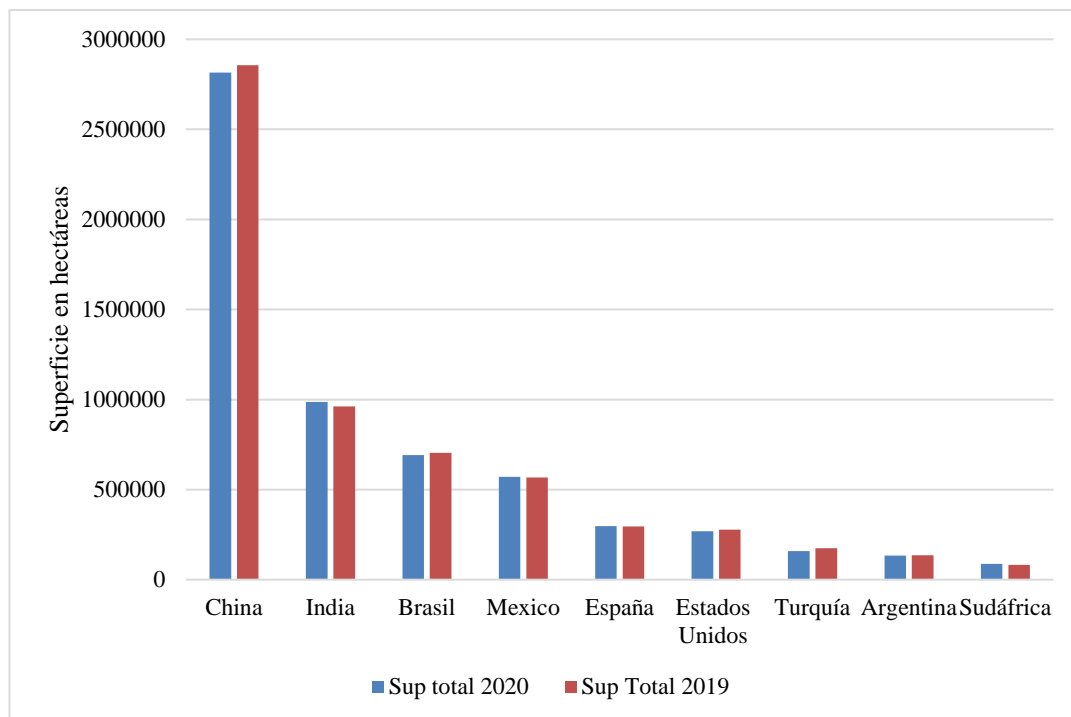


Figura 1. Superficie de cultivo de cítricos en los principales países productores en 2019 y 2020. Fuente: FAO (2022).

La superficie y producción de pomelo, cítrico objeto de estudio en este trabajo, se presentan en la Tabla 1 para los principales países productores del mundo.

Tabla 1. Superficie y producción de pomelo de los principales países productores, en ha y t para los años 2019 y 2020. Fuente: FAO (2022).

País	Superficie (ha)		Producción (t)	
	2019	2020	2019	2020
China	95.314	93.340	5.013.120	5.034.297
Estados Unidos	20.110	19.834	511.650	518.000
México	19.592	18.777	488.776	490.834
Sudáfrica	12.294	13.481	378.634	416.124
Turquía	5.222	5.052	249.185	238.012
Argentina	4.578	4.476	111.657	99.915
Brasil	4.450	4.063	81.568	81.859
España	2.430	2.630	70.470	79.790

El cultivo de pomelo se encuentra concentrado en China con 93.340 ha cultivadas y 5 millones de toneladas producidas, seguida de Estados Unidos y México, con 19.834 ha y 18.777 ha cultivadas, y producciones de 518.000 t y 490.834 t, respectivamente, en 2020. España es el séptimo productor de pomelo, con un crecimiento del 8,2% en superficie y del 13,2% en producción comparando los datos de los años 2019 y 2020.

❖ A nivel nacional

En los últimos años, la producción media nacional de cítricos ha sido de 6,8 millones de toneladas (campañas 2016/17-2020/21), exportándose el 60% de su producción, mientras que el resto es para consumo propio en fresco o procesado (industria agroalimentaria). La campaña de cítricos 2020/21 estuvo liderada por la naranja con un 50% de la producción nacional, en segundo lugar, la mandarina con el 33%, seguido del limón con el 16%, el pomelo con el 1% y el resto de cítricos con menos del 1% (MAPA, 2022). En esta campaña, la producción de mandarinas, limones y pomelos creció en torno a un 20% respecto a la campaña anterior. La producción de naranja encabeza el grupo de los cítricos para las campañas 2016/17 a 2020/21 (Figura 2).

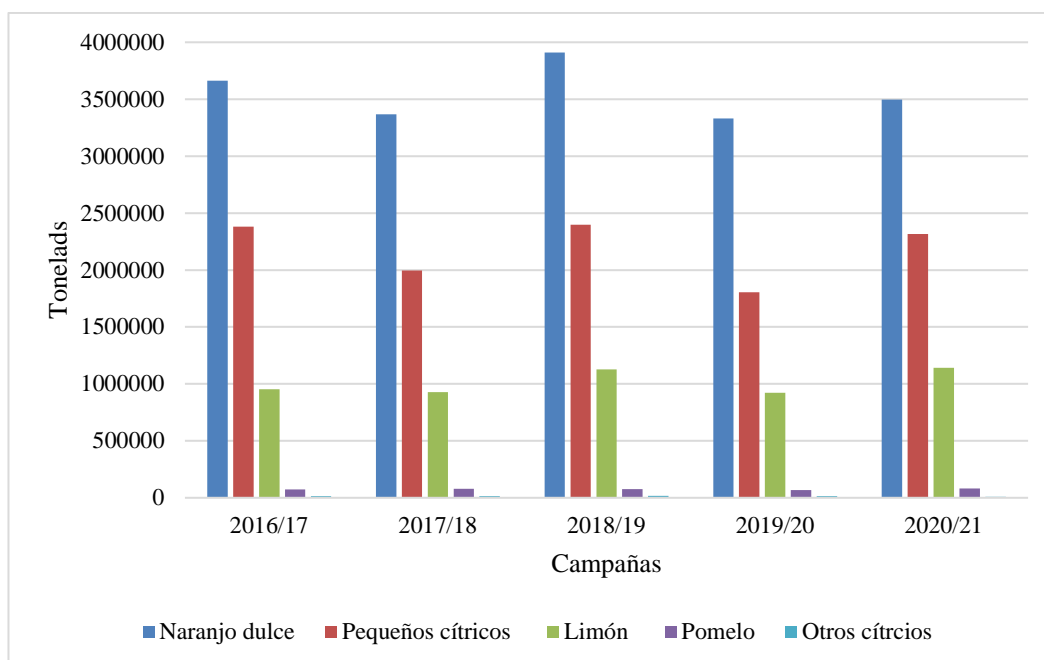


Figura 2. Toneladas de cítricos producidas por especie en las últimas campañas (2016/17-2020/21) a nivel nacional. Fuente: MAPA (2022).

En España, las explotaciones citrícolas se concentran en tres comunidades autónomas: Valencia, Andalucía y Murcia. A continuación, se reflejan las toneladas producidas por comunidad desde la campaña 2016/17 a 2020/21. En la campaña 2020/21, se alcanzó 7.045.519 t de producción total. Valencia representa el 50% de la producción, Andalucía el 33% y Murcia el 14%.

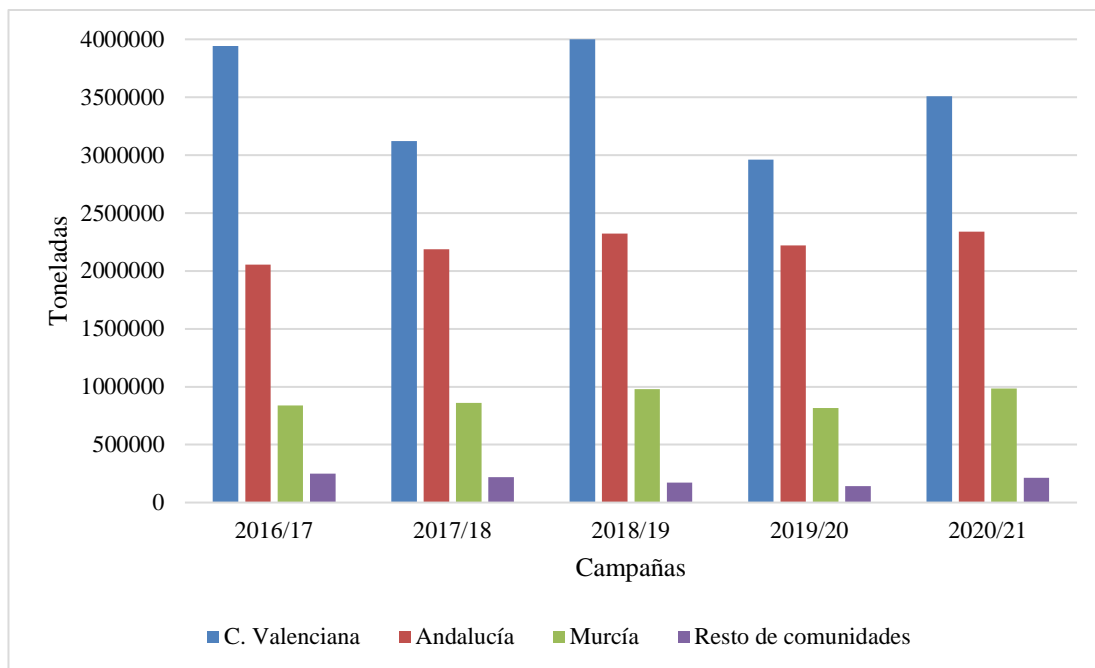


Figura 3. Ranking de comunidades autónomas productores de cítricos en España.
Fuente: MAPA (2022).

Analizando los datos de 2021 de “La Federación Española de Asociaciones de Productores Exportadores de Frutas, Hortalizas, Flores y Plantas Vivas (Fepex)”, España exporta a varios países de la comunidad europea. Los cítricos nacionales se exportan principalmente a Alemania, Francia e Italia, entre otros países de la comunidad europea.

❖ A nivel regional

La Región de Murcia es la tercera comunidad española en producción de cítricos, gracias a las condiciones climatológicas de las que goza, que permiten el cultivo de fruta y verduras, y a la aplicación de las últimas tecnologías de cultivo, que han incrementado la capacidad productiva de la región.

La producción media de cítricos fue 850 mil t entre los años 2015-2020. Los limones representan el 66% de la producción (559 mil t), las naranjas el 16% (136 mil t), las mandarinas el 15% (123 mil t) y los pomelos el 4% (30 mil t). El sector del limón ha experimentado picos productivos importantes en los años 2018 y 2020 superando los 640 mil t de fruta (CARM, 2022).

La superficie de cultivo de cítricos en la región ha incrementado un 8%, pasando de 23.741 ha en 2016 a 25.721 ha en 2020. La mandarina ha mantenido prácticamente su

superficie, con un ligero incremento del 5%, mientras que el pomelo ha experimentado el mayor crecimiento en superficie, con un aumento del 75% (CARM, 2022).

Murcia exporta principalmente limones, con 430 mil t exportadas en 2021, mientras que las exportaciones de mandarinas y naranjas han caído un 37% y un 30% respectivamente. Las exportaciones de pomelo han aumentado de año en año, pasando de 28 a 37 mil t, lo que supone un incremento del 34% (Fepex, 2022).

1.2. Producción ecológica y tradicional.

La agricultura ecológica (AE) se define como “sistemas agrícolas y ganaderos cuya función principal es la obtención de alimentos, respetando el medio ambiente y clima, conservando la fertilidad de la tierra y con ello la biodiversidad de esta, mediante la utilización de recursos naturales. Este tipo de agricultura contribuye a proteger el medio ambiente, al bienestar animal y el desarrollo rural” (Reglamento (UE) 2018/848). Entre las especificaciones del reglamento se destaca las siguientes:

- Mantenimiento y mejora de la vida y la fertilidad natural del suelo, la estabilidad, la retención de agua y la biodiversidad del suelo, prevención de la pérdida de materia orgánica, la compactación y la erosión del suelo y lucha contra estos fenómenos, y nutrición de los vegetales con nutrientes que procedan principalmente del ecosistema edáfico.
- Reducción al mínimo del uso de recursos no renovables y de medios externos.
- Uso de materiales ecológicos de reproducción vegetal, tales como los compuestos de material heterogéneo ecológico y de variedades ecológicas adecuadas para la producción ecológica; es decir, está prohibido la utilización de productos químicos de síntesis.

Entre 2010 y 2020, la superficie de AE ha crecido un 106% en el mundo, un 62% en la Unión Europea y un 48% en España (Figura 4). Al ofrecer calidad con sello europeo, el cual garantiza que las condiciones de su producción cumplen con los estándares establecidos por ley, estos productos permiten obtener una rentabilidad mayor frente a la venta de mismo pero producido mediante prácticas convencionales.

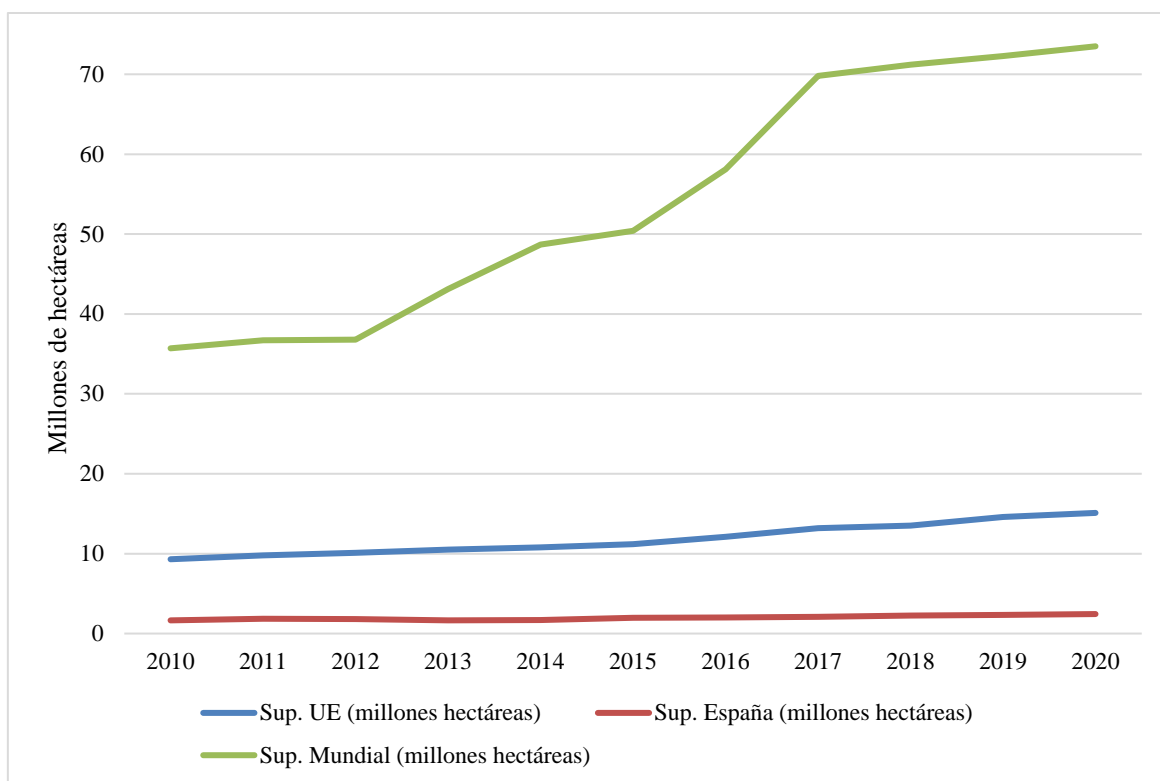


Figura 4: Crecimiento de la superficie ecológica en el mundo, Unión Europea y España. Fuente: MAPA (2020).

España tiene 16,9 millones de hectáreas destinada al desarrollo de las actividades agrarias, el 76% de las hectáreas se dedica a la agricultura de secano y el 24% restante a la agricultura de regadío. El cultivo ecológico abarca 2,44 millones ha, es decir, un 12,3% de la superficie agraria total del país. La mayor superficie ecológica se encuentra en Andalucía, con más de 1 millón de ha. La Región de Murcia es la sexta comunidad autónoma con una superficie de cultivo ecológico que abarca más de 100 mil ha.

El sector cítrico español cuenta con una superficie de más de 300 mil hectáreas, con una producción media de 6,8 millones de toneladas entre las campañas 2016/17-2020/21, de las cuales 19,9 mil hectáreas son ecológicas. Las comunidades con mayor superficie de cultivo son: Valencia con el 53%, Andalucía con el 30% y la Región de Murcia con el 13%. Estas comunidades abarcan el 96% del territorio destinado al cultivo de cítricos ecológicos (MITECO, 2022; MAPA, 2020 y ESYRCE, 2021).

1.3. Huella ambiental de la producción de cítricos y pomelo.

La huella ambiental se refiere al impacto ambiental que una actividad o producción de un bien producen al medio ambiente de forma directa o indirecta. Permite realizar comparaciones de los distintos sistemas agrícolas como, por ejemplo, un sistema de producción tradicional y otro orgánico.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) analiza de forma objetiva, metódica, sistemática y científica los impactos de las explotaciones agrarias, en este estudio, la producción de pomelo en regadío. Además, el ACV permite identificar los puntos críticos de alto impacto en el caso estudiado y, una vez finalizado el estudio, se proponen posibles alternativas de mejora. Con esto se pretende buscar técnicas de cultivo sostenibles, que reduzcan el impacto con el propósito de contribuir a un sistema agrícola/alimentario respetuoso y sostenible con el medio.

Cabot et al. (2022) han realizado recientemente una revisión del ACV aplicado al sector de los cítricos, mostrando los impactos ambientales que se producen, como el agotamiento de los recursos, la pérdida de suelo, las emisiones al medio y la generación de residuos, que a su vez contribuyen al cambio climático. Según el trabajo mencionado, la producción de fertilizantes y pesticidas, y sus emisiones en el campo, son los principales puntos críticos identificados en los trabajos revisados sobre el ACV de los cítricos.

1.3.1. Emisiones de gases de efecto invernadero.

La agricultura es la actividad productiva responsable de un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases se generan en todos los eslabones de la cadena de producción de un producto fresco o procesado, por la utilización de combustibles no renovables, la electricidad, fertilizantes y equipos de procesado. Entre los GEI, el óxido de nitrógeno (N_2O) es el más perjudicial para la capa de ozono y el más persistente. Este compuesto deriva principalmente de la fertilización a base de nitrógeno sintetizado que surge a su vez de los procesos de nitrificación (conversión de amonio en nitrato) y desnitrificación (conversión de nitrato en gas nitrógeno) (Fuentes-Ponce et al., 2022).

La huella de carbono permite cuantificar la cantidad de GEI que emite una actividad de forma directa e indirecta. La reducción de la huella de carbono para combatir

el cambio climático y sus efectos, es un objetivo recogido en la “Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible” aprobado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015.

La Asociación Interprofesional de Limón y Pomelo (AILIMPO, 2023) calculó la huella de carbono en el sector de pomelo para la campaña 2019/2020 a partir de los datos del MAPA (2020). Según las conclusiones del análisis, las plantaciones de este cultivo fijan alrededor de 18.105 t CO₂/año para la superficie total de cultivo de pomelo, lo que corresponde a 7,44 t CO₂/ha/año. Se concluyó también que el cultivo ecológico de pomelo consigue una fijación de CO₂ que supera al cultivo convencional en 0,43 t/ha/año como consecuencia de las menores cantidades de fertilizantes aplicadas.

1.3.2. Aspectos a considerar en la reducción del impacto ambiental.

En la agricultura ecológica se adoptan técnicas de cultivo menos agresivas con el medio que en la agricultura convencional (Lee et al., 2015). La AE se caracteriza por la no utilización de productos agroquímicos, que provocan la pérdida de biodiversidad del medio, así como la pérdida de algunos servicios ecosistémicos e incluso de reservas naturales. La AE tiene diversos impactos positivos sobre el medio ambiente, entre ellos: menos residuos contaminantes; evita la pérdida de los ecosistemas; enriquece los servicios ecosistémicos (p. ej., polinización, el control biológico, la biodiversidad de especies vegetales y animales) y ayuda a mantener los paisajes. Además, la AE contribuye a almacenar mayor cantidad de carbono en el suelo, y, por tanto, contribuye a la reducción del cambio climático. En efecto, la base de la AE es la utilización de materia orgánica (p. ej., estiércol), que libera nutrientes al suelo para que estén disponibles para la planta, aumentando así la fertilidad y el mantenimiento del mismo. Así, la concentración de carbono orgánico es mayor en suelos donde se desarrolla la AE (Lynch, 2009; Tuomisto et al., 2012).

Los visibles daños ambientales han motivado que los modelos de producción agrícola cambien, hacia producciones más verdes, aunque su rendimiento no sea el mismo que en el convencional. Los consumidores demandan cada día más productos ecológicos, aunque dicho crecimiento no es exponencial, sino todo lo contrario, es un crecimiento lento, justificado por el precio final del mismo (Tran-Nam y Tiet 2022).

2. Justificación y objetivos del estudio

En Europa, España es el primer productor de cítricos y el sexto productor mundial, siendo el primer exportador mundial de naranjas, mandarinas y limones y el sexto de pomelos. La comunidad Valencia, Andalucía y la Región de Murcia aglutinan el 95% de la superficie de cítricos del país. La citricultura de regadío proporciona grandes beneficios socio-económicos, pero genera un importante impacto ambiental debido a su uso intensivo de agua y energía y a la emisión de contaminantes. Este impacto puede verse agravado por el uso de AMD para el riego debido al alto consumo de energía que se gasta en su proceso de producción. La sostenibilidad del sector dependerá de su adaptación a los actuales retos climáticos y ambientales, así como a las crecientes demandas de mercado internacional, donde la calidad y eco-sostenibilidad son elementos clave y estratégicos para el futuro de la citricultura mediterránea.

Este trabajo tiene como principal objetivo caracterizar las emisiones de gases de efecto invernadero y los principales indicadores de impacto ambiental del cultivo ecológico de cítricos en el Valle del Guadalentín (Murcia) y compararlos con los del cultivo convencional. Para conseguir el objetivo principal se abordan los siguientes puntos:

- Elaborar un inventario del ciclo de vida con todos los procesos y flujos implicados en la cadena de producción de pomelo ecológico y convencional en el sureste español.
- Calcular la huella de carbono y otros indicadores de impacto ambiental de interés mediante la metodología de Análisis del Ciclo de Vida.
- Identificar los procesos que generan los impactos ambientales más significativos y proponer posibles estrategias de mitigación.

3. Materiales y métodos

La Tabla 2 presenta las principales características de los sistemas de cultivo de pomelo ecológico y convencional objeto de estudio.

Tabla 2. Principales características de los sistemas de cultivo estudiados.

Características	Sistema ecológico	Sistema convencional
Método de cultivo	Ecológico	Convencional
Cultivar	Star Ruby	Star Ruby
Distancia entre árboles	6x4	6x4
Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)	416	416
Vida útil (años)	25	25
Juvenil improductivo (años)	2	2
Joven (años)	3	3
Plena producción	20	20
Producción del ciclo de vida (t ha ⁻¹ / 25 años)	1460	1625
Agua de riego	AMD	AMD
Fertilización	Fertirriego	Fertirriego
Control de malas hierbas	Mecánico	Químico y mecánico
Recolección	Manual	Manual
Poda y residuos de poda	Manual y mecánico	Manual y mecánico
Tratamiento fitosanitario	Productos de bio-protección	Pesticidas convencionales

3.1. Sistema de cultivo de pomelo ecológico

Situación

La parcela de estudio se encuentra en la Cañada del Moreno, Alhama de Murcia (Murcia), a las faldas de la sierra de Carrascoy, con coordenadas 37° 78' 15,01'' N; 1° 20' 55.20'' O. Tiene un suelo franco-arcilloso rico en potasio, con pH 8, conductividad eléctrica 2,73dS/m.

Cultivo

Se trata de pomelo de la variedad “Star ruby” (*citrus Paradisi*) injertado en pies de *citrus Macrophylla*, con una superficie de 2,88 ha. Se plantaron en el año 2013 y en la parcela hay 1.200 ejemplares. El marco de plantación es de 6x4 metros, delimitados por linderos. La distribución del cultivo en la parcela facilita las labores de mantenimiento de la finca, y el buen desarrollo de la planta. La plena producción de la finca comenzó a verse a los cinco años de su plantación (2018), mientras que las primeras producciones se detectaron en 2015.



Figura 5. Vista aérea de la parcela de estudio. Fuente: Visor Sigpac.

Labores de campo

- Poda de árboles: Existen dos tipos de poda. La primera poda durante los seis primeros años del cultivo, en las que se da forma al árbol cuando está en reposo, lo que coincide en otoño o al final del invierno. La segunda poda se conoce como fructificación, que consiste en establecer las ramas principales del árbol y despejar la parte interior para mejorar la penetración de la luz y la aireación.
- Desbroce: Se trata de eliminar las malas hierbas que crecen en las calles del cultivo. Puede realizarse con la ayuda de un apero arrastrado por un tractor o con una desbrozadora manual.



Figura 6. Finca de pomelos, Cortijos 1. Fuente: Elaboración propia.

- Control de plagas: Los minadores de las hojas, o *Phyllocnistis citrella*, son lepidópteros que causan graves daños en estado larvario. Cuando sus huevos eclosionan, excavan galerías subepiteliales para alimentarse de los jugos presentes en las hojas jóvenes o en los brotes en crecimiento. Sus principales daños se producen en el sistema foliar, provocando la pérdida de masa foliar y reduciendo así la capacidad fotosintética del árbol y, en consecuencia, la productividad de la plantación. Se combate mediante control biológico o aplicando insecticidas biológicos. En la finca objeto de estudio, se aplican jabón potásico, azadiractin 1% o *Bacillus thuringiensis*, una bacteria que depreda la larva de la plaga. El piojo gris o *Parlatoria pergandii* (Comstock) está considerada una de las plagas más agresivas de los cítricos de la zona. Ataca las partes leñosas e internas del árbol. Coloniza el haz de las hojas, los nervios centrales de la planta y los frutos, haciendo que estos últimos sean comercialmente inviables. Además, provoca el debilitamiento del árbol y la pérdida de la masa foliar. Se combate aplicando aceites naturales, aceite de naranja 6%, aceite de parafina 83% o utilizando hormonas.



Figura 7. Finca cortijos 1 afectada por la plaga *Phyllocnistis citrella*. Fuente: Elaboración propia.

Los tratamientos mencionados se aplican mediante atomizadores a razón de 2.000-2.500 l/ha. Para ello se realiza la disolución correspondiente de la materia activa en agua, mediante una bomba y boquillas. Se genera una lluvia de gotas y mediante un ventilador se dispersa el producto cubriendo gran parte de la masa vegetativa, es muy utilizado en cultivos arbóreos.

Sistema de riego

El riego por goteo es el sistema utilizado para abastecer de agua a los cítricos. Cada árbol está equipado de 4 goteros, con un caudal de 4L/h, que están integrados en la propia tubería. El agua utilizada para regar la parcela procede prácticamente en su totalidad de la desaladora de Valdelentisco con una conductividad eléctrica (CE) de 0,950 mS/cm.

El cabezal de riego abastece a las cuatro plantaciones de la finca (pomelos, mandarinos, limones y granados). Consta de dos depósitos de fertilizantes con una capacidad de 1.000 litros cada uno. Las bombas encargadas de inyectar la solución al sistema de riego tienen una capacidad de 214-220 L/h. La instalación dispone de tres filtros que garantizan el funcionamiento evitando obstrucciones en la misma. El sistema de riego se limpia en 45 minutos recirculando peróxido por las tuberías.

El sistema de almacenamiento de agua es un embalse de 8.000 m³ situado a mayor cota que la parcela de riego, con un desnivel de 40 m. La toma de agua del cabezal está situada en el centro del embalse.



Figura 8. Embalse de cortijos 1. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Sistema de cultivo de pomelo convencional

El sistema convencional de referencia es un cultivo comercial de pomelo de 0,5 ha ubicado en Campotéjar, Murcia, (38°07'18" N; 1°13'15" W), plantado en 2004, previamente monitorizado para un estudio de análisis de eficiencia energética y huella de carbono (Maestre-Valero et al., 2018). Se seleccionó este sistema, ya que tiene la misma densidad de plantación (6x4 metros) y utiliza el mismo cultivar "Star Ruby" (con *Macrophylla*) que el sistema ecológico objeto de estudio (Tabla 2).

3.3 Determinación de la huella ambiental

En el presente estudio, se ha aplicado la metodología de ACV estandarizada de la norma ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006), que permite evaluar el impacto ambiental que causa un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida. Las fases del ACV son: (i) definición del objetivo y alcance; (ii) análisis del inventario del ciclo de vida; (iii) análisis del impacto del ciclo de vida; (iv) interpretación de los resultados (Figura 9).

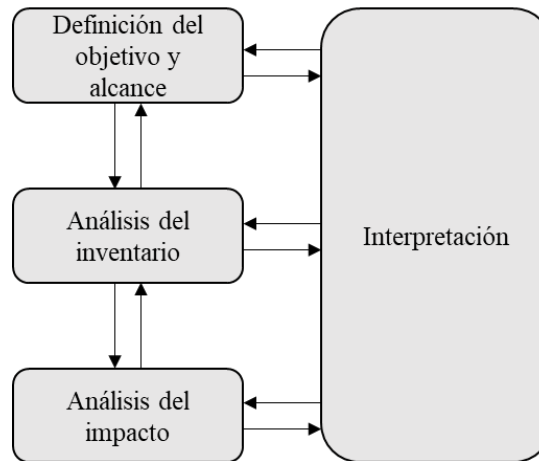


Figura 9. Fases del marco común para el LCA Fuente: ISO (2006a, 2006b).

3.3.1 Definición del objetivo y alcance

El objetivo del estudio es cuantificar los impactos ambientales de la producción ecológica y convencional de pomelo utilizando agua de mar desalinizada (AMD) para el riego. Otro objetivo específico del estudio es identificar los procesos con mayor contribución en los impactos para proponer posibles estrategias de mitigación y mejora. El alcance del estudio es la producción de pomelo "de la cuna a la puerta de la finca", teniendo en cuenta todos los flujos de materiales y energía desde la extracción de la materia prima hasta la recolección del pomelo en la puerta de la finca.

Las unidades funcionales seleccionadas son 1 ha de superficie cultivada de pomelo y 1 t de pomelo producido, siguiendo las recomendaciones de van ver werf et al. (2020) para las evaluaciones comparativas de sistemas de producción ecológico frente al convencional.

La Figura 10 expone los límites del sistema y los flujos incluidos en el ACV. En ella, se observan los procesos de la cadena de producción del pomelo, desde la extracción de la materia prima hasta la puerta de la finca. Los procesos que la componen son:

- Riego:

El sistema de riego comprende lo siguiente: (i) materiales, transporte y fabricación de equipos (cabezales de riego, electroválvulas, depósitos, balsas, programadores, filtros, tuberías de polietileno y policloruro de vinilo), con sus emisiones asociadas; (ii) el

embalse y la caseta para el cabezal de riego; (iii) el agua y la energía consumidas para el riego y las emisiones asociadas (consumo de combustible y producción y transmisión de electricidad, incluidas las fugas a la red). La cantidad de electricidad consumida para el riego incluye el bombeo de agua de mar, la desalinización y la distribución a la red (Martínez-Alvarez et al., 2017). Cabe señalar que el consumo de electricidad es la principal fuente de impacto de la desalinización por ósmosis inversa (Du, 2019; Najid et al., 2021; Fayyaz et al., 2023). Los productos químicos y la infraestructura utilizados para la producción de AMD no se han incluido dentro de los límites del sistema.

- Fertilizantes:

Este proceso incluye la producción de fertilizantes nitrogenados (N), fosfatados (P_2O_5) y potásicos (K_2O) necesarios para cada fase del cultivo, así como su envasado y transporte al campo, con sus emisiones asociadas. En la aplicación de fertilizantes en el campo, se han considerado las siguientes emisiones (i) emisiones al aire de monóxido de di nitrógeno (N_2O), amoníaco (NH_3) y óxidos de nitrógeno (NO_x) y emisiones al agua de nitratos (NO_3^-) para los fertilizantes N y; (ii) emisiones al agua de fosfatos (PO_4^{3-}) para los fertilizantes P_2O_5 . En ambos sistemas de pomelo (ecológico y convencional) los fertilizantes se aplican por fertiirrigación.

- Pesticidas:

Este proceso consiste en la fabricación y síntesis de los componentes químicos y orgánicos de los productos fitosanitarios utilizados, su transporte a la finca y la eliminación de los residuos al final de su uso. La fabricación específica de los productos fitosanitarios utilizados en el sistema ecológico se ha contabilizado siguiendo las directrices de Montemayor et al. (2022). Los productos fitosanitarios utilizados en el sistema ecológico son: spinosad, bacillus thuringiensis, aceite de naranja, azadiractina, jabón potásico y aceite de parafina. En el caso del sistema convencional, se ha contabilizado la cantidad total de materia activa de los pesticidas convencionales utilizados.

- Maquinaria:

Este proceso comprende la fabricación, transporte, uso, reparación y mantenimiento de la maquinaria agrícola necesaria para las prácticas agrícolas en campo (manejo del

suelo, aplicación de pesticidas y tratamiento de residuos de poda), así como el correspondiente consumo de combustible y emisiones al aire asociadas. En los sistemas de pomelo estudiados se utiliza la siguiente maquinaria agrícola: tractores, pulverizadores de barra (aplicación de herbicidas en el sistema convencional), equipos de manejo del suelo, pulverizadores de aire, remolques de transporte y astilladoras (poda). La distancia que se ha tenido en cuenta es de 50 km para el transporte de fertilizantes, pesticidas y materiales de infraestructura.

3.3.2. Inventario del ciclo de vida

En este apartado se describe los datos específicos utilizados para crear el Inventario del Ciclo de Vida (ICV). El ICV consiste en la recopilación, cuantificación y organización de los datos de entrada y salida de las prácticas agrícolas de campo y los procedimientos de cálculo durante cada fase de cultivo del ciclo de vida de los dos sistemas estudiados.

La mayoría de los datos utilizados para el ICV, en particular los datos primarios (*foreground*), han sido facilitados por agricultores, o procedentes de encuestas de campo. También se han utilizado datos de la bibliografía y de la base de datosecoinvent v.3.9.1 (ecoinvent, 2022), especialmente para los datos secundarios (*background*). Las fuentes de datos específicas utilizadas para cada proceso se detallan en la Tabla 3. A continuación, se detallan los datos utilizados para todos los procesos.

La Tabla 4 muestra los valores de las principales entradas y salidas en las fases del ciclo de vida de los sistemas de producción de pomelo ecológico y convencional. Los datos del ICV primario (*foreground*) y secundario (*background*) para la producción de pomelo son los siguientes:

(i) Datos primarios:

- La productividad, las prácticas agrícolas en campo y el uso de maquinaria se han recogido directamente de las dos explotaciones descritas anteriormente. Estas explotaciones situadas en la Región de Murcia (España), cuentan con ejemplares en fase de plena producción (plantados en 2004 para el sistema convencional, y en 2013 para el sistema ecológico). Los datos recogidos incluyen: (i) agua de riego y consumo energético correspondiente a nivel de explotación; (ii) tipo y cantidades de fertilizantes y pesticidas; (iii)

tipo y tiempo de uso de maquinaria para las operaciones de campo y consumo de combustible asociado. Estos datos se han complementado con datos procedentes de la bibliografía (Tabla 3), como las estadísticas y estimaciones aportadas por García García (2014; 2018) y las recomendaciones técnicas de Audsley et al. (1997) y Márquez (2004), relativas al manejo del campo de pomelo en la zona de estudio.

- La energía consumida para el suministro de AMD, que incluye el bombeo de entrada de agua de mar, el proceso de desalinización y la distribución a la red (Martínez-Alvarez et al., 2019).

- Los componentes y materiales utilizados para el establecimiento del sistema de riego para una superficie cultivada de 1 ha de explotación de cítricos y su correspondiente vida útil son los indicados para cultivos leñosos (Martín-Gorriz et al., 2020).

- Las emisiones al aire procedentes de la aplicación de fertilizantes al campo (N_2O , NH_3 y NO_x) se han calculado de acuerdo con Audsley et al. (1997) y Bretrup et al. (2000). La lixiviación de nitratos (NO_3^-) a las aguas subterráneas se ha calculado utilizando el modelo de estimación de Martínez-Alcántara et al. (2012). El modelo SALCA-P (Nemecek y Kagi, 2007) se ha utilizado para calcular las emisiones de fósforo (PO_4^{3-}) a las aguas superficiales y subterráneas. Las cantidades de estas emisiones para el ICV de los dos sistemas se muestran en la Tabla 4. Las emisiones derivadas del consumo de diésel se han obtenido de la base de datos ecoinvent (ecoinvent, 2022).

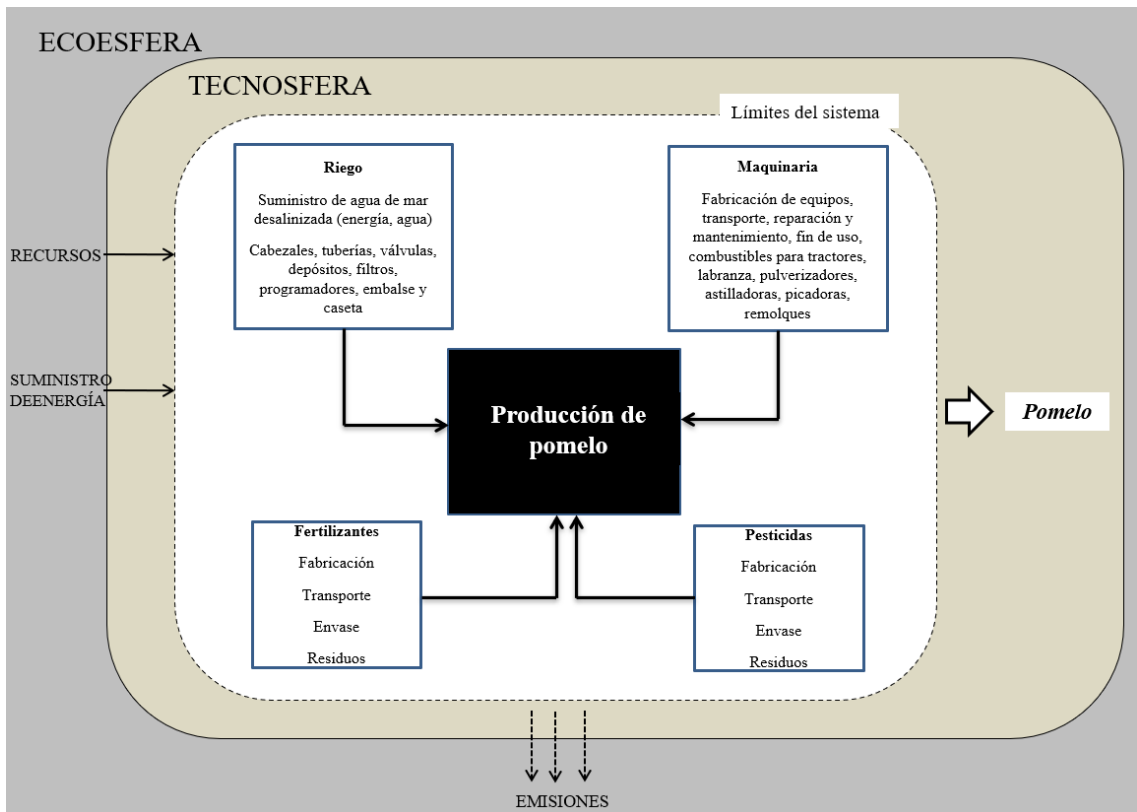


Figura 10. Diagrama de flujo de la producción de pomelo de la cuna a la puerta de la finca.

(ii) Datos secundarios:

- Se ha utilizado la base de datos ecoinvent v.3.9.1 (ecoinvent, 2022) para: (i) fabricación de fertilizantes, pesticidas convencionales, maquinaria agrícola, materiales de sistemas de riego y sus emisiones asociadas; (ii) producción de energía (combustible y electricidad) y; (iii) transporte y eliminación de residuos. Se recomienda el uso de la base de datos ecoinvent en estudios comparativos de sistemas agrícolas ecológicos frente a convencionales (Montemayor et al., 2022).

- Los datos para la fabricación de los productos fitosanitarios utilizados en el sistema ecológico se han recogido de la bibliografía, siguiendo las recomendaciones de Montemayor et al. (2022), con el fin de realizar una evaluación comparativa más representativa. Se han utilizado las siguientes fuentes (i) el modelo de bioprocesos CeBER "Centre for Bioprocess Engineering Research" (Harding y Harrison, 2016a; b) para Spinosad y bacillus thuringiensis; (ii) Kumar et al. (2021) para la producción de 1 kg de

aceite de neem como proxy representativo de la azadiractina; (iii) Beccali et al. (2009) para la fabricación de aceite de naranja y; (iv) Montemayor et al. (2022) para el jabón potásico. Para el aceite de parafina, los datos se han obtenido de la base de datos ecoinvent (ecoinvent, 2022).

3.3.3. Análisis del impacto del ciclo de vida

La cuantificación de los impactos ambientales y la identificación de los procesos con mayor impacto se realizó mediante el Análisis del Impacto del Ciclo de Vida (AICV) con el software openLCA v.1.11.0 software.

El método del AICV usado es ReCiPe (H) de punto medio (Huijbregts et al., 2017). Este método se recomienda para representar los impactos derivados de la producción agrícola, ya que ofrece un número limitado de indicadores, incluida la huella de carbono, permitiendo resumir eficazmente la información relevante (Mouron et al., 2006; Alig et al., 2008; Hersener et al., 2011; Tendall y Gaillard, 2015).

Se seleccionaron seis indicadores ambientales: la huella de carbono (HUC, kg CO₂ eq) y otros indicadores de interés: ecotoxicidad del agua dulce (EAD, kg 1,4- DCB); eutrofización del agua (ETF, kg P eq); acidificación terrestre (ACT, kg SO₂ eq); agotamiento del ozono estratosférico (AOE, kg CFC⁻¹¹ eq); y formación de ozono en ecosistemas terrestres (FOE, kg NO_x eq). Estas categorías se han utilizado anteriormente para la evaluación de la sostenibilidad ambiental de sistemas de cultivo de cítricos (Beccali et al., 2010; Ribal et al., 2017; 2019; Cabot et al., 2023).

Tabla 3. Fuentes de datos para los procesos incluidos en los sistemas de pomelo seleccionados.

Etapas/procesos	Entradas	Fuentes de datos
Productividad y descripción de las fincas		Agricultores; Maestre-Valero et al. (2018).
Riego	Agua Electricidad Sistemas de riego	Agricultores; Maestre-Valero et al. (2018). Agricultores; Maestre-Alvares et al. (2017). Martin-Gorriz et al. (2020).
Fertilizantes	Dosis y tipos Aplicación Emisiones	Agricultores; proveedores; Maestre-Valero et al. (2018); García García (2014; 2018). Agricultores; Maestre-Valero et al. (2018); García García (2014; 2018). Bretrup et al. (2000); Audsley et al. (1997); Nemecek y Kagi (2007); Martínez-Alcantara et al. (2012).
Pesticidas	Dosis y tipos Aplicación	Agricultores; Maestre-Valero et al. (2018); García García (2014; 2018) Agricultores; Maestre-Valero et al. (2018); García García (2014; 2018)
Maquinaria	Equipos Uso de maquinaria Emisiones (diesel)	Agricultores; Maestre-Valero et al. (2018); García García (2014; 2018) Ecoinvent (2022)

Tabla 4. Principales entradas y salidas de los procesos incluidos en las fases del ciclo de vida de los sistemas de producción de pomelo ecológico y convencional.

Input/Output	Unidades	Ecológico				Convencional			
		Plantación	Juvenil	Joven	Plena producción	Plantación	Juvenil	Joven	Plena producción
<u>Riego</u>									
Agua	m ³ ha ⁻¹	–	1249	6817	109.074	–	3003	9586	118.400
Electricidad	kWh ha ⁻¹	–	5620	30678	490.833	–	13514	43137	532.800
<i>Sistema de riego*</i>									
Cabezal de riego	kg ha ⁻¹ year ⁻¹	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75
Tuberías y emisores de PE	kg ha ⁻¹ year ⁻¹	227	227	227	227	227	227	227	227
Tuberías de PVC	kg ha ⁻¹ year ⁻¹	68	68	68	68	68	68	68	68
Film HPDE (depósito)	kg ha ⁻¹ year ⁻¹	36	36	36	36	36	36	36	36
<i>Dosis de fertilizantes</i>									
N	kg ha ⁻¹	–	52	185	2009	–	134	357	3490
P ₂ O ₅	kg ha ⁻¹	–	24	99	1068	–	63	162	1555
K ₂ O	kg ha ⁻¹	–	35	169	1989	–	97	261	2557
<i>Emisiones a la atmósfera</i>									
NH ₃	kg ha ⁻¹	–	1,5	5,6	60,3	–	4	11	105
N ₂ O	kg ha ⁻¹	–	0,6	2,3	25,1	–	2	4	44
NO _x	kg ha ⁻¹	–	0,1	0,2	2,5	–	0,2	0,4	4
<i>Emisiones al agua</i>									
NO ₃ ⁻	kg ha ⁻¹	–	2,6	9,3	100,4	–	7	18	174,5
PO ₄ ³⁻	kg ha ⁻¹	–	1,2	4,9	53,4	–	3	8	77,8
<i>Dosis de pesticidas</i>									
Aceite de parafina	kg ha ⁻¹	–	–	37,35	560,3	–	–	–	–

Azadiractina	kg ha ⁻¹	-	-	0,04	0,1	-	-	-	-
Jabón potásico	kg ha ⁻¹	-	-	-	22,8	-	-	-	-
Aceite de naranja	kg ha ⁻¹	-	-	-	4,5	-	-	-	-
Bacillus thuringiensis	kg ha ⁻¹	-	-	-	2,7	-	-	-	-
Spinosad	kg ha ⁻¹	-	-	-	0,4	-	-	-	-
Total de pesticidas	kg ha ⁻¹	-	-	37,39	590,8	-	10	36	388
<i>Maquinaria</i>	kg ha ⁻¹								
Duración	h ha ⁻¹	304	-	15,3	175,3	304	11	39	373
Diesel para excavación de embalse	kg ha ⁻¹	5640	-	-	-	5640	-	-	-
Diesel para operaciones de campo	kg ha ⁻¹	455	-	92	1081	455	26	125	1256

*Nota: Media de ciclo de vida (25 años).

4. Resultados y discusión

4.1 Impacto ambiental de los sistemas de producción de pomelo.

En este apartado se muestra el impacto ambiental de los sistemas de cultivo de pomelo evaluados durante todo su ciclo de vida. Las tablas 5 y 6, detallan las cifras de los indicadores ambientales de los sistemas de producción de pomelo ecológico y convencional para las dos unidades funcionales seleccionadas (ha y t), así como la variación de impacto entre ambos sistemas (expresada como la diferencia porcentual de impacto del ecológico frente al convencional).

4.1.1 Resultados por hectárea

La Tabla 5 presenta el impacto ambiental de los sistemas de producción de pomelo por hectárea. En todas las categorías de impacto evaluadas, el sistema ecológico presenta huella de carbono y ambiental más bajas que el convencional. La reducción de impacto derivada de cultivar pomelo ecológico en lugar de convencional por ha varía desde 10,3% para FOE hasta 38,2% para AOE (con una reducción media del 19,3% para todas las categorías juntas).

Los mayores impactos ambientales del sistema convencional están relacionados con el mayor consumo por ha de insumos como agua, electricidad y fertilizantes, así como con el uso de productos fitosanitarios sintéticos (Tabla 4).

Tabla 5. Impacto ambiental de los sistemas de producción de pomelo por ha. La variación (Δ) se calcula como $[(\text{impacto ecológico} / \text{impacto convencional}) - 1] \times 100$.

Impacto	Unidad	Ecológico	Convencional	Δ (%)
HUC	kg CO ₂ eq	2,77 x 10 ⁵	3,29 x 10 ⁵	-15,8
EAD	kg 1,4-DCB	1,91 x 10 ⁴	2,18 x 10 ⁴	-12,6
ETF	kg P eq	1,63 x 10 ²	2,09 x 10 ²	-22,3
ACT	kg SO ₂ eq	1,73 x 10 ³	2,08 x 10 ³	-16,9
AOE	kg CFC-11 eq	1,05	1,70	-38,2
FOE	kg NO _x eq	1,10 x 10 ³	1,22 x 10 ³	-10,3

4.1.2 Resultados por tonelada

La Tabla 6 presenta el impacto ambiental de los sistemas de producción de pomelo por tonelada. Los resultados por t también muestran una menor huella ambiental del sistema ecológico, aunque las diferencias entre ellos fueron sustancialmente menores.

En este caso, la reducción del impacto oscila entre 0,2% para FOE y 31,2% para AOE (con una reducción media de 10,2% para todas las categorías juntas, Tabla 6). Esto se debe a que los impactos ambientales por t están directamente relacionados con la productividad, que es un 10% menor en el sistema ecológico (Tabla 2), a pesar de tener el mismo cultivar y densidad de plantación que el sistema convencional.

Tabla 6. Impacto ambiental de los sistemas de producción de pomelo por t. La variación (Δ) se calcula como $[(\text{impacto ecológico} / \text{impacto convencional}) - 1] \times 100$.

Impacto	Unidad	Ecológico	Convencional	Δ (%)
HUC	kg CO ₂ eq	1,90 x 10 ²	2,02 x 10 ²	-6,3
EAD	kg 1,4-DCB	1,31 x 10 ¹	1,34 x 10 ¹	-2,7
ETF	kg P eq	1,11 x 10 ⁻¹	1,29 x 10 ⁻¹	-13,5
ACT	kg SO ₂ eq	1,18	1,28	-7,5
AOE	kg CFC ⁻¹¹ eq	7,19 x 10 ⁻⁴	1,05 x 10 ⁻³	-31,2
FOE	kg NO _x eq	7,52 x 10 ⁻¹	7,53 x 10 ⁻¹	-0,2

4.2. Identificación de los procesos con mayor impacto ambiental.

La Tabla 7 muestra las principales emisiones al aire (CO₂ y N₂O) causadas por la producción y el consumo de energía eléctrica para el riego, así como por la manufactura y la aplicación de abonos. Las emisiones de cobre y fosfato a las aguas subterráneas y de dióxido de azufre al aire procedentes de la electricidad consumida durante la producción, distribución y aplicación al campo de AMD son los principales contaminantes en las categorías de ecotoxicidad y eutrofización del agua dulce y acidificación terrestre, respectivamente. El agotamiento del ozono estratosférico se determina en función de las emisiones de monóxido de di nitrógeno al aire debidas principalmente a la fabricación y

aplicación de fertilizantes nitrogenados. La categoría de formación de ozono se debe principalmente a las emisiones de óxidos de nitrógeno al aire causadas sobre todo por la electricidad consumida en las fases relacionadas con la producción y el uso de AMD (Tabla 7).

Tabla 7. Flujos elementales, sistema, y procesos principales de los sistemas de cultivo para cada categoría de impacto.

Categorías de impacto	Flujo elemental	Sistema	Principales procesos
HUC	CO ₂ , N ₂ O	Aire	Riego y fertilizantes
EAD	Cu	Aguas subterráneas	Riego
ETF	PO ₄ ³⁻	Aguas subterráneas	Riego y fertilizantes
ACT	SO ₂	Aire	Riego y fertilizantes
AOE	N ₂ O	Aire	Fertilizantes
FOE	NO _x	Aire	Riego

Las figuras 11 y 12 muestran las contribuciones de los cuatro procesos analizados (riego, fertilizantes, pesticidas y maquinaria) a las categorías de impacto seleccionadas en la fase de producción completa de los sistemas de pomelo evaluados.

El riego es el principal contribuyente a la mayoría de las categorías, representa hasta el 95,2% para EAD y el 85,35 % para FOE en el sistema ecológico (Figura 11). Esto se debe principalmente al elevado consumo de electricidad para la producción y distribución de AMD (4,5 kWh m⁻³).

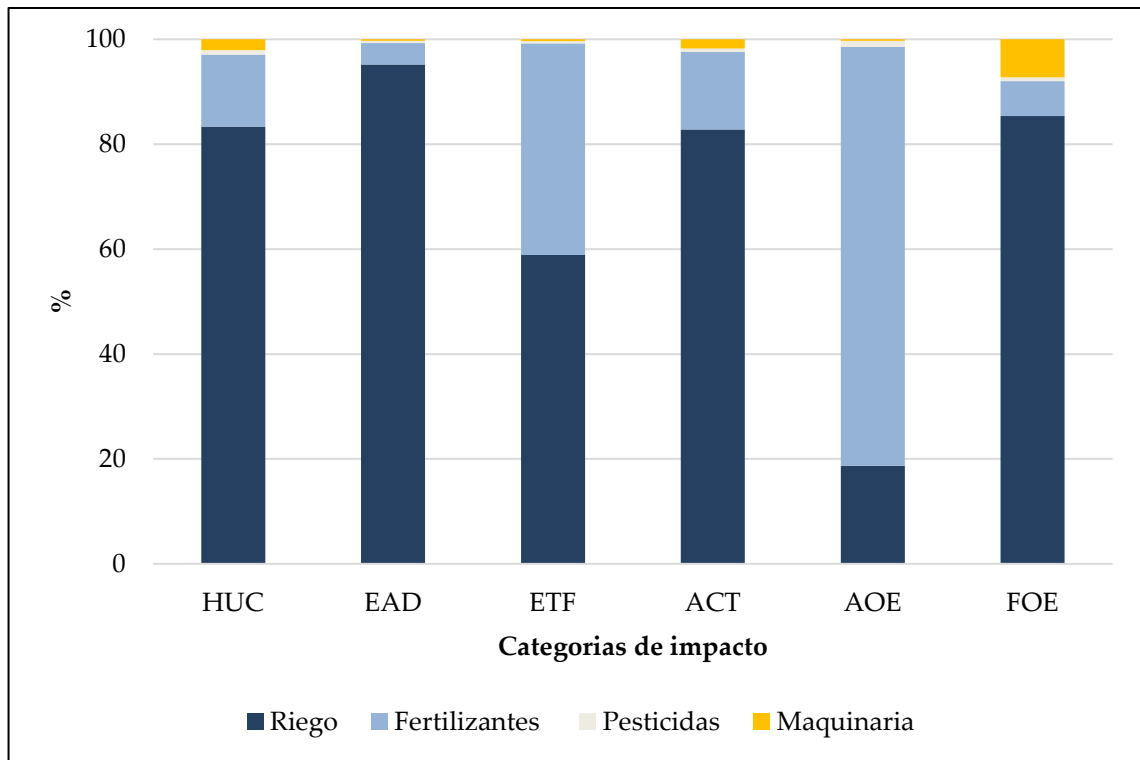


Figura 11. Contribución de los procesos en cada categoría de impacto para el sistema de pomelo ecológico.

El proceso relativo a los fertilizantes domina la categoría de impacto AOE en los dos sistemas, ya que es la principal fuente de emisiones de N_2O al aire, con una contribución máxima del 86,71% en el sistema convencional (Figura 12).

Los pesticidas y la maquinaria agrícola presentan las contribuciones más bajas en ambos sistemas. En particular, los pesticidas tienen los impactos más bajos en el sistema ecológico, debido a los bajos impactos de la fabricación de los productos fitosanitarios biológicos (con una contribución mínima del 0,42% al ETF, y una contribución máxima del 1,14 % al AOE) (Figura 11).

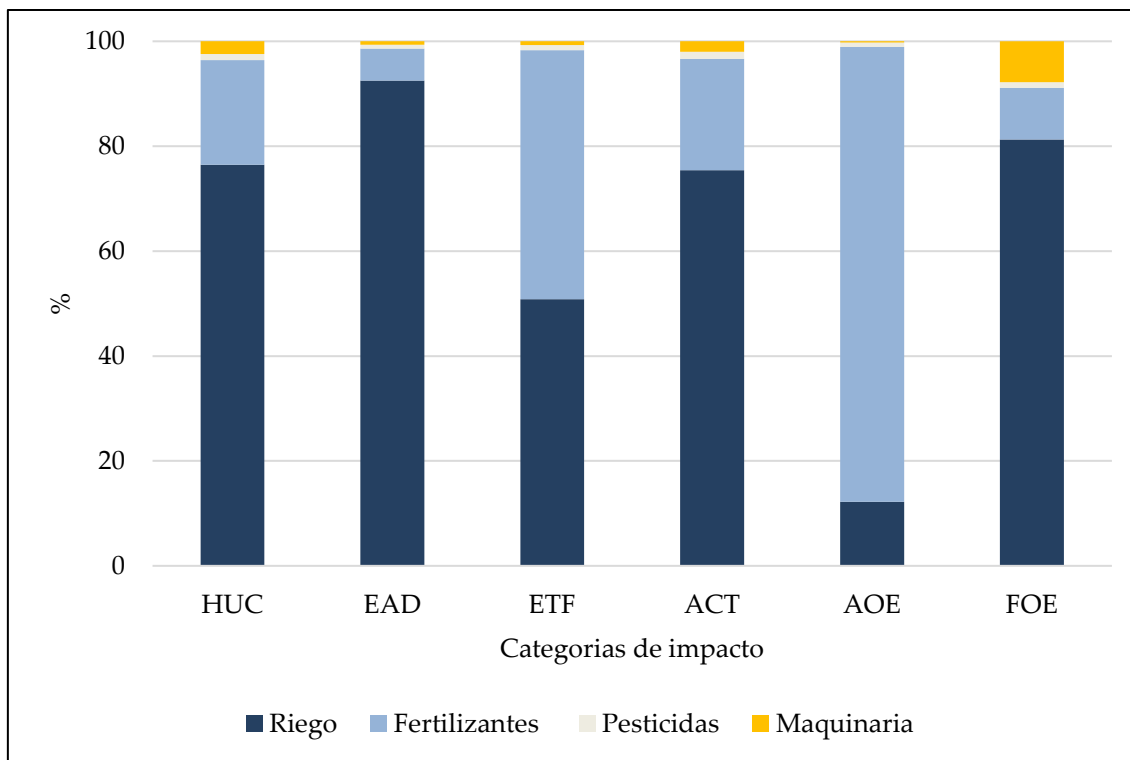


Figura 12. Contribución de los procesos en cada categoría de impacto para el sistema de pomelo convencional.

4.3. Discusión

El sistema ecológico de pomelo ha mostrado mejores resultados que el sistema convencional en todas las categorías de impacto y tanto para UF de superficie (ha) como en UF de masa producida (t). El mejor resultado del sistema ecológico es menos evidente en el caso de la UF de masa producida (es decir, impactos por tonelada), ya que el rendimiento es un 10% inferior al del sistema convencional, a pesar de utilizar el mismo cultivar y la misma densidad de plantación. Nuestros resultados están en línea con estudios previos que comparan los cultivos de cítricos ecológicos y convencionales por ha, como Pergola et al. (2013) para el limón y la naranja en Italia, Ribal et al. (2017) para la producción de naranja en España y Nicolo et al. (2018) para la clementina en España e Italia. En cuanto a los resultados por masa UF, Bonales-Revuelta et al. (2022) señalaron que la producción ecológica de naranja en México tuvo mejor resultado que la producción convencional en la mayoría de las categorías de impacto. Sin embargo, Ribal et al. (2017) no encontraron diferencias para algunas categorías de impacto, debido a la alta variabilidad de producción de los sistemas estudiados. Para otros sistemas de cultivo,

numerosos estudios han revelado menores impactos en el sistema convencional por masa UF (por ejemplo, Foteinis y Chatzisyneon, 2016; Ben Abdallah et al., 2022; Coppola et al., 2022; Viana et al., 2022). En nuestro caso de estudio, la diferencia de producción entre los dos sistemas no es lo suficientemente significativa como para invertir los resultados por t UF.

El uso del ACV para comparar el impacto ambiental de los sistemas agrícolas ecológicos frente a los convencionales sigue siendo un tema controvertido y objeto de discusión y debate científico (Meier et al., 2015; van der Werf et al., 2020; Montemayor et al., 2022). En general, existe consenso en que los sistemas ecológicos pueden lograr mejores resultados por unidad de superficie cultivada, principalmente debido a las restricciones en el tipo y las cantidades de insumos contaminantes (energía, fertilizantes, plaguicidas, etc.). Sin embargo, los resultados por tonelada producida podrían ser los contrarios, como ya se ha señalado, en el caso de muchos sistemas agrícolas (Meier et al., 2015; van der Werf et al., 2020; Montemayor et al., 2022). Estos resultados se atribuyeron a menudo a la productividad de los sistemas estudiados, que se ve fuertemente afectada por determinadas características del sistema de cultivo. De hecho, la productividad de los cultivos leñosos puede variar en función de la densidad de plantación, el cultivar utilizado, las cantidades de insumos aplicados y el tipo de productos químicos permitidos (Pergola et al., 2013; Ben Abdallah et al., 2021; Coppola et al., 2022). Estas características específicas, entre otras, no suelen considerarse adecuadamente en los ACV comparativos entre sistemas de agricultura ecológica y convencional, a la hora de establecer el objetivo y el alcance y de analizar el inventario (Meier et al., 2015). Para un análisis más preciso y una comparación justa, los sistemas deben tener características similares y valores de producción comparables.

Los valores absolutos de la huella mostrados en este estudio para la producción ecológica y convencional son significativamente más altos que en otros sistemas de producción frutícola que utilizan recursos hídricos convencionales (p. ej., Pergola et al., 2013; Ribal et al., 2017; Bonales-Revuelta et al., 2022). Por ejemplo, la huella de carbono de la producción de pomelo en este estudio oscila entre 190 y 202 kg CO₂eq t⁻¹ frente a los 36 y 123 kg CO₂eq t⁻¹ de la producción de naranja en México (Bonales-Revuelta et al., 2022). El uso de AMD incrementa notablemente el impacto ambiental del riego (Figuras 11 y 12), debido al elevado consumo energético de la ósmosis inversa (OI) en las plantas desalinizadoras. El alto coste energético (y por tanto ambiental) de la

desalinización por OI (Fayyaz et al., 2023) ha sido demostrado en estudios anteriores de ACV (Aziz y Hanafiah, 2021).

5. Conclusiones y recomendaciones

Las principales conclusiones de este estudio son:

- La huella de carbono es mayor en el sistema de producción convencional, así como la huella ambiental en todas las categorías de impacto, tanto por unidad superficie de producción (ha) como por masa producida (t).
- El impacto ambiental es sustancialmente mayor (aumento medio del 19,3% para todas las categorías juntas) en la producción convencional por hectárea cultivada. Esto se debe principalmente al hecho de que el consumo de insumos por ha (agua, electricidad, fertilizantes y productos fitosanitarios sintéticos) es mayor en comparación con la producción ecológica.
- Si comparamos los resultados por tonelada producida, se observa una menor diferencia en el impacto en la producción ecológica frente a la convencional (reducción media de 10,2% para todas las categorías juntas). Esto se debe al rendimiento de la agricultura ecológica, que es un 10% menor en comparación a la convencional, pese a tener la misma extensión y densidad de plantación.
- Entre los principales procesos estudiados (riego, fertilizantes, pesticidas y maquinaria) destaca el riego como el más contaminante. La obtención y distribución de agua de mar desalinizada supone un elevado gasto energético (4,5 kWh m⁻³). Los impactos derivados más notables son la ecotoxicidad del agua (EAD) y la formación de ozono (FOE). El siguiente proceso más contaminante son los fertilizantes, por la cantidad de emisiones de N₂O al medio ambiente, siendo el agotamiento de la capa de ozono estratosférico (AOE) el impacto con mayor peso para los sistemas de producción estudiados.

Para mitigar la huella ambiental del riego con AMD, el uso de energías alternativas para la producción de AMD ha mostrado resultados prometedores (Raluy et al., 2006; Biswas, 2009 y Najjar et al., 2022). Najjar et al. (2022) evaluaron escenarios con diferentes fuentes de energía para el funcionamiento de una planta desalinizadora de agua de mar por OI, consistentes en una combinación de combustibles fósiles y energías renovables (red eólica, red fotovoltaica y red de digestión anaerobia). Todas estas combinaciones mostraron mejoras significativas en los impactos ambientales para todos

los escenarios, con los mejores resultados para la energía eólica. Aunque se espera que las energías alternativas sustituyan a las fuentes de energía convencionales, principalmente a los combustibles no renovables para 2050 (IRENA, 2018), la integración de estas fuentes todavía se enfrenta a desafíos relacionados con los altos costes económicos y las desigualdades de distribución geoespacial (Aziz y Hanafiah, 2021). Por lo tanto, se recomienda la combinación de energía limpia y convencional, en particular combinaciones de digestión anaeróbica-red, para la reducción de la huella de carbono en las partes del mundo donde la dependencia total de una sola fuente plantea desafíos significativos (Najjar et al., 2022).

6. Bibliografía

- Ailimpo, 2023. La Asociación Interprofesional de Limón y Pomelo. Huella de carbono del sector del limón y pomelo de España. http://www.ailimpo.com/documentos/Huella_de_carbono_del_sector_del_limon_espanol.pdf
- Alig, M., Gaillard, G., Müller, G., 2008. LCM in agriculture: enhancing the self-responsibility of farmers. In: Nemecek, T., Gaillard, G. (Eds.), 6th Int. Conf. on LCA in the Agri-Food Sector. Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, pp. 312–317.
- Audsley, M., E., Alber, S., Clift, R., Cowell, S., Crettaz, P., Gaillard, G., Hausheer, J., van Zeijts, H., 1997. Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture. Final Report Concerted Action AIR3-CT94–2028. European Commission DG VI Agriculture, UK.
- Aziz, N.I.H.A., Hanafiah, M.M., 2021. Application of life cycle assessment for desalination: progress, challenges and future directions. *Environ. Pollut.* 268, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115948>.
- Beccali, M., Cellura, M., Iudicello, M., Mistretta, M., 2009. Resource Consumption and Environmental Impacts of the Agrofood Sector: Life Cycle Assessment of Italian Citrus-Based Products. *Environ Manage.* 43, 707–724.
- Beccali, M., Cellura, M., Iudicello, M., Mistretta, M., 2010. Life cycle assessment of Italian citrus-based products. Sensitivity analysis and improvement scenarios. *J. Environ. Manag.* 91, 1415–1428. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.02.028>.
- Ben Abdallah, S., Elfkih, S., Suarez-Rey, E.M., Parra-López, C., Romero-Gámez, M., 2021. Evaluation of the environmental sustainability in the olive growing systems in Tunisia. *J. Clean. Prod.* 282, 124526.
- Ben Abdallah, S., Parra-López, C., Elfkih, S., Suarez-Rey, E.M., Romero-Gámez, M., 2022. Sustainability assessment of traditional, intensive and highly-intensive olive growing systems in Tunisia by integrating Life Cycle and Multicriteria Decision analyses. *Sustain. Prod. Consum.* 33, 73-83.
- Biswas, W.K., 2009. Life cycle assessment of seawater desalination in western Australia. *Eng. Technol.* 56, 231–237.
- Bonales-Revuelta, J., Musule, R., Navarro-Pineda, F.S., García, C.A., 2022. Evaluating the environmental performance of orange production in Veracruz, Mexico: a life cycle assessment approach. *J. Clean. Prod.* 343, 131002. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131002>.
- Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Kuhlmann, H., 2000. Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. *Int. J. Life Cycle Assess.* 5 (6), 349–357.
- Cabot, M.I., Lado, J., Clemente, G., Sanjuán, N., 2022. Towards harmonised and regionalised life cycle assessment of fruits: A review on citrus fruit. *Sustain. Prod. Consum.* 33, 567-585.
- Cabot, M.I., Lado, J., Sanjuán, N., 2023. Multi-season environmental life cycle assessment of lemons: A case study in south Uruguay. *J. Environ. Manage.* 326, 116719.

- CARM, 2022. Regional Statistical Center of Murcia. Evolution of cropland area ([In Spanish]). Available on: <https://econet.carm.es/>.
- Çetiner, H., 2022. Citrus disease detection and classification using based on convolution deep neural network. *Microprocess. Microsyst.* 95, 104687.
- Coppola, G., Costantini, M., Fusi, A., Ruiz-Garcia, L., Bacenetti, J., 2022. Comparative life cycle assessment of conventional and organic hazelnuts production systems in Central Italy. *Sci. Total Environ.* 826, 154107.
- Du, Y., 2019. Economic, Energy, Exergo-Economic, and Environmental Analyses and Multiobjective Optimization of Seawater Reverse Osmosis Desalination Systems with Boron Removal. *Industrial & Engineering Chemistry Research. Ind. Eng. Chem. Res.* 58, 31, 14193–14208.
- Ecoinvent, 2022. Database V. 3.9.1. Swiss Centro for Life Cycle Inventories.
- ESYRCE, 2021. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de cultivos, año 2021. Pag: 78. https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletin_esyrce_2021_tcm30-623734.pdf
- FAO, 2022. Statistics of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). Accessed on 6/03/2023. Available on: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- FAO, 2023. Statistics of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). Accessed on 6/03/2023. Available on: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- Fayyaz, S., Masjedi, S.K., Kazem, A., Khaki, E., Moeinaddini, M., Olsen, S.I., 2023. Life cycle assessment of reverse osmosis for high-salinity seawater desalination process: Potable and industrial water production. *J. Clean. Prod.* 382, 325299.
- Fepex, 2022. Exportación/ importación española de frutas y hortalizas (Fepx). Accessed on 12/12/2022. Aviable on: <https://www.fepex.es/datos-del-sector/exportacion-importacion-esp%C3%B1ola-frutas-hortalizas>
- Foteinis, S., Chatzisyneon, E., 2016. Life cycle assessment of organic versus conventional agriculture. A case study of lettuce cultivation in Greece. *J. Clean. Prod.* 112, 2462-2471. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.075>.
- Fuentes-Ponce, M.H., Gutiérrez-Díaz, J., Flores-Macías, A., González-Ortega, E., Mendoza, A.P., Sánchez, L., M.R., Novotny, I., Espíndola. I., P.M., 2022. Direct and Indirect Greenhouse Gas Emissions under Conventional, Organic, and Conservation Agriculture. *Agric Ecosyst Environ.* 340, 108148.
- García García, J. 2014. Análisis del sector del limonero y evaluación económica de su cultivo. Murcia: Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia. 148 pp. Available in : <https://www.imida.es/-/analisis-del-sector-del-limonero-y-evaluacioneconomica-de-su-cultivo>.
- García García, J., 2018. Estructura de costes de las orientaciones productivas agrícolas de la Región de Murcia: frutales de hueso y cítricos. 134 pp. Avialable in: <https://sftt.info/070618/descargas/01.pdf>.
- Harding, K. G., & Harrison, S. T. L., 2016a. Generic flow sheet model for early inventory

- estimates of industrial microbial processes. I. Flowsheet development, microbial growth and product formation. *South African J. Chem. Eng.* 22, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2016.10.003>.
- Harding, K. G., & Harrison, S. T. L., 2016b. Generic flowsheet model for early inventory estimates of industrial microbial processes. II. Downstream processing. *South African J. Chem. Eng.* 22, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2016.10.002>.
- Hersener, J.-L., Baumgartner, D., Dux, D., Aeschbacher, U., Alig, M., Blaser, S., et al., 2011. Zentrale Auswertung von Ökobilanzen Landwirtschaftlicher Betriebe (ZA-ÖB). Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich/Ettenhausen, Switzerland.
- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R., 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 138-147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.
- IRENA, 2018. *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- ISO International Organization for Standardization, 14040, 2006a. *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. ISO, Geneva.
- ISO International Organization for Standardization, 14044, 2006b. *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*. ISO, Geneva.
- Kumar, A., Vachan Tirkey, J., Kumar Shukla, S., 2021. Comparative energy and economic analysis of different vegetable oil plants for biodiesel production in India. *Renew Energy.* 169, 266–282. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.128>.
- Lee, K.S.; Choe, Y.C.; Park, S.H., 2015. Measuring the environmental effects of organic farming: a meta-analysis of structural variables in empirical research. *Journal Environ. Manage.* 162, 263-274.
- Lynch, D., 2009. Environmental impacts of organic agriculture: a Canadian perspective. *Can. J. Plant Sci.* 89, 621-628.
- Maestre-Valero, J.F., Martin-Gorriz, B., Nicolas, E., Martinez-Mate, M.A., Martinez-Alvarez, V., 2018. Deficit irrigation with reclaimed water in a citrus orchard. Energy and greenhouse-gas emissions analysis. *Agric. Syst.* 159, 93-102.
- MAPA, 2020. *Análisis de la Caracterización y Proyección de la Producción Ecológica en España en 2020*. https://www.mapa.gob.es/es/alimentacion/temas/produccion-eco/informecaracterizacionecologicos2020-nipodef_tcm30-583131.PDF.
- MAPA, 2022. *Avance de datos de Cítricos, 2021* ([In Spanish]). <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/superficies-producciones-anuales-cultivos/>.
- Márquez, L., 2004. *Maquinaria Agrícola*. B&H editores S.L., Madrid ([In Spanish]).
- Martínez-Alcantara, B., Quiñones, A., Forner-Giner, M.A., Iglesias, D.J., Primo-Millo, E., Legaz, F., 2012. Impact of fertilizer-water management on nitrogen use efficiency and potential nitrate leaching in citrus trees. *Soil Sci. Plant Nutr.* 58 (5), 659-669. <https://doi.org/10.1080/00380768.2012.733678>.

- Martínez-Alvarez, V., González-Ortega, M.J., Martín-Gorriz, B., Soto-García, M., Maestre-Valero, J.F., 2017. The use of desalinated seawater for crop irrigation in the Segura River Basin (south-eastern Spain). *Desalination*. 422, 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.08.022>.
- Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, J.F., González-Ortega, M.J., Gallego-Elvira, B., Martín-Gorriz, B., 2019. Characterization of the Agricultural Supply of Desalinated Seawater in Southeastern Spain. *Water*. 11 (6), 1233.
- Martin-Gorriz, B., Gallego-Elvira, B., Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, J.F., 2020. Life cycle assessment of fruit and vegetable production in the Region of Murcia (southeast Spain) and evaluation of impact mitigation practices. *J. Clean. Prod.* 265, 121656. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121656>.
- Meier, M.S., Stoessel, F., Jungbluth, N., Juraske, R., Schader, C., Stolze, M., 2015. Environmental impacts of organic and conventional agricultural products - Are the differences captured by life cycle assessment? *J. Environ. Manage.* 149, 193-208.
- MITECO, 2022. Datos del ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (In Spanish)]. Available on: <https://www.miteco.gob.es/>
- Montemayor, E., Andrade, E.P., Bonmatí, A., Antón, A., 2022. Critical analysis of life cycle inventory datasets for organic crop production systems. *Int. J. LCA*. 27, 543–563.
- Mouron, P., Nemecek, T., Scholz, R.W., Weber, O., 2006. Management influence on environmental impacts in an apple production system on Swiss fruit farms: combining life cycle assessment with statistical risk assessment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 114, 311–322.
- Najid, N., Fellaou, S., Kouzbour, S., Gourich, B., Ruiz-García, A., 2021. Energy and environmental issues of seawater reverse osmosis desalination considering boron rejection: A comprehensive review and a case study of exergy analysis. *Process Saf Environ Prot.* 156, 373-390.
- Najjar, E., Al-Hindi, M., Massoud, M., Saad, W., 2022. Life cycle assessment and cost of a seawater reverse osmosis plant operated with different energy sources. *Energy Convers. Manag.* 268, 115964.
- Nemecek, T., Kagi, T., 2007. Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. Zürich. EcoInvent report No.15.
- Nicolo, B. F., De Salvo, M. C., Ramirez-Sanz, C., Estruch, V., Sanjuan, N., Falcone, G., Strano, A., 2018. Life cycle assessment applied to different citrus farming systems in Spain and Italy. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(10), 1092-1105. doi:10.1080/21683565.2018.1490942.
- Pergola, M., D'Amico, M., Celano, G., Palese, A.M., Scuderi, A., Di Vita, G., Pappalardo, G., Inglese, P., 2013. Sustainability evaluation of Sicily's lemon and orange production: an energy, economic and environmental analysis. *J. Environ. Manage.* 128, 674–682. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.007>.
- Raluy, G., Serra, L., Uche, J., 2006. Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies. *Energy*. 31, 2361–2372. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.02.005>.
- REGLAMENTO (UE) 2018/848 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 30 de mayo de 2018 sobre producción ecológica y etiquetado de los productos ecológicos y por el que se deroga el Reglamento (CE) n.o. 834/2007 del Consejo.

- Ribal, J., Estruch, V., Clemente, G., Fenollosa, M.L., Sanjuán, N., 2019. Assessing variability in carbon footprint throughout the food supply chain: a case study of Valencian oranges. *Int. J. Life Cycle Assess.* 24, 1515–1532. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-01580-9>.
- Ribal, J., Ramírez-Sanz, C., Estruch, V., Clemente, G., Sanjuán, N., 2017. Organic versus conventional citrus. Impact assessment and variability analysis in the Comunitat Valenciana (Spain). *Int J Life Cycle Assess.* 22, 571–586.
- Tendall, D.M., Gaillard, G., 2015. Environmental consequences of adaptation to climate change in Swiss agriculture: An analysis at farm level. *Agric. Syst.* 132, 40–51.
- Tran-Nam, Q., Tiet, T., 2022. The role of peer influence and norms in organic farming adoption: Accounting for farmers' heterogeneity. *Journal. Environ. Manage.* 320, 115909.
- Tuomisto, H.L., Hodge, I.D., Riordan, P., Macdonald, D.W., 2012. Does organic farming reduce environmental impacts? A meta-analysis of European research. *Journal. Environ. Manage.* 112, 309-320.
- van der Werf, H.M.G., Knudsen, M.T., Cederberg C., 2020. Towards better representation of organic agriculture in life cycle assessment. *N at. Sustain.* 3, 419-425.
- Viana, L.R., Dessureault, P.L., Marty, C., Loubet, P., Levasseur, A., Boucher, J.F., Paré, M.C., 2022. Would transitioning from conventional to organic oat grains production reduce environmental impacts? A LCA case study in North-East Canada. *J. Clean. Prod.* 349, 131344.