



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

**Programa de Doctorado en Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y del
Desarrollo Rural Sostenible**

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE OLIVAR TRADICIONAL,
ECOLÓGICO E INTENSIVO EN TÚNEZ: ESTRATEGIAS DE
MEJORA E INNOVACIÓN**

Ph. D THESIS

**A SUSTAINABILITY COMPARATIVE ASSESSMENT OF
TRADITIONAL, ORGANIC AND INTENSIVE OLIVE PRODUCTION
SYSTEMS IN TUNISIA: IMPROVEMENT AND INNOVATION
STRATEGIES**

Saker Ben Abdallah

**Directores:
Dr. Carlos Parra López
Dra. Saida Elfkih**

Córdoba, 29 de octubre de 2021

TITULO: *EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE OLIVAR TRADICIONAL, ECOLÓGICO, E INTENSIVO EN TÚNEZ: ESTRATEGIAS DE MEJORA E INNOVACIÓN*

AUTOR: *Saker Ben Abdallah*

© Edita: UCOPress. 2022
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/ucopress@uco.es>



TÍTULO DE LA TESIS: Evaluación comparativa de la sostenibilidad de los sistemas de producción de olivar tradicional, ecológico e intensivo en Túnez: estrategias de mejora e innovación

DOCTORANDO/A: Saker Ben Abdallah

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

El doctorando, Saker Ben Abdallah, con la elaboración del presente documento ha finalizado satisfactoriamente el trabajo de investigación presentado para optar al grado de Doctor por la Universidad de Córdoba (UCO), dentro del programa de doctorado en Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y del Desarrollo Rural Sostenible.

El objetivo de la tesis doctoral ha sido evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera más importantes de Túnez, incluyendo sistemas tradicionales e innovadores, ecológicos y convencionales. Se han tenido en consideración las diferentes prácticas agronómicas implementadas en cada sistema. El fin último es proporcionar información útil para la definición de políticas y estrategias hacia una mayor sostenibilidad del olivar en el país.

En el proceso de realización del trabajo el doctorando ha adquirido una serie de competencias tanto a nivel teórico, con la asimilación de diferentes metodologías (métodos multicriterio, métodos de ciclo de vida, estadística, entre otras), y a nivel aplicado, con un profundo conocimiento de la realidad del sector olivarero en Túnez. En resumen, el doctorando ha planificado, ejecutado y concluido adecuadamente el trabajo de investigación asociado a la presente tesis doctoral.

Los resultados obtenidos han sido difundidos, tanto nacional como internacional, como se detalla en la siguiente relación de publicaciones y de contribuciones presentadas en congresos.

Publicaciones en revistas de impacto:

- Ben Abdallah, S.; Elfkih, S.; Suárez-Rey, E.M.; Parra-López, C.; Romero-Gámez, M. (2021). "Evaluation of the environmental sustainability in the olive growing systems in Tunisia". *Journal of Cleaner Production*, 282: 124526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124526>.
- Ben Abdallah, S.; Elfkih, S.; Parra-López, C. (2018). "A sustainability comparative assessment of Tunisian organic and conventional olive growing systems based on the AHP methodology". *New Medit*, 17(3): 51-68. <https://doi.org/10.30682/nm1803e>.

- Ben Abdallah, S.; Parra-López, C.; Elfkih, S.; Suárez-Rey, E.M.; Romero-Gómez, M. (en revisión). "Life cycle sustainability assessment of olive growing systems in Tunisia using an integrated framework of Life Cycle and Multicriteria Decision analyses". Resources, Conservation & Recycling.

Artículos en revistas sectoriales:

- Ben Abdallah, S.; Parra-López, C.; Elfkih, S.; Suárez-Rey, E.M.; Romero-Gómez, M. (2021). "Análisis ambiental de la producción olivarera en Túnez". Olinerca.

Comunicaciones y ponencias en Congresos y Jornadas:

- Ben Abdallah, S.; Elfkih, S.; Suárez-Rey, E.M.; Parra-López, C.; Romero-Gómez, M. (2022). "Carbon footprint of innovative olive-growing systems and practices in Tunisia". 7th Farming System Design Symposium. 20-23 Marzo. Hammamet, Túnez. Presentación oral.
- Ben Abdallah, S. (2021). "Impacto ambiental del cultivo del olivar en la región mediterránea". Jornada 'Situación Actual de la Olivicultura'. Caja Rural. Granada, 26 oct. Presentación oral.
- Ben Abdallah, S.; Parra-López, C.; Elfkih, S.; Suárez-Rey, E.M.; Romero-Gómez, M. (2021). "Evaluación económica y ambiental de sistemas innovadores de producción olivarera en Túnez". XIII Congreso de Economía Agroalimentaria de la Asociación Española de Economía Agroalimentaria (AEEA). Cartagena (Murcia). 1-3 sept. Presentación oral.
- Ben Abdallah, S.; Elfkih, S.; Suárez-Rey, E.M.; Parra-López, C.; Romero-Gómez, M. (2021). "Huella de carbono y eutrofización asociadas al cultivo de olivar tradicional en Túnez". I Congreso Anual de Estudiantes de Doctorado (CAED). Universidad Miguel Hernández. Elche, Alicante. 2 febrero.
- Ben Abdallah, S.; Parra-López, C.; Romero-Gómez, M. (2020). "Análisis del ciclo de vida de la producción de aceitunas en Túnez". II Congreso Internacional Multidisciplinar de Investigadores en Formación (CIMIF'20). Universidad de Córdoba. 30 nov - 4 dic.
- Ben Abdallah, S., Elfkih, S., Parra-López, C. (2017). "Evaluation de la performance environnementale associée à l'oléiculture biologique et conventionnelle en Tunisie". Expoliva 2017. XVIII Simposium Científico-Técnico. Jaén. 10-13 mayo. Poster.
- Elfkih, S., Ben Abdallah, S., Parra-López, C. (2016). "Durabilité des systèmes de production agricole: discussion conceptuelle et une application de la méthode AHP au cas de l'oléiculture en Tunisie". Colloque International LESOR'2016. Ile de Djerba, Tunisie. 3-5 May. Poster. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1430.5680>.

Por todo lo anterior, los directores autorizamos la presentación de la Tesis Doctoral.

Córdoba, 29 de octubre de 2021

Firma del/de los director/es

Fdo.: Carlos Parra López

Fdo.: Saida Elfkih



TÍTULO DE LA TESIS: Evaluación comparativa de la sostenibilidad de los sistemas de producción de olivar tradicional, ecológico e intensivo en Túnez: Estrategias de mejora e innovación

DOCTORANDO/A: Saker Ben Abdallah

INFORME RAZONADO DEL TUTOR

(Ratificando el informe favorable del director. Sólo cuando el director no pertenezca a la Universidad de Córdoba).

El doctorando, Saker Ben Abdallah, ha finalizado satisfactoriamente la elaboración del documento que recoge el trabajo de investigación presentado para optar al grado de Doctor por la Universidad de Córdoba (UCO), dentro del programa de doctorado en Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y del Desarrollo Rural Sostenible.

El objetivo de la tesis doctoral ha sido evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera más importantes de Túnez, incluyendo sistemas tradicionales e innovadores, ecológicos y convencionales, y teniendo en consideración las diferentes prácticas agronómicas implementadas en cada sistema, con el fin último de proporcionar información útil para la definición de políticas y estrategias hacia una mayor sostenibilidad del olivar en el país. El doctorando ha planificado, ejecutado y concluido adecuadamente el trabajo de investigación asociado a la presente Tesis Doctoral.

Los resultados obtenidos en la Tesis Doctoral han sido difundidos, tanto nacional como internacionalmente.

En mi papel de tutora, ratifico el correspondiente Informe de los directores, en el que se autoriza la defensa de la Tesis doctoral.

Córdoba, 27 de octubre de 2021

Firma del responsable de línea de investigación

Fdo.: Rosa Gallardo Cobos

*A mes chers parents... ce travail est le fruit de vos sacrifices,
de vos peines et de vos efforts
A mes frères Haithem, Bilel et Mohammed
A ma chère Tunisie
Je vous aime...*

Agradecimientos

Esta Tesis Doctoral se ha realizado en dos instituciones de investigación: el **Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica – IFAPA** (Área de Economía de la Cadena Alimentaria) y el **Instituto del Olivar de Túnez** (Laboratorio de Mejora de la Productividad del Olivo y de la Calidad del Producto).

En primer lugar, quiero expresar mi profundo agradecimiento y respeto a mis directores, **Dr. Carlos Parra López**, y **Dra. Saida Elfkhi**, por la especial atención que me han prestado a lo largo de la elaboración de esta tesis doctoral. Les agradezco el tiempo que han compartido conmigo, el gran apoyo y, sobre todo, el enorme esfuerzo científico, pedagógico y personal que han desplegado. Sus orientaciones, consejos y revisiones a lo largo del desarrollo de este trabajo han sido inestimables. A **Carlos Parra López**, investigador titular en el Área de Economía de la Cadena Alimentaria del IFAPA Centro Camino de Purchil, gracias por todo lo que has hecho y has proporcionado como director científico y como amigo para lograr estos resultados tan valiosos en un magnífico ambiente de trabajo. A **Saida Elfkhi**, directora de la Unidad de Estudios Económicos del Instituto del Olivar de Sfax (Túnez), que guío mis primeros pasos en la investigación dentro de su departamento desde mi proyecto fin de carrera, por haberme confiado este tema de investigación proporcionándome los medios necesarios para realizar este trabajo.

Un agradecimiento especial también a la **Dra. Mercedes Romero Gámez**, investigadora en el IFAPA Centro Camino de Purchil (Área de Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria), por su esfuerzo en alcanzar todos los objetivos a través del extraordinario desarrollo de la metodología ACV. Mi sincero agradecimiento se dirige también al **Dr. Samir Sayadi**, coordinador del Área de Economía de la Cadena Alimentaria del IFAPA, por sus cualidades humanas, de amistad y científicas a lo largo de mi estancia. Me gustaría agradecerle el tiempo compartido y las buenas acciones que ha realizado. Quiero dar las gracias a la **Dra. Elisa Suárez Rey**, por su contribución en el cumplimiento de los objetivos de este trabajo a través sus consejos, orientaciones y su amable trato con mi persona.

Agradezco al **Dr. Mohieddine Ksantini**, director general del Instituto del Olivar de Túnez, por proporcionarme los medios para la realización del trabajo. También al **Sr. Abdallah Louizi**, técnico jubilado del Instituto por su amabilidad y asistencia técnica. A todo el **personal técnico y administrativo** del IFAPA Centro Camino de Purchil (Granada) y del Instituto del Olivar de Túnez y, en particular a: Carmen Carmona-Torres, Adriana Bertuglia, Inma Casero, Teresa

Soriano, Javier López, Saida Boukriba, Anastasio Villanueva y Monia Kchaw. Gracias por todo el tiempo compartido.

Deseo expresar mi profunda gratitud a todos los **profesores del Máster en Olivicultura y Elaiotecnia de la Universidad de Córdoba** por su labor docente y su contribución al desarrollo de este valioso curso y a todo el personal de la secretaria del máster.

A toda la familia **Parra Carmona, Carlos, Carmen y Javier**, que han compartido conmigo desde mi primera estancia en Granada buenos momentos de alegría, compañía, comida y café. Gracias por todo el tiempo compartido y por el sentimiento de amistad y familia que me habéis brindado. Os deseo de todo corazón una vida llena de prosperidad, amor y éxito.

A todos mis **compañeros y amigos del Máster**, gracias por todo el tiempo que pasamos juntos y por la buena experiencia compartida durante todo el curso.

A mis queridos padres, **Ferjani y Habiba**. Después de **Dios**, ustedes son la razón por la que estoy aquí, y todas las palabras del mundo no pueden expresar todo el amor, sacrificio y devoción que me habéis demostrado. Que Dios os proteja, mi máspreciado bien. A mis queridos hermanos, **Haithem, Bilel, Mohamed, Amira, Soujoud y Zaid**, gracias por estar siempre conmigo, os deseo lo mejor en esta vida.

GRACIAS A TODOS
Saker

Resumen

El cultivo de olivar se extiende por todo el territorio de Túnez. En este país, la producción olivarera para la elaboración de aceite de oliva es la actividad agraria más importante por su trascendencia económica, social y ambiental. La mayoría de los sistemas de cultivo del olivo utilizan técnicas tradicionales de secano cuya productividad es muy baja. Además, las explotaciones olivareras son en su mayoría de pequeño tamaño, empleando a trabajadores ocasionales para tareas eventuales y con un bajo nivel de empleo a largo plazo asociado a un bajo rendimiento económico. El sector olivarero tunecino debe hacer frente a la creciente competitividad internacional optimizando la productividad y la innovación del olivar tradicional. En este sentido, el sector ha experimentado importantes cambios en las últimas décadas en cuanto a las prácticas agrarias utilizadas, evolucionando desde las asociadas a sistemas olivareros tradicionales de baja densidad, a las de nuevos sistemas innovadores de cultivo de alta densidad. Además, el riego y la producción ecológica juegan un papel cada vez más importante en este sector. Los sistemas intensivos tienen mayor productividad, pero pueden generar un alto impacto ambiental. Así, la sostenibilidad de estos sistemas sigue siendo un tema controvertido y fundamental, especialmente en Túnez.

En este contexto, el objetivo principal de esta tesis doctoral es evaluar la sostenibilidad de los diferentes sistemas de producción olivarera existentes actualmente en Túnez con el fin de definir estrategias de mitigación y mejora hacia un manejo más sostenible de los mismos. El trabajo se ha realizado en dos fases:

En la primera fase, se ha llevado a cabo una evaluación comparativa de la multifuncionalidad y sostenibilidad global de dos sistemas de cultivo del olivo, el ecológico y el convencional. La evaluación de la sostenibilidad se ha llevado a cabo basándose en: i) una perspectiva multidimensional, considerando las tres dimensiones de la sostenibilidad -ambiental, económica y socio-territorial; y ii) un enfoque de conocimiento de expertos para seleccionar y evaluar los criterios adecuados de sostenibilidad para comparar ambos sistemas. Para ello, se ha aplicado la metodología del Proceso Analítico Jerárquico - Analytic Hierarchy Process (AHP), una técnica de Análisis de Decisión Multicriterio – Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA), a partir de una encuesta dirigida a un panel de 20 expertos.

En la segunda, se ha realizado una evaluación de la multifuncionalidad y sostenibilidad de los sistemas olivareros, con un mayor nivel de detalle de los mismos (ecológico tradicional, convencional tradicional, intensivo y súper-intensivo). Se han evaluado los sistemas de cultivo

desde la fase de plantación hasta la fase de plena producción y la eliminación de los árboles al final del ciclo de vida, lo que abarca un periodo de 50 años. Así, se han comparado seis sistemas tradicionales, dos sistemas intensivos y uno súper-intensivo, considerando el tipo de cultivo (convencional o ecológico), el manejo del riego (con o sin riego) y el manejo de la fertilización (con o sin fertilización). Las prácticas agrícolas analizadas son el manejo del suelo, los fertilizantes, los pesticidas, la poda y la recolección. Los resultados del análisis se refieren a dos unidades funcionales: 1 tonelada de aceitunas y 1 hectárea de superficie de olivar. En primer lugar, se ha realizado una evaluación ambiental de los sistemas olivareros mediante el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Para analizar la sostenibilidad del Ciclo de Vida de los sistemas de cultivo del olivo se ha desarrollado un marco integrado de Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV) que consta de dos partes metodológicas: 1) Evaluación del ciclo de vida; e 2) Integración mediante el MCDA. En la primera parte, se calculan las categorías de impacto ambiental, económico y social mediante el ACV, el Cálculo de los Costes del Ciclo de Vida (CCV) y el Análisis Social del Ciclo de Vida (ACV-Social), respectivamente. Los datos cuantitativos se recogieron a partir de una encuesta realizada a 250 agricultores y de una revisión bibliográfica. Posteriormente, se aplicó el AHP para priorizar las tres dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, económica y social) y las categorías de impacto y calcular una Puntuación de Sostenibilidad del Ciclo de Vida para cada sistema olivarero. El proceso de priorización se llevó a cabo mediante la consulta a 28 agentes del sector.

Los resultados del análisis multicriterio mediante AHP muestran que el sistema olivarero ecológico es más sostenible que el convencional, si bien se pone de manifiesto la necesidad de incrementar el rendimiento económico del sistema ecológico. Los resultados del ACV indican que los sistemas innovadores (intensivo y súper-intensivo) producen un menor impacto ambiental en todas las categorías con respecto al resto de sistemas desde el punto de vista productivo. En cambio, generan un mayor impacto por hectárea de superficie cultivada. Los fertilizantes y el manejo del suelo son las prácticas agrarias con mayores contribuciones en la mayoría de las categorías de impacto evaluadas. El ASCV de los sistemas de producción olivarera indica que la mayor prioridad se asigna a los aspectos ambientales, seguidos de los económicos y sociales, especialmente, en las categorías de impacto de Agotamiento de los Recursos Hídricos, Tasa Interna de Retorno y Toxicidad Humana. En términos de sostenibilidad, los sistemas ecológicos obtienen mejores puntuaciones por hectárea y los sistemas innovadores por tonelada. Los resultados sugieren, de nuevo, la necesidad de incrementar el rendimiento económico del sistema ecológico a través de estrategias políticas

centradas en: i) la mejora de la productividad mediante la aplicación de buenas prácticas agrarias; ii) el fomento de la demanda de productos ecológicos en el mercado local, esencialmente mediante la mejora de la capacidad de compra del consumidor y su formación; y iii) la adopción de un plan estratégico para explorar nuevos mercados. Además, la afiliación de los agricultores en cooperativas puede ser una solución eficaz para aumentar la baja rentabilidad de los olivares tradicionales. Una gestión más racional del olivar tradicional e innovador (intensivo y súper-intensivo), como por ejemplo desarrollando una normativa de producción integrada, similar a la de la UE, y la implantación de guías de buenas prácticas y programas de formación para los agricultores deberían considerarse líneas prioritarias en el diseño de políticas públicas para el fomento de una producción olivarera más sostenible en Túnez.

A nivel metodológico, la combinación novedosa de las metodologías del Ciclo de Vida y el Análisis de Decisión Multicriterio han permitido definir un marco integrado de ASCV para la evaluación completa de la sostenibilidad de los sistemas agrarios, que puede ser válida para otros sistemas de cultivo y otros casos de estudio.

Abstract

Olive growing is widespread throughout Tunisia. Olive production for the production of olive oil is the most important agricultural activity in Tunisia because of its economic, social and environmental importance. Most of the olive cultivation systems use traditional rain-fed techniques with very low productivity. Moreover, olive farms are mostly small, employing occasional workers for casual tasks and with a low level of long-term employment associated with low economic returns. The Tunisian olive sector has to cope with increasing international competitiveness by optimising productivity and innovation in the traditional olive grove. In this respect, the sector has undergone major changes in recent decades in terms of the agricultural practices used, evolving from those associated with traditional low-density olive growing systems to those of new innovative high-density farming systems. In addition, irrigation and organic production are playing an increasingly important role in this sector. Intensive systems have higher productivity, but can have a high environmental impact. Thus, the sustainability of these systems remains a controversial and fundamental issue, especially in Tunisia.

In this context, the main objective of this PhD thesis is to assess the sustainability of the different olive production systems currently existing in Tunisia in order to define mitigation and improvement strategies towards a more sustainable management of these systems. The work has been carried out in two phases:

In the first stage, a comparative assessment of the overall multifunctionality and sustainability of both organic and conventional olive growing systems was performed. This assessment was undertaken based on: i) a multidimensional perspective considering the three classical dimensions of sustainability – environmental, economic and socio-territorial; and ii) on an experts' knowledge approach selecting the adequate criteria of sustainability to compare both systems. For this purpose, the Analytic Hierarchy Process methodology (AHP), a Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) technique was applied as the adequate framework to fulfil the study objectives based on a survey directed with a panel of 20 experts.

In the second, the multifunctionality and sustainability of olive production was evaluated, with a more detailed analysis of the olive growing systems (traditional organic, traditional conventional, intensive and super-intensive) from the planting phase to the full production phase, during a reference period of the life cycle of the olive growth of 50 years. Six traditional systems, two intensive systems and one super-intensive system were compared and the differences of type of production (conventional or organic), irrigation management and

fertilization management were selected. Field agricultural practices of olive systems are soil management, fertilizers, pesticides, pruning and harvesting. The results of this study are referred to two functional units: 1 ton of olives and 1 hectare of cultivated olive growing area. First, an environmental assessment of the olive systems was carried out using Life Cycle Assessment (LCA). To analyze the Life Cycle sustainability of olive production systems, an integrated Life Cycle Sustainability Assessment framework was developed consisting of two methodological parts: 1) Life Cycle evaluation; and 2) Muticriteria Decision Analysis integration. In the first part, the impact categories are calculated using Life Cycle Assessment, Life Cycle Costing (LCC) and Social-Life Cycle Assessment (Social-LCA). Quantitative data were collected from a survey to 250 farmers and a literature review. Subsequently, the AHP methodology was applied to prioritize the three sustainability dimensions (environmental, economic and social) and impact categories and calculate a Life Cycle Sustainability Score (LCSS) for each olive system. The prioritization process was implemented through consultation with 28 stakeholders.

The results of the multicriteria analysis using AHP show that the organic olive growing system is more sustainable than the conventional one, although the need to increase the economic performance of the organic system is evident. The LCA results indicate that the most innovative olive production systems (intensive and super-intensive) result in less environmental impacts for all categories with respect to the rest of systems from the productive perspective but produce higher impacts per hectare of cultivated area. Fertilizers and soil management are the field agricultural practices that presented the highest contributions in most of the categories evaluated. The LCSA of the olive production systems shows that the highest priority is allocated to environmental aspects, followed by economic and social ones, especially, in the Water Resource Depletion, Internal Rate of Return, and Human Toxicity impact categories. In terms of sustainability, organic systems achieve better scores per ha and innovative systems per ton. The results suggest, again, the need to increase the economic performance of the ecological system through policy strategies focusing on: i) improving productivity through the implementation of good agricultural practices ii) increasing the demand of organic products in the local market, essentially by the improvement of the consumer's purchase capacity and sensibilization and iii) adopting strategic plans to explore new markets. In addition, the integration of farmers into cooperatives could be an effective solution to increase the low profitability of traditional olive groves. A more rational management of traditional and innovative olive groves (intensive and super-intensive), such as the development of integrated

production regulations, similar to those of the EU, and the implementation of best practice guides and training programs for farmers should be considered priorities in the design of public policies for the promotion of a more sustainable olive production in Tunisia.

Methodologically, the novel combination of Life Cycle and Multi-Criteria Decision Analysis methodologies allows the definition of an integrated LCSA framework for the comprehensive assessment of the sustainability of farming systems, which can be used for other farming systems and other case studies.

ÍNDICE GENERAL

Parte I: Aproximación al problema objeto de estudio	31
Capítulo 1	33
Introducción, objetivos y estructura de la tesis	33
1.1. Introducción.....	33
1.2. Objetivos	38
1.3. Estructura de la tesis.....	39
Capítulo 2.....	43
Metodología general de la investigación.....	43
2.1. Fuentes de información	43
2.2. Métodos de análisis	50
Capítulo 3.....	53
Caracterización del sector del olivar y del aceite de oliva y los sistemas de producción en Túnez y las zonas objeto de estudio	53
3.1. El sector del olivar y del aceite de oliva en Túnez.....	53
3.2. Sistemas de producción olivarera en Túnez	58
3.3. Posición mundial y competencia.....	65
3.4. Zonas olivareras objeto de estudio	68
Parte II: Marco conceptual para la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas olivareros	71
Capítulo 4.....	73
Marco conceptual para la evaluación de la sostenibilidad	73
4.1. Concepto de sostenibilidad.....	73
4.2. Evaluación de la sostenibilidad	75
4.3. Metodologías para la evaluación de la sostenibilidad	77
Capítulo 5.....	97
Evaluación de la sostenibilidad del sector de la olivicultura y elaiotecnia.....	97
5.1. Evaluación de la sostenibilidad del sector de la olivicultura y elaiotecnia mediante el Análisis de Decisión Multicriterio.....	97
5.2. Evaluación de la sostenibilidad del sector de la olivicultura y elaiotecnia mediante el Ciclo de Vida (CV).....	102

Parte III: Métodos de análisis, resultados y discusión	121
Capítulo 6.....	123
Evaluación comparativa de la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional en Túnez, mediante la metodología AHP.....	123
6.1. Material y métodos.....	123
6.2. Resultados	130
6.3. Discusión	139
Capítulo 7.....	143
Evaluación de la sostenibilidad ambiental de los sistemas de producción olivarera en Túnez mediante el Análisis del Ciclo de Vida (ACV).....	143
7.1. Material y métodos.....	143
7.2. Resultados	163
7.3. Discusión de los resultados	176
Capítulo 8.....	183
Análisis de la sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera en Túnez mediante un enfoque integrado de evaluación del ciclo de vida y de decisión multicriterio.....	183
8.1. Material y métodos.....	184
8.2. Resultados	199
8.3. Discusión	208
Parte IV: Conclusiones generales	213
Capítulo 9.....	215
Conclusiones, limitaciones, recomendaciones y futuras líneas de investigación.....	215
9.1. Conclusiones	216
9.2. Recomendaciones y estrategias para la mejora del olivar tunecino	221
9.3. Limitaciones y futuras líneas de investigación.....	223
REFERENCIAS	225
ANEXOS	245
Anexo I.....	247
Fuentes de información en las fases de la investigación	247
Anexo II	249
Cuestionario: Priorización de los criterios/alternativas para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional.....	249
Anexo III.....	257

Cuestionario: Priorización de los cultivares de aceitunas	257
Anexo IV	261
Cuestionario: Priorización de las categorías de impacto para evaluar la sostenibilidad del cultivo de olivar en Túnez.....	261
Anexo V	265
Cuestionario: Identificación del ciclo característico de la producción de aceitunas	265
Anexo VI. Artículos publicados.....	275
Artículo 1	275
A sustainability comparative assessment of Tunisian organic and conventional olive growing systems based on the AHP methodology.....	275
Artículo 2	305
Evaluation of the environmental sustainability in the olive growing systems in Tunisia	305

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales productos agroalimentarios exportados por Túnez (valor en millones de €).....	54
Tabla 2. Distribución de la superficie olivarera en las regiones de Túnez (2019)	55
Tabla 3. Sistemas representativos de la producción actual de olivar en Túnez.....	59
Tabla 4. Densidad de plantación y productividad del cultivo de olivar de secano por zonas de producción en Túnez	60
Tabla 5. Características de los sistemas de cultivo de olivar intensivo en Túnez	64
Tabla 6. Enfoque metodológico de los principales métodos de cálculo de impacto	89
Tabla 7. Principales características de los análisis de decisión multicriterio aplicados en la evaluación de la sostenibilidad de la producción olivarera	100
Tabla 8. Principales características de los estudios de CV en el sector agroindustrial del olivo	103
Tabla 9. Principales resultados de los trabajos previos de evaluación del CV en la producción olivarera	116
Tabla 10. Segmentos de grados de acuerdo.....	130
Tabla 11. Acuerdo en los nodos del modelo AHP	139
Tabla 12. Sistemas representativos de la producción actual de aceitunas en Túnez	144
Tabla 13. Datos y fuentes de información relativos a las prácticas agrícolas de campo aplicadas en los sistemas de olivar analizados	148
Tabla 14. Descripción de las prácticas agrícolas de campo de los sistemas de producción olivarera para cada fase de cultivo	149
Tabla 15. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase de plantación	158
Tabla 16. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase joven (media anual).....	159
Tabla 17. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase de crecimiento (media anual).....	159
Tabla 18. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase de incremento de producción 1 (media anual)	160
Tabla 19. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase de incremento de producción 2 (media anual)	160
Tabla 20. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase de plena producción (media anual)	161
Tabla 21. Flujo más relevante y prácticas agrícolas de campo de los sistemas de cultivo.....	163

Tabla 22. Comparación del impacto ambiental por tonelada de las principales categorías de impacto en nueve sistemas de producción de aceituna en Túnez durante un periodo de referencia de 48 años (valores caracterizados y normalizados). HC = Huella de carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad.....	173
Tabla 23. Comparación del impacto ambiental por hectárea de las principales categorías de impacto en nueve sistemas de producción de aceituna en Túnez durante un periodo de referencia de 50 años (valores caracterizados y normalizados). HC = Huella de carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad.....	175
Tabla 24. Principales características de los sistemas de producción olivarera.....	187
Tabla 25. Fuentes de datos para el inventario del ciclo de vida	188
Tabla 26. Cantidades medias de los principales inputs durante el ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera.....	190
Tabla 27. Principales costes medios durante el ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera	193
Tabla 28. Promedio de horas de trabajo en los sistemas de producción olivarera	196
Tabla 29. Escala de comparación en la metodología AHP (Saaty, 1980).....	196
Tabla 30. Impactos ambientales de los sistemas olivareros en Túnez: a) (UF=1 t de aceitunas) y b) (UF=1 ha de superficie de cultivo del olivo).....	201
Tabla 31. Resultados económicos de los sistemas olivareros en Túnez: a) (UF=1 t de aceitunas) y b) (UF=1 ha de superficie de cultivo del olivo).....	201
Tabla 32. Impactos sociales de los sistemas olivareros en Túnez: a) (UF=1 t de aceitunas) y b) (UF=1 ha de superficie de cultivo)	205
Tabla 33. Ponderación de las dimensiones y categorías de impacto	205

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema metodológico general de la investigación	45
Figura 2. Evolución de la producción tunecina de aceituna de aceite y de aceite de oliva (toneladas) en el período 2000 a 2019	56
Figura 3. Producción media de aceitunas de aceite (t año ⁻¹) en las regiones tunecinas en el período 2015 a 2019	57
Figura 4. Evolución de las exportaciones y del consumo interno de aceite de oliva en Túnez (x 1000 toneladas) (2000/01 a 2019/20).....	58
Figura 5. Distribución de la superficie agrícola ecológica (%) por cultivo en Túnez (2019)	61
Figura 6. Evolución de la superficie dedicada a la agricultura ecológica y a los olivares ecológicos en Túnez (2010-2019).....	61
Figura 7. Principales regiones con olivar ecológico certificado en Túnez (%) (2019)	62
Figura 8. Principales productores de aceite de oliva en el mundo (%) (2010/11- 2019/20)	65
Figura 9. Evolución de la producción de aceite de oliva (x1000 toneladas) en los principales países productores del mundo en el periodo (2000/01- 2019/20)	66
Figura 10. Evolución de la producción de aceite de oliva (x1000 toneladas) en los principales países competidores de Túnez en el periodo (2000/01 a 2019/20)	67
Figura 11. Evolución de la producción de aceite de oliva (x1000 toneladas) en los principales países emergentes en el sector oleícola mundial (90/91-2019/20).....	68
Figura 12. Sfax y Sidi Bouzid en el mapa de Túnez	69
Figura 13. Etapas del ACV.....	84
Figura 14. Categorías de impactos asociados al análisis del ciclo de vida.....	89
Figura 15. El modelo AHP para la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera.....	127
Figura 16. La escala verbal y numérica fundamental de la comparación por pares en el AHP	128
Figura 17. Prioridades locales de los criterios y sub-criterios.....	131
Figura 18. Desempeño de los sistemas olivareros en el objetivo principal.....	132
Figura 19. Desempeño de los sistemas de cultivo de olivo en los objetivos y sub-objetivos	134
Figura 20. Gráficos de sensibilidad al desempeño	136
Figura 21. Gráficos de sensibilidad del desempeño en los sub-objetivos económicos y socio-territoriales	137
Figura 22. Diagrama de flujo general de la producción agrícola de aceitunas en los nueve sistemas de cultivo.....	146

Figura 23. Fases de producción de aceitunas y prácticas agrícolas en el campo incluidas en el análisis	147
Figura 24. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema SICIF. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad	164
Figura 25. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema ICIF2. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad	165
Figura 26. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema ICIF1. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad	166
Figura 27. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TCR. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad	167
Figura 28. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TOR. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad	167
Figura 29. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TCIF. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad	168
Figura 30. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TOIF. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad	169
Figura 31. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TCRF. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad	170
Figura 32. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TORF. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad	170
Figura 33. Marco metodológico para la evaluación de la sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera en Túnez.....	186
Figura 34. LCSS de los sistemas de producción olivarera en Túnez por t UF	206
Figura 35. LCSS de los sistemas de producción olivarera en Túnez por ha UF	206
Figura 36. Análisis de sensibilidad de la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas olivareros en Túnez: (a, a'); por t UF: a) resultados iniciales; a') tras variaciones en las ponderaciones locales de las dimensiones de sostenibilidad; (b, b'); por ha UF: b) resultados iniciales; b') tras variaciones en las ponderaciones locales de las dimensiones de sostenibilidad.....	207

ACRÓNIMOS / ACRONYMS

AA: Acidificación

ACV: Análisis del Ciclo de Vida

ACV-Social: Análisis Social del Ciclo de Vida

AGA: Grup d'Anàlisi i Gestió Ambiental

AHP: Analytic Hierarchy Process – Proceso Analítico Jerárquico

AICV: Análisis del Impacto del Ciclo de Vida

ANP: Analytic Network Process – Proceso Analítico de Red

AOVE: Aceite de Oliva Virgen Extra

ASCV: Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida

AT: Tradiciones Agronómicas

CCV: Cálculo de los Costes del Ciclo de Vida

CE: Comisión Europea

CGA: Costo Global Ampliado

CLC: Costes del Ciclo de Vida

COI: Consejo Oleícola Internacional

CO₂: Dióxido de carbono

CP: Comparación por Pares

CRDA: Comisaría Regional de Desarrollo Agrícola

CTUe: Comparative Toxic Unit for ecosystems

CTV: Células Territoriales de Extensión

Cu: Cobre

CV: Ciclo de Vida

DOP: Denominaciones de Origen Protegidas

DRSA: Dominance-based rough set approach

EC: Ecotoxicidad del agua dulce

ELECTRE: Elimination and choice expressing the reality

EPD: Sistema Internacional de Declaración Ambiental de Producto

EU: Eutrofización del agua dulce

H: Hidrógeno

h: Horas

ha: Hectárea

HC: Huella de Carbono

HDPE: High Density Polyethylene

HT: Toxicidad humana

ICIF1: Sistema olivarero intensivo convencional con riego y fertiriego de densidad de plantación (204-278 árboles ha⁻¹)

ICIF2: Sistema olivarero intensivo convencional con riego y fertiriego de densidad de plantación (416-555 árboles ha⁻¹)

ICV: Inventario del Ciclo de Vida

IDEA: Indicadores de Sostenibilidad de las Explotaciones Agrícolas

IFAPA: Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria y Pesquera

ILCD: International Reference Life Cycle Data System

INS: Institut National de Statistiques de Tunisie – Instituto Nacional de Estadística de Túnez

IO: Institut de l'Olivier de Tunisie – Instituto del Olivar de Túnez

IRR: Tasa Interna de Retorno

IRTA: Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries

IVA: Impuesto al Valor Agregado

ISO: Organización Internacional de Normalización

JC: Creación de Empleo

K: Potasio

Kg: Kilogramo

KWh: Kilovatiohora

LCA: Life Cycle Assessment

LCC: Life Cycle Costing

LCSA: Life Cycle Sustainability Assessment

LU: Uso de la Tierra

MADM: Multi Attribute Decision Making – Toma de Decisiones Multiatributo

MAP: Mediterranean Action Plan

MAUT: Multi Attribute Utility Theory

MCDA: Multiple Criteria Decision Analysis – Análisis de Decisión Multicriterio
MODM: Multi Objective Decision Making – Toma de Decisiones Multi-objetivo
N: Nitrógeno
NH₃: Amoníaco
NPV: Valor Actual Neto
N₂O: Monóxido de di nitrógeno
O: Oxígeno
OTD: Oficinas de Tierras del Estado
P: Fósforo
PCR: Reglas de Categoría de Producto
PROMETHEE: Preference ranking organization method for enrichment of evaluations
RGA: Relative Global Agreement - Acuerdo Global Relativo
SDSN: Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible
SETAC: Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SICIF: Sistema olivarero súper-intensivo convencional con riego y fertiriego de densidad de plantación (1250-1666 árboles ha⁻¹)
Social-LCA: Social Life Cycle Assessment
SPOLD: Society for the Promotion of LCA Development
t: Tonelada
TBL: Triple Bottom Line - Triple Cuenta de Resultados
TCIF: Sistema olivarero tradicional convencional con riego y fertilización
TCR: Sistema olivarero tradicional convencional de secano sin fertilización
TCRF: Sistema olivarero tradicional convencional de secano con fertilización
TND: Dinar tunecino
TOIF: Sistema olivarero tradicional ecológico con riego y fertilización
TOR: Sistema olivarero tradicional ecológico de secano sin fertilización
TORF: Sistema olivarero tradicional ecológico de secano con fertilización
UE: Unión Europea
UF: Unidad Funcional
UN: United Nations
UNEP: United Nations Environmental Program

USEPA: US Environmental Protection Agency

UTA: Análisis de Utilidad

WD: Agotamiento de los Recursos Hídricos

€: Euros

Parte I: Aproximación al problema objeto de estudio

Capítulo 1: Introducción, objetivos y estructura de la tesis

Capítulo 2: Metodología general de la investigación

Capítulo 3: Caracterización del sector del olivar y del aceite de oliva y los sistemas de producción en Túnez y las zonas objeto de estudio

Capítulo 1

Introducción, objetivos y estructura de la tesis

El presente Capítulo presenta el contexto y el objeto de la presente tesis doctoral, los objetivos perseguidos y la estructura del documento.

1.1. Introducción

1.1.1. Contexto general del estudio: sostenibilidad y multifuncionalidad de los sistemas agrarios

En los últimos años, la gobernanza a nivel internacional y nacional aboga por modelos de gestión más sostenibles. La promoción y el diseño de sistemas de producción multifuncional y sostenible están adquiriendo una importancia creciente en la agenda política tanto de los países desarrollados como de los países en desarrollo. Especialmente, la alimentación, la agricultura, la ganadería y la pesca constituyen una prioridad para lograr objetivos y acciones operativas sostenibles en la región mediterránea (UN Environment/MAP, 2017). En paralelo, los consumidores están añadiendo su preocupación ambiental a la valoración de los impactos socioeconómicos de sus decisiones como criterios a tener en cuenta a la hora de adquirir alimentos (Joshi y Rahman, 2015), como se refleja en la creciente demanda de algunas certificaciones y etiquetas de calidad (Hinojosa-Rodríguez et al., 2013). Así, el sector primario se enfrenta a serios retos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, racionalizar el uso y consumo de los recursos naturales desde una perspectiva de sostenibilidad, producir alimentos saludables y mitigar los impactos del uso de insumos químicos (fertilizantes y pesticidas) en el bienestar humano en términos de calidad de los alimentos, ecotoxicidad, salud, economías rurales, entre otros. Frente a estos retos, el papel multifuncional de la agricultura y el concepto de sostenibilidad se revelan como fundamentales.

La multifuncionalidad se refiere al hecho de que la sociedad asigna y exige a la agricultura múltiples funciones más allá de la producción de alimentos. En efecto, la sociedad está cada vez más concienciada sobre las cuestiones ambientales y sociales, fundamentalmente en los países desarrollados, aunque también en los que están en vías de desarrollo. De hecho, “una sociedad responsable” tiende a consumir productos más respetuosos con el medio ambiente. La multifuncionalidad implica que una actividad económica, como la agricultura, tiene múltiples impactos/funciones económicos, ambientales y sociales y, por tanto, puede contribuir a varios

objetivos privados y públicos de los diferentes agentes implicados al mismo tiempo (Parra-López et al., 2008a). Los conceptos de multifuncionalidad y sostenibilidad están estrechamente relacionados. Así, una agricultura multifuncional puede conducir a sistemas de cultivo más sostenibles. La evaluación de la sostenibilidad de una actividad implica que todas las funciones ambientales, económicas y sociales de esta actividad deben considerarse y evaluarse de una forma integrada (Carmona-Torres et al., 2016). Por lo tanto, la sostenibilidad, al igual que el de multifuncionalidad, es un concepto multidimensional y multicriterio (Elfkah et al., 2012).

Diseñar y fomentar la difusión de procesos de producción agroalimentarios que sean más sostenibles puede mantener sistemas agrarios que proporcionen importantes servicios ecosistémicos. Así, es necesario promover el conocimiento y la innovación para evaluar y diseñar prácticas y tecnologías más sostenibles en las diferentes fases de la cadena agroalimentaria. La evaluación y diseño de sistemas agrarios más sostenibles, como primer eslabón de la cadena agroalimentaria, representa, por tanto, un gran reto para la comunidad científica (Hrustek, 2020).

1.1.2. Evaluación de la sostenibilidad de los sistemas agrarios: convencional frente a ecológico

Los impactos de la agricultura y la producción de alimentos pueden variar significativamente debido a la diversidad de sistemas de producción existentes. En consecuencia, la multifuncionalidad/sostenibilidad agraria debe ser evaluada y supervisada para rediseñar los procesos de producción y generar sistemas de producción más competitivos y sostenibles.

Durante muchas décadas, la agricultura convencional ha generado muchas externalidades negativas a la sociedad a través de la sobreexplotación de la tierra y los recursos hídricos, la pérdida de biodiversidad, la erosión, el uso no controlado de pesticidas y otros problemas diversos. En oposición a este sistema generalizado, la agricultura ecológica representa un intento para hacer el mejor uso sostenible de los recursos naturales. De hecho, los efectos negativos asociados a los sistemas intensivos convencionales fueron las principales motivaciones de una creciente demanda social de sistemas de producción más sostenibles. Esto ha conducido a una gran expansión del mercado ecológico internacional (Callieris et al., 2016), haciendo de este tipo de agricultura una actividad cada vez más atractiva para los productores. En este contexto, la sostenibilidad puede estar estrechamente vinculada a la agricultura

ecológica, que se ha extendido rápidamente en las últimas dos décadas en muchos países (Rigby y Cáceres, 2001).

A pesar de la evolución positiva de la agricultura ecológica, existe un amplio debate en torno a la sostenibilidad general de estos sistemas de producción, destacando los posibles contrasentidos entre criterios como la optimización de la rentabilidad económica, la protección del medio ambiente y la mejora del bienestar social. Conseguir ese equilibrio requiere optimizar una serie de requisitos agronómicos, ambientales y socioeconómicos de los sistemas agrícolas (Kanter et al., 2016). De hecho, muchos investigadores consideran que los estudios sobre la evaluación de la sostenibilidad en la agricultura han abordado hasta ahora de forma deficiente el concepto de multifuncionalidad, habiéndose centrado los mismos sobre todo en la dimensión ecológica/ambiental de la misma en lugar de aspirar a una evaluación integrada de las tres dimensiones (ambiental, económica y social) (Binder et al., 2010; Bezlepkina y Reidsma, 2011). Por esta razón, es necesario considerar y ponderar las tres dimensiones de la sostenibilidad para diseñar estrategias orientadas a la mejora de la sostenibilidad. Para ello, se necesitan herramientas de evaluación fiables.

En este contexto, han surgido metodologías ampliamente aceptadas en la evaluación de la sostenibilidad como el Análisis de Decisión Multicriterio – Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA). El MCDA es un enfoque importante que se utiliza cada vez más para resolver problemas complejos, y proporciona un marco metodológico para ponderar e integrar criterios/indicadores multidimensionales con el fin de evaluar diferentes alternativas y determinar las más sostenibles. Otros enfoques metodológicos basados en el paradigma del Ciclo de Vida (CV) han emergido en el contexto de la evaluación de la sostenibilidad. Estos proponen un marco de análisis amplio, considerando todo el CV de un producto, sistema o servicio. Se denominan herramientas de evaluación del CV y cubren las tres dimensiones de la sostenibilidad: el Análisis Ambiental del Ciclo de Vida – Life Cycle Assessment (ACV/LCA), el Análisis Económico o Cálculo de los Costes del Ciclo de Vida – Life Cycle Costing (CCV/LCC) y el Análisis Social del Ciclo de Vida – Social Life Cycle Assessment (ACV-Social/Social-LCA). Recientemente, el Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida – Life Cycle Sustainability Assessment (ASCV/LCSA) (Kloepffer, 2008) se está desarrollando para realizar una evaluación conjunta e integrada de los impactos ambientales, económicos y sociales de los procesos de producción a través de la combinación del ACV, el CCV y el ACV-Social. Las metodologías del MCDA pueden usarse para integrar estos impactos en las diferentes dimensiones de la sostenibilidad.

1.1.3. Evaluación de la sostenibilidad en el sector del olivar y aceite de oliva

En el caso de los sistemas de producción olivarera, algunos estudios han seguido un enfoque explícitamente holístico y multicriterio sobre la base del MCDA, como Parra-López et al. (2008b), Laajimi y Ben Nasr (2009), Gómez-Limón y Arriaza-Balmón (2011), Elfkhih et al. (2012), y Carmona-Torres et al. (2014). Estas investigaciones revelan las especificidades de cada caso estudiado. Así, no existe un modelo unificado de evaluación de la sostenibilidad de las explotaciones que pueda aplicarse a todos los casos. Por lo tanto, cada estudio realizado utiliza un conjunto de indicadores de sostenibilidad y supone un marco teórico específico.

Por otra parte, varios estudios de CV sobre la producción de aceite de oliva, comparan la agricultura convencional con la ecológica (Notarnicola et al., 2004; Salomone y Ioppolo., 2012; Mohamad et al., 2014; Taxidis et al., 2015; Pattara et al., 2016; Guarino et al., 2019). En general, estos estudios coinciden en que el impacto ambiental de los sistemas ecológicos es menor que el de los sistemas convencionales. Sin embargo, es necesario mejorar la productividad del cultivo ecológico para que sea un sistema más competitivo. Según Espadas-Aldana et al. (2019), la mayoría de los estudios de CV realizados en el sector del aceite de oliva se centraron en la dimensión ambiental, mientras que sólo unos pocos incluyeron los aspectos económicos o sociales (p.ej. Notarnicola et al., 2004; De Gennaro et al., 2012; Pergola et al., 2013; Rajaeifar et al., 2014; Iofrida et al., 2020). Según nuestro conocimiento, solo el estudio realizado por De Luca et al. (2018b), realiza una evaluación integrada en las dimensiones económica, social y ambiental de los sistemas de cultivo del olivo. Estos autores evalúan tres técnicas de control de las malas hierbas mediante la metodología ASCV, concluyendo que las principales prioridades de los agentes implicados son las dimensiones ambiental y social de la sostenibilidad, y que la alternativa basada en una baja dosis de control químico de las malas hierbas sin laboreo es la opción de gestión más sostenible. Así, cabe destacar que, aunque se han realizado estudios de CV sobre la producción olivarera en diferentes países, faltan más análisis con un enfoque global y multicriterio, como el propuesto por el ASCV/LCSA, que integren un conjunto lo más completo posible de dimensiones e indicadores de sostenibilidad asociados a diferentes sistemas agrarios, prácticas y fases, utilizando además diferentes unidades funcionales (UF).

1.1.4. Caso de estudio: los sistemas de producción olivarera en Túnez

En Túnez, el cultivo de olivar para la producción de aceite de oliva es la principal actividad agraria, con una superficie de 1,85 millones de hectáreas (AgriDATA, 2020) y una producción media de aceite de oliva de 198.700 t año⁻¹, lo que posiciona a Túnez como el segundo país con mayor superficie de olivar, por detrás de España, y el cuarto país productor, por detrás de España, Italia y Grecia (OLIVAE, 2017; COI, 2021). La mayoría de los sistemas de cultivo del olivo (95% de la superficie olivarera) utilizan técnicas tradicionales de secano cuya productividad es muy baja (<1 t ha⁻¹). Además, las explotaciones olivareras son en su mayoría de pequeño tamaño (72% < 10 ha), empleando a trabajadores ocasionales para tareas eventuales (poda, recolección, etc.) y, por tanto, con un bajo nivel de empleo a largo plazo asociado a un bajo rendimiento económico (Larbi et al., 2017).

Por otro lado, el cultivo del olivo en el país está limitado por las condiciones climáticas adversas (Zouari et al., 2017; Mezghani et al., 2019). La susceptibilidad a la erosión del suelo se ve agravada por el uso de fertilizantes minerales, el riego y los pesticidas (Espadas-Aldana et al., 2019; Mlih et al., 2019). En general, el agotamiento de los recursos se ve agravado por las técnicas convencionales (Ben Abdallah et al., 2018). El sector olivarero tunecino debe hacer frente a la creciente competitividad internacional optimizando la productividad y la innovación del olivar tradicional.

Además de los sistemas tradicionales de baja densidad, los agricultores han introducido, de forma gradual pero significativa, sistemas de cultivo de alta densidad (p.ej. 204 árboles ha⁻¹ a 555 árboles ha⁻¹ en los sistemas intensivos y 1250 árboles ha⁻¹ a 1666 árboles ha⁻¹ en los sistemas súper-intensivos) (DGEDA, 2019). Por ejemplo, durante las temporadas agrícolas 2015-2018, los olivares intensivos de regadío han pasado de 82.560 ha a 101.600 ha (DGEDA, 2019). A pesar del aumento de esta forma de producción olivarera, sus impactos ambientales y su sostenibilidad siguen siendo no sólo un tema controvertido sino también un tema central en discusiones y debates, especialmente en Túnez (Sai et al., 2012; Jackson et al., 2015; Larbi et al., 2017). Por otra parte, el riego y la producción ecológica juegan un papel cada vez más importante en este sector. La agricultura ecológica puede reducir los impactos ambientales causados por el uso excesivo de productos químicos en la agricultura convencional. Durante las dos últimas décadas, la superficie dedicada al olivar ecológico creció significativamente en Túnez. Así, en 2017, Túnez fue el primer país en términos de superficie con una extensión de 254.400 ha de olivar ecológico, seguido por Italia (235.700 ha) y España (195.100 ha) (Helga y Lemoud, 2019).

Túnez es un país en desarrollo que se enfrenta como el resto de los países al desafío de encontrar un equilibrio entre el desarrollo económico y la preservación del medio ambiente y del bienestar social. En este sentido, cuestiones como, por ejemplo, el aumento del consumo de los recursos hídricos y energéticos y el desempleo de una gran población joven se pone de manifiesto frente a un modesto crecimiento económico del país (Sghari y Hammami, 2016). Dada la gran extensión del cultivo del olivo en el país, es necesario implementar cambios en las prácticas agrícolas hacia formas de producción más sostenibles para mejorar el bienestar de los olivicultores y de la sociedad en general.

A pesar del destacado posicionamiento mundial de Túnez en el sector del aceite de oliva, no se ha realizado un análisis holístico de la sostenibilidad de los diferentes sistemas de producción olivarera del país, especialmente desde la perspectiva del CV, integrando cuestiones económicas, ambientales y sociales. Por lo tanto, es necesaria una evaluación holística de la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera existentes (tradicional, ecológico, intensivo y súper-intensivo) para diseñar sistemas de cultivo del olivo más sostenibles, definiendo las prácticas agrícolas óptimas y evitando las insostenibles para mitigar los impactos negativos.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis doctoral es evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera existentes en Túnez con el fin de definir estrategias de mitigación y mejora de las prácticas agronómicas para una gestión más sostenible de los mismos. Este objetivo principal se divide en los siguientes objetivos secundarios:

1) Evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional en Túnez desde una perspectiva genérica mediante el análisis multicriterio y contrastar la validez y/o las limitaciones del método MCDA empleado (Proceso Analítico Jerárquico – Analytic Hierarchy Process (AHP)) para la ponderación de las dimensiones de la multifuncionalidad y sostenibilidad de los sistemas agrarios.

2) Evaluar la sostenibilidad ambiental de los sistemas de producción olivarera existentes en Túnez (tradicional, ecológico, intensivo y súper-intensivo) desde la perspectiva del ACV e identificar las fases del cultivo y las técnicas agrícolas más empleadas mediante la elaboración un inventario de CV con todos los flujos y procesos considerados para los sistemas de

producción olivarera seleccionados con el fin de seleccionar e identificar las prácticas agrícolas y los procesos que producen los impactos ambientales más significativos.

3) Evaluar los resultados económicos de los sistemas de producción olivarera tradicional, ecológico, intensivo y súper-intensivo desde la perspectiva del CCV y elaborar un inventario económico de CV con los costes e ingresos considerados para los sistemas de producción olivarera seleccionados en Túnez con el fin de identificar los procesos/prácticas que tienen los costes más significativos.

4) Evaluar los impactos sociales de los sistemas de producción olivarera tradicional, ecológico, intensivo y súper-intensivo desde la perspectiva del ACV-Social y elaborar un inventario social de ciclo de vida para los sistemas de producción olivarera seleccionados en Túnez con el fin de identificar los procesos/prácticas que producen los impactos sociales más elevados.

5) Determinar los sistemas de producción olivarera más sostenibles mediante el método de Análisis de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV), integrando mediante la metodología AHP los resultados previos del ACV, el CCV y el ACV-Social.

6) Proponer posibles estrategias de mitigación y mejora de las prácticas agronómicas para una gestión más sostenible de la producción olivarera en Túnez.

1.3. Estructura de la tesis

La tesis se ha estructurado en 9 Capítulos agrupados en cuatro partes, tal y como se indica a continuación:

- Parte I ‘Aproximación al problema objeto de estudio’ consta de tres capítulos: El presente Capítulo 1 ‘Introducción, objetivos y estructura de la tesis’ presenta el contexto general del estudio, el tema abordado, el objeto del estudio y la estructura general de la tesis. El Capítulo 2 ‘Metodología general de la investigación’ presenta y describe las fuentes de datos utilizadas para realizar los diferentes análisis de sostenibilidad y para elaborar el inventario de ciclo de vida de los sistemas de producción seleccionados. En el Capítulo 3 ‘Caracterización del sector del olivar y del aceite de oliva y los sistemas de producción en Túnez y las zonas objeto de estudio’, se indica la situación del sector del olivar y del aceite de oliva en Túnez, así como los diferentes sistemas de producción, y se presentan las zonas del estudio, Sfax y Sidi Bouzid, y su elección como regiones líderes en superficie del olivar y producción de aceite de oliva en Túnez.

- Parte II ‘Marco conceptual para la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas olivareros’: comprende dos capítulos. En el Capítulo 4 ‘Marco conceptual para la evaluación de la sostenibilidad’, se explican los conceptos clave relacionados con el tema del estudio y las metodologías usadas para evaluar la sostenibilidad. En el Capítulo 5 ‘Evaluación de la sostenibilidad del sector de la olivicultura y elaiotecnia’, se realiza un análisis descriptivo de las principales características de las diferentes evaluaciones de la sostenibilidad realizadas en el sector oleícola, centrándonos en publicaciones científicas relacionadas con la aplicación del MCDA y del enfoque del CV.
- Parte III ‘Métodos de análisis, resultados y discusión’: se ha estructurado en tres capítulos. El Capítulo 6 titulado ‘Evaluación comparativa de la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional en Túnez, mediante la metodología AHP’ expone la metodología del MCDA usada (método AHP) y se determina de una manera comparativa la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional en la región de Sfax. En el Capítulo 7 titulado ‘Evaluación de la sostenibilidad ambiental de los sistemas de producción olivarera en Túnez mediante el Análisis del Ciclo de Vida (ACV)’, se presenta (i) la metodología del ACV aplicada al caso del estudio (ii) se identifica el grado de contribución de cada práctica en las categorías de impacto ambiental seleccionadas y (iii) se determinan los impactos ambientales de cada sistema de producción olivarera seleccionados por unidad de masa producida (tonelada de aceitunas) y por superficie de olivar cultivada (hectárea). El Capítulo 8 ‘Análisis de la sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera en Túnez mediante un enfoque integrado de análisis de ciclo de vida y de decisión multicriterio’ presenta los impactos ambientales, económicos y sociales de cada sistema de producción olivarera seleccionados por unidad de masa producida (tonelada de aceitunas) y por superficie de olivar cultivada (hectárea) y se determinan los sistemas de producción olivarera más sostenibles desde la perspectiva del Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida, integrando mediante la metodología AHP los impactos obtenidos por las herramientas del CV: el ACV, el CCV y el ACV-Social.
- Parte IV ‘Conclusiones generales’: incluye el Capítulo 9. En este capítulo titulado ‘Conclusiones, recomendaciones, limitaciones y futuras líneas de investigación’, se exponen las conclusiones y las interpretaciones relativas a i) los objetivos planteados del estudio y ii) a los enfoques metodológicos utilizados, así como las principales recomendaciones y estrategias propuestas para la mejora de la sostenibilidad de los

sistemas de producción olivarera y la mitigación de los impactos negativos causados por las prácticas agrarias empleadas en el manejo del cultivo del olivar en Túnez. El estudio finaliza considerando las limitaciones de la investigación y con una proyección de las futuras líneas de investigación relacionadas con la problemática analizada.

Capítulo 2

Metodología general de la investigación

Esta tesis doctoral se ha realizado en dos fases: i) en la primera, se ha llevado a cabo una evaluación comparativa genérica de los dos grandes tipos de sistemas de cultivo del olivo, el ecológico y el convencional; ii) en la segunda, la evaluación ha incluido los impactos de los diferentes sistemas existentes con un mayor nivel de diferenciación (ecológico tradicional, convencional tradicional, intensivo y súper-intensivo) en función de las diferentes prácticas agrarias implementadas.

El esquema metodológico general seguido para alcanzar estos objetivos se detalla en la Figura 1. En ella se muestran las fuentes de información y los métodos de análisis en cada capítulo y fase de la tesis. En los siguientes apartados se desarrollan estas cuestiones.

2.1. Fuentes de información

Para realizar los diferentes análisis se utilizaron varias fuentes de información. Esta información se recopiló directamente de los agentes implicados en el sector oleícola tunecino (agricultores y profesionales) y de datos procedentes de la literatura/documentación científica, técnica y estadística relacionada con el tema del estudio. El Anexo I muestra en detalle las diferentes fuentes de información utilizadas.

2.1.1. Información primaria

2.1.1.1. Encuestas a expertos

2.1.1.1.1. Selección de expertos

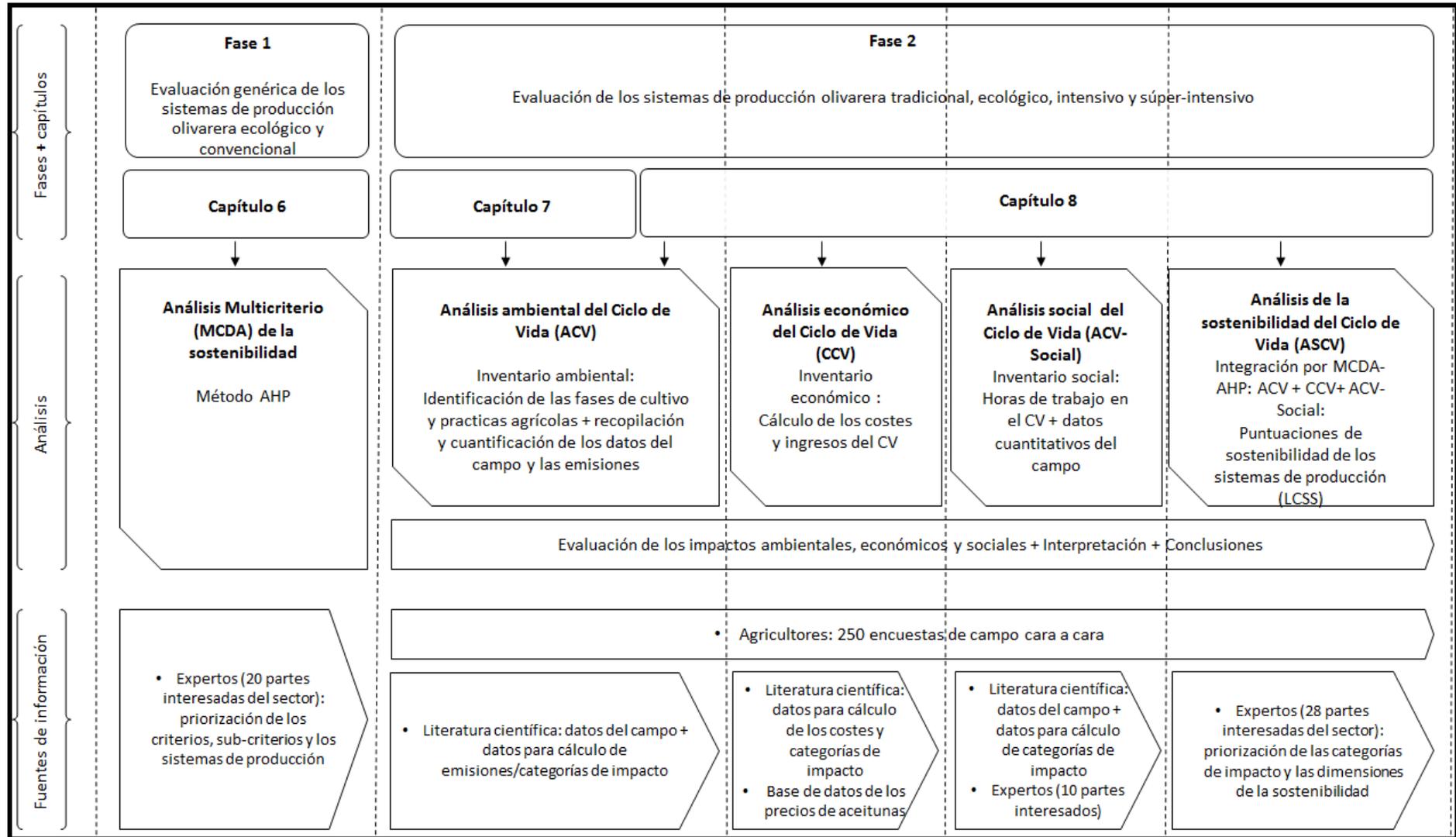
Los análisis multicriterio se llevaron a cabo mediante la consulta de expertos con el fin de priorizar los criterios/categorías de impacto y, a continuación, los sistemas de producción estudiados. Para ello, se realizaron tres encuestas a tres grupos de expertos:

i) 20 expertos para efectuar la evaluación genérica comparativa de la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional (Capítulo 6).

ii) 10 expertos para evaluar la categoría de impacto social ‘tradiciones agronómicas’ mediante la clasificación de las variedades de aceitunas cultivadas en los sistemas de producción analizados (Capítulo 8).

iii) 28 expertos para priorizar las categorías de impacto y las dimensiones de la sostenibilidad (económica, social y ambiental) en la evaluación integrada de la sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera tradicional (ecológico y convencional), intensivo y súper-intensivo (Capítulo 8).

Figura 1. Esquema metodológico general de la investigación



2.1.1.1.2. Cuestionarios

Los cuestionarios de análisis multicriterio se diseñaron siguiendo las etapas de la metodología del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Para ello, los expertos evaluaron los sistemas estudiados priorizando la importancia de los elementos de cada nivel en el modelo jerárquico AHP correspondiente en función de la satisfacción del nivel superior del que dependen directamente (por ejemplo, las alternativas (sistemas de producción olivarera) con respecto a los sub-objetivos/categorías de impacto; los sub-objetivos/categorías de impacto con respecto a los criterios/dimensiones; y los objetivos/dimensiones con respecto al objetivo global (evaluación de la sostenibilidad). La asignación del valor de importancia de un elemento/criterio con respecto a otro se realiza mediante la escala de importancia de Saaty (1980) (1-9) (Anexos II, III y IV).

Los cuestionarios para conocer la opinión de los expertos son personales y se realizaron de forma individual. A continuación, se describen los diferentes cuestionarios en cada fase de la investigación:

- El cuestionario de la primera encuesta sobre la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción ecológica y convencional (Anexo II) (Capítulo 6) consta de dos partes principales: i) la primera parte consiste en presentar la situación del encuestado, en particular su área de conocimiento ii) la segunda parte trata de priorizar las múltiples funciones u objetivos a evaluar, así como de las alternativas de estudio, es decir, los dos sistemas de producción. En cada nivel de la jerarquía AHP, cada experto realiza una evaluación comparativa por pares entre los elementos en cuestión, teniendo en cuenta el nivel superior, así como el objetivo global del estudio. Así, la comparación comienza con el nivel de alternativas en relación con la satisfacción de cada uno de los sub-objetivos económicos (ingresos, estabilidad de los ingresos, autonomía financiera, promoción mediante subvenciones y accesibilidad al mercado), los sub-objetivos medioambientales (protección del suelo de la erosión, fertilidad del suelo, recursos hídricos, minimización del uso de pesticidas y biodiversidad) y los sub-objetivos socio-territoriales (contribución a la creación del empleo, trabajo colectivo, compatibilidad con los valores socioculturales locales, condiciones de trabajo, tasa de supervisión, enfoque de calidad y valor recreativo del entorno). Posteriormente, se compararon los sub-objetivos en relación con la satisfacción del objetivo correspondiente del que forman parte (por ejemplo, la importancia de los sub-objetivos económicos en la satisfacción del objetivo económico), seguida de una comparación por pares entre los

objetivos (económico, social y medioambiental) con respecto a la satisfacción del objetivo global.

- El cuestionario de evaluación de la categoría de impacto (AT) "Tradiciones Agronómicas" (Anexo III) (Capítulo 8) consiste en clasificar las variedades de olivo cultivadas en los sistemas de producción tradicionales e innovadores en función del cumplimiento de seis criterios: rendimiento de la aceituna y del aceite, calidad del aceite, resistencia a la sequía y a la salinidad y vida útil. Para ello, los expertos usaron la escala de comparación de Saaty para evaluar, ponderar y clasificar los criterios de evaluación y el impacto de cada cultivar ("chemlali", "arbosana" y "arbequina") en función del cumplimiento de los criterios de evaluación. Así, se asignó un valor de ponderación a cada sistema de cultivo de olivo para la categoría AT.
- El cuestionario de la tercera encuesta sobre la evaluación integrada de la sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas de producción tradicionales (ecológicos y convencionales), intensivos y súper-intensivos (Anexo IV) (Capítulo 8) se compone de dos partes: i) la primera describe el perfil y la especialidad del experto ii) la segunda consiste en priorizar por pares la importancia de las categorías de impacto seleccionadas en relación con la dimensión a la que pertenecen (ambiental, económica y social) y luego las dimensiones en relación con el objetivo global (sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera en Túnez). Las categorías de impactos ambientales, económicos y sociales consideradas son, respectivamente: i) Huella de Carbono (HC), Agotamiento de los Recursos Hídricos (WD) y Uso de la Tierra (LU); ii) Valor Actual Neto (NPV), Tasa Interna de Retorno (IRR) y Costes del Ciclo de Vida (CLC); y iii) Toxicidad Humana (HT), Creación de Empleo (JC) y Tradiciones Agronómicas (AT). En este caso, la priorización de los sistemas de producción se llevó a cabo calculando cada categoría de impacto en cada dimensión de sostenibilidad para cada sistema de producción utilizando las herramientas del concepto de ciclo de vida (Análisis del Ciclo de Vida, Análisis de los Costes del Ciclo de Vida y Análisis del Ciclo de Vida Social), y luego se convirtieron en índices para su integración en el modelo jerárquico AHP con el fin de obtener los resultados finales de la evaluación de la sostenibilidad (Capítulo 8).

2.1.1.2. Encuesta a agricultores

Para elaborar una base de datos representativa del estado actual de los distintos sistemas de producción olivarera en Túnez, se realizó una encuesta de campo a 250 agricultores de las regiones de Sfax y Sidi Bouzid. Esta encuesta permite establecer los inventarios del ciclo de vida (ambiental, económico y social) de los sistemas de producción olivarera (Capítulos 7 y 8).

2.1.1.2.1. Selección de agricultores

El estudio de campo y la elección de la muestra representativa de agricultores se realizaron en colaboración con los distritos de desarrollo agrícola y de estadística y producción vegetal y con las Células Territoriales de Extensión (CTV) de las distintas delegaciones dependientes de las Comisarías Regionales de Desarrollo Agrícola de Sfax y Sidi Bouzid (CRDA). Así, se realizaron 250 encuestas de campo a los agricultores para elaborar el inventario del ciclo de vida (ICV) de los sistemas de producción tradicional (ecológico y convencional) intensivo y súper-intensivo durante un año (febrero de 2018 a febrero de 2019). La muestra de agricultores se seleccionó en función de los sistemas de cultivo de olivar objeto del estudio que implementaban (tradicional convencional, tradicional ecológico, intensivo y súper-intensivo) y se estratificó de la siguiente manera: 200 agricultores del sistema tradicional (169 convencionales y 31 ecológicos), y 50 agricultores de los sistemas intensivos y súper-intensivos. Cabe destacar que la encuesta cubrió un 52% de la superficie total del olivar ecológico en la zona de estudio y aproximadamente un 14% de la superficie total del olivar ecológico en todo el país, ya que se incluyeron los productores más importantes en términos de área de olivar ecológico, tales como las Oficinas de Tierras del Estado (OTD).

2.1.1.2.2. Cuestionario

Este cuestionario a agricultores (Anexo V) consta de dos secciones principales:

- La primera sección contiene dos apartados relativos a la información general sobre el agricultor y su explotación: (i) Descripción del perfil del productor (edad, nivel de formación, etc.) (ii) Datos generales de la explotación (superficie, número de árboles, tipo de sistema de producción, densidad de plantación, cultivar, edad de las plantaciones, número total de empleados casuales y permanentes, etc.).

- La segunda sección consiste en seis apartados relacionados con las prácticas agrícolas en cada fase del ciclo de vida del olivo: (i) Manejo de suelo: tipo y número de operaciones y rendimiento, tipos y precios de equipo y material empleados (maquinaria, material y precios de compra), cantidad consumida y precio de energía (diésel, lubricante), cantidad y coste de la mano de obra etc.; (ii) Fertilizantes: tipo y nombre de productos, dosis aplicada (cantidad) y precio por cada fertilizante, tipos y precios de equipo y material empleados para el transporte, la distribución en el campo y para la instalación del sistema de fertirriego, y el rendimiento y el precio y la cantidad de energía (diésel, lubricante) y cantidad y coste de la mano de obra; (iii) Pesticidas y herbicidas: tipo y nombre de productos, dosis aplicada (cantidad) y precio unitario por cada pesticida, tipos y precios de equipo y material empleados para el transporte, la distribución en el campo y rendimiento y la cantidad y el precio unitario de energía (diésel, lubricante) y cantidad y coste de la mano de obra; (iv) riego (cantidad de agua y electricidad y costes relativos); (v) Poda: tipos y precios de equipos de poda (maquinaria) y gestión de residuos, cantidad y precio unitario de energía (diésel, lubricante, número de operaciones y cantidad y coste de la mano de obra; (vi) recolección: producción y precio unitario de venta de aceitunas, equipos (maquinaria), consumo y precio unitario de energía (diésel, lubricante), rendimiento, transporte (material plástico + aceitunas recolectadas + aceitunas del campo a la almazara) y coste relativo y cantidad y coste de la mano de obra.

2.1.2. Información secundaria

La bibliografía revisada se corresponde con diferentes documentos técnicos, estadísticos y descriptivos establecidos por el Instituto del Olivar de Túnez sobre: i) las prácticas agrícolas empleadas en el manejo del cultivo de olivar tanto en riego como en secano; ii) las diferentes fases del ciclo de vida (duración y datos relativos); iii) la productividad de los diferentes sistemas de producción olivarera (tradicional, ecológico, intensivo y súper-intensivo); y iv) los precios de aceitunas. Masmoudi-Charfi et al. (2012) presentan datos de diferentes técnicas y aplicaciones en varios sistemas en regadío y fertirriego del olivar, así como las necesidades hídricas de los olivos en diferentes regiones de Túnez. Masmoudi-Charfi et al. (2016) proporcionan información detallada sobre los inputs usados en la fase de plantación para instalar e implementar diferentes sistemas de alta densidad (intensivo y súper-intensivo). De Gennaro et al. (2012) muestran las diferentes fases del ciclo de vida de dos modelos intensivos

y súper-intensivos. Larbi et al. (2017) describen el estado de la intensificación del olivar en Túnez y muestran datos históricos de la productividad por fase de producción, así como las técnicas de producción empleadas en diferentes estaciones experimentales y reales de los sistemas intensivos y súper-intensivos. En IO (2017a, b) se presentan en detalle las dosis de inputs y la mayoría de los equipos usados en las prácticas y técnicas agrarias empleadas en el olivar tradicional de secano y en regadío, así como la evolución de la productividad en las fases del ciclo de vida. En IO (2019), se muestra una base de datos de los precios de la aceituna en el mercado local de "Gremda" (Sfax) incluyendo los precios durante los años de referencia del estudio (2018 y 2019).

La información secundaria necesaria para el análisis ambiental (Capítulos 7, 8) se obtuvo de la base de datos Ecoinvent v.3.2 (Ecoinvent, 2019), incluyendo datos sobre la fabricación de fertilizantes y pesticidas, la producción de electricidad, la maquinaria agrícola y el diésel, los materiales auxiliares para la recolección y el transporte. Las emisiones al aire de los fertilizantes nitrogenados y de los pesticidas se calcularon de acuerdo con la literatura (IPCC, 2007; EEA, 2013). Los parámetros necesarios para el cálculo de las categorías de impactos económicos (Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno, Costes del Ciclo de Vida) (Capítulo 8) tales como la tasa de descuento, costes de oportunidad de la tierra, seguros, las tasas de interés sobre bienes de capital/capital invertido, las depreciaciones de la maquinaria, se consiguieron mediante la actualización de la información existente en los estudios/datos económicos recientes en el contexto tunecino (Daly-Hassen et al., 2019; Jackson et al., 2015; MAT, 2017; BCT, 2020) y las asunciones aprobados en el cálculo de los costes de la maquinaria agrícola (costes de reparaciones y mantenimiento) tales como las normas de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y Biológicos (ASABE, 2015). La información sobre el rendimiento de la mano de obra en las diferentes tareas agrícolas del sector del olivar en la zona de estudio se complementó con estudios anteriores como (Karray et al., 2000; MAT, 2017).

2.2. Métodos de análisis

Para analizar la información recopilada de las diferentes fuentes, se utilizaron varios enfoques metodológicos, que se desarrollarán en detalle en la parte III de esta tesis ‘Métodos de análisis, resultados y discusión’, y que se resumen brevemente a continuación:

- ✓ Metodología AHP ‘Analytic Hierarchy Process’ (Proceso Analítico Jerárquico) (Saaty, 1980) y su software relativo ‘Expert Choice’ para analizar la información procesada de

expertos y evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción convencional y ecológico (Capítulo 6).

- ✓ Herramientas del enfoque metodológico del concepto de Ciclo de Vida (CV) para procesar y analizar la información primaria y secundaria relativas a los datos ambientales, económicos y sociales relacionadas con las prácticas agrícolas del campo en los sistemas de producción (Capítulos 7, 8):
 - i) Análisis del Ciclo de Vida "ACV" (Capítulos 7, 8) para calcular y analizar los impactos ambientales.
 - ii) Análisis del Coste del Ciclo de Vida "CCV" para calcular y analizar los impactos económicos (Capítulo 8).
 - iii) Análisis Social del Ciclo de Vida 'ACV-Social' para calcular y analizar los impactos sociales (Capítulo 8).
 - iv) Análisis de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV): El conjunto de las informaciones obtenidas de la literatura científica y de los cuestionarios dirigidos a los agricultores y los expertos (Capítulo 8) se han analizado mediante el ASCV que es un enfoque integrado de las herramientas del ciclo de vida (ACV, CCV y ACV-Social) y, en nuestro caso, la metodología AHP, permitiendo priorizar la sostenibilidad de los diferentes sistemas de producción estudiados.

Los diferentes análisis realizados en las fases de la investigación han permitido alcanzar los principales resultados relativos a: i) la determinación de los sistemas de producción más sostenibles; ii) las prácticas agrarias más sensibles que dan lugar a los altos impactos ambientales, económicos y sociales; y iii) la elaboración de las estrategias de mejora y mitigación para mejorar la sostenibilidad de la producción olivarera en Túnez. Además, los análisis han permitido extraer una serie de conclusiones tanto a nivel práctico, referidas a la sostenibilidad del sector del olivar en Túnez, como teórico, sobre los enfoques metodológicos utilizados. Estos resultados y conclusiones se detallan también en la parte III 'Métodos de análisis, resultados y discusión'.

Capítulo 3

Caracterización del sector del olivar y del aceite de oliva y los sistemas de producción en Túnez y las zonas objeto de estudio

Este Capítulo presenta la situación del sector olivarero en Túnez, principalmente en la zona de estudio (Sfax y Sidi Bouzid), con el fin de analizar y destacar los principales problemas y desafíos del sector. El Capítulo está estructurado en cuatro apartados: en el primero, se presenta y se analiza la importancia del sector oleícola en Túnez y los principales datos relativos (superficie, producción, exportación y consumo); en el segundo apartado se describen las zonas del estudio y su elección como regiones líderes en superficie del olivar y producción de aceite de oliva en Túnez; el tercero apartado se centra en la caracterización de los sistemas de producción (sistema tradicional, sistema intensivo y sistema súper-intensivo); y el cuarto apartado presenta la posición mundial actual de Túnez en el sector oleícola y su competencia a nivel internacional.

3.1. El sector del olivar y del aceite de oliva en Túnez

3.1.1. Importancia económica, social y ambiental

Túnez es el país más importante del sur del mediterráneo en términos de superficie dedicada al cultivo del olivo y la producción de aceite de oliva (OLIVAE, 2017). El cultivo del olivo para la producción de aceite es la principal actividad agrícola y se extiende por todo el país. El sector oleícola contribuye a alcanzar los objetivos nacionales de crecimiento económico, seguridad alimentaria, creación de empleo, aumento de los ingresos de exportación, valorización de las zonas marginales y la preservación y mejora de los recursos naturales, cada vez más escasos y vulnerables (Karray, 2012).

En Túnez, el aceite de oliva contribuye con alrededor del 30,5% del valor total de las exportaciones agrícolas y agroalimentarias y con el 4% del valor total de las exportaciones (INS, 2019), lo que lo posiciona como el principal producto agrícola y agroalimentario exportado, por delante de dátiles, pescados o cítricos (Tabla 1).

Tabla 1. Principales productos agroalimentarios exportados por Túnez (valor en millones de €)

Producto	2014	2015	2016	2017	2018	Media
Aceite de oliva	217,7	852,4	393	348,3	627,9	487,9
Dátiles	172,5	200,6	219,2	192,3	219,9	200,9
Pescados, crustáceos y moluscos	102,8	113,7	122	123,3	137	119,8
Cítricos	9,7	10,4	11,1	7,3	6,7	9
Agricultura e industrias agroalimentarias	1780,2	1389	1678,6	1867	1391,5	1621,3
Valor total de las exportaciones	12614	12439	13130,4	11880,7	12111	12,435

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística de Túnez (INS, 2019)

El sector oleícola contribuye a la generación de los ingresos del 65% de todos los operadores agrícolas, representando el ingreso directo o indirecto de más de un millón de personas (OLIVAE, 2017).

En cuanto a la dimensión social, la olivicultura es una actividad económica que mantiene la cohesión social de varias zonas rurales tunecinas a través de su potencial de creación de empleo. La olivicultura es la principal componente agrícola del 60% de los agricultores empleados en los distintos niveles de la cadena olivarera (mecanización, poda, recolección, transporte, trituración, almacenamiento, comercialización, etc.), y genera alrededor de 34 millones de días hábiles de empleo al año, aproximadamente más del 20% del empleo en el sector agrícola (OLIVAE, 2017).

En Túnez, el olivar ocupa el 36% del total de las tierras cultivables y el 79% de la superficie total dedicada a la fruticultura (Fernández-Uclés et al., 2020). Por tanto, el cultivo del olivo puede influir significativamente sobre el medio ambiente (biodiversidad, erosión, cambio climático, etc.), dependiendo de las prácticas agrarias empleadas (manejo del suelo, fertilización, pesticidas, riego, poda y recolección). Además, el olivar es el único cultivo que ha podido poner en valor las zonas marginales (Ben Abdallah, 2015). Por tanto, cualquier cambio en el manejo del cultivo del olivo podría afectar aún más significativamente a las diferentes funciones desempeñadas por este cultivo en las diferentes dimensiones de la sostenibilidad (económica, social y ambiental).

3.1.2. Superficie del olivar

La superficie dedicada al cultivo del olivo en Túnez es aproximadamente 1,85 millones de hectáreas (DGPA, 2019). El principal destino de las aceitunas es la producción de aceite de oliva, mientras que la superficie para aceitunas de mesa representa sólo el 1% de la superficie total. El olivar en seco representa el 95% de la superficie total (DGPA, 2019). Durante la última década (2010 a 2019), la superficie cultivada aumentó de 1.529.000 a 1.846.829 hectáreas, lo que corresponde a un incremento del 21% (DGPA, 2019; AgriDATA, 2020).

En el centro del país se encuentran las principales regiones oleícolas en términos de superficie de olivar (64,23%) (Tabla 2) y producción de aceite de oliva (66%).

Tabla 2. Distribución de la superficie olivarera en las regiones de Túnez (2019)

Provincia/Zona	Superficie (ha)	Contribución (%)
Tunis	1.641	0,09
Ariana	2.464	0,13
Manouba	10.119	0,55
Ben Arous	6.006	0,33
Nabeul	24.045	1,3
Bizerte	15.000	0,81
Zaghuan	53.540	2,9
Beja	30.000	1,62
Jendouba	21.017	1,14
Kef	43.620	2,36
Seliana	74.355	4,03
NORTE	281.807	15,26
Sousse	77.987	4,22
Monastir	63.601	3,44
Mahdia	156.620	8,48
Kairouan	172.270	9,33
Kasserine	84.000	4,55
Sidi Bouzid	277.272	15
Sfax	354.647	19,2
CENTRO	1.186.397	64,23
Gafsa	59.329	3,21
Gabes	73.026	3,95
Medenine	197.000	10,67
Tataouine	48.670	2,64
Kebili	601	0,03
Tozeur	0	0
SUR	378.626	20,5
TOTAL	1.846.829	100

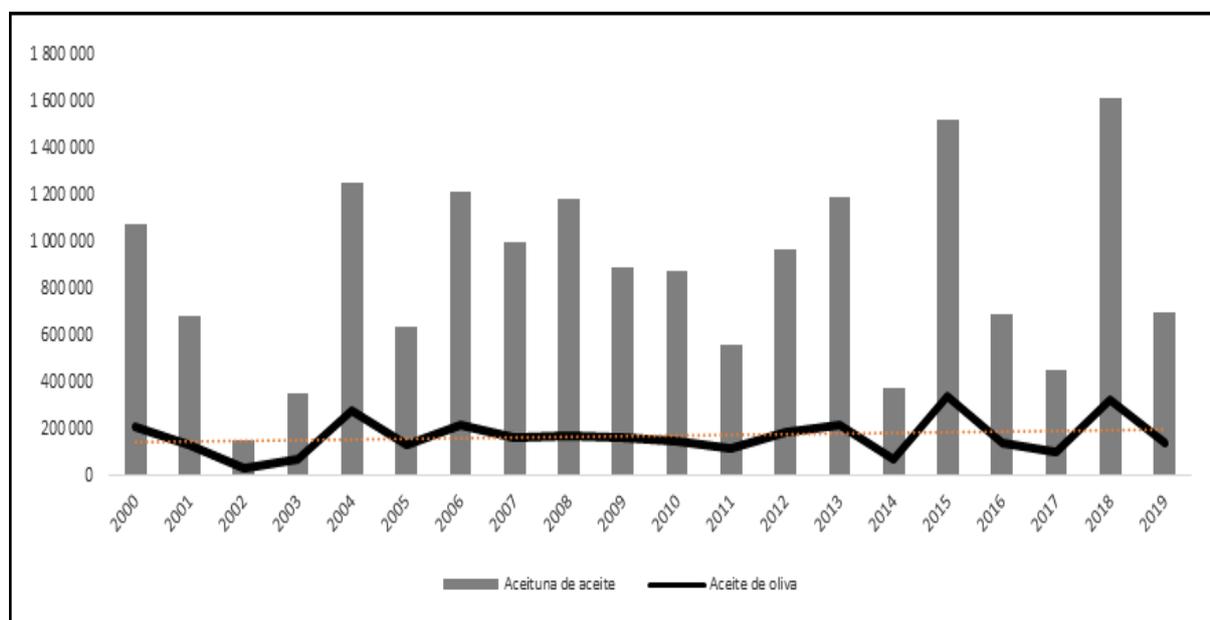
Fuente: (DGPA, 2019)

3.1.3. Producción de aceitunas y aceite de oliva

Durante los años 2010 a 2019, Túnez produjo un promedio de 895.205 t año⁻¹ de aceituna para la elaboración de aceite. Esta producción aumentó alrededor de un 14% en comparación con el periodo 2000 a 2009 (Figura 2).

Según Larbi et al. (2017), el incremento de la producción se debe principalmente a la expansión del área dedicada al cultivo del olivo, mientras que las técnicas modernas solo han contribuido ligeramente en la mejora de la productividad por hectárea. Esto todavía está vinculado con el predominio del olivar de secano (95%) y con el empleo de las prácticas tradicionales del olivo.

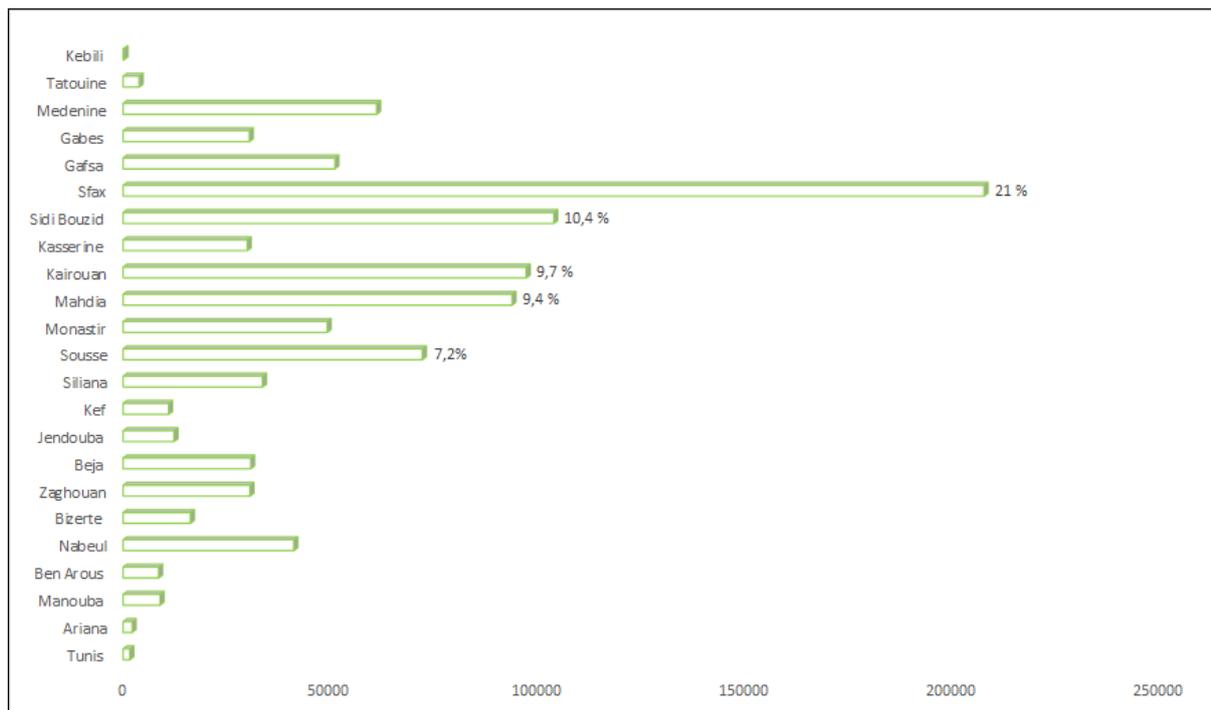
Figura 2. Evolución de la producción tunecina de aceituna de aceite y de aceite de oliva (toneladas) en el período 2000 a 2019



Fuente: Elaboración propia a partir de las estadísticas del COI y del Ministerio de Agricultura de Túnez

Las regiones situadas en el centro de Túnez (tales como, Sfax, Sidi Bouzid, Kairouan, Mahdia y Sousse) producen más de la mitad de la producción nacional (50,5%) (Figura 3). Por tanto, la producción de aceite de oliva se concentra en la región central a pesar de la baja densidad de plantación (de 20 a 50 plantas ha⁻¹) y de las escasas precipitaciones anuales que caracterizan a esta región, en comparación con el norte del país.

Figura 3. Producción media de aceitunas de aceite (t año⁻¹) en las regiones tunecinas en el período 2015 a 2019



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Dirección General de la Producción Agraria de Túnez (DGPA, 2019)

La importancia de la producción en el centro de Túnez se traduce en una mayor rentabilidad y eficiencia, debida a la presencia de la olivicultura como principal componente de las explotaciones agrarias, lo que implica una mayor tasa de especialización y un mayor control técnico. Por el contrario, en el norte del país, el olivo se caracteriza por su baja rentabilidad a pesar del potencial existente (mayor precipitación y mayor densidad de plantación), ya que se trata de un cultivo marginal en comparación con otros cultivos existentes (Elfkhi et al., 2015).

3.1.4. Comercio exterior y consumo

Túnez exporta una media de 152.650 t año⁻¹ de aceite de oliva, lo que representa el 79% de su producción (COI, 2020). Las exportaciones de aceite de oliva tunecino aumentaron alrededor de un 36% entre las dos últimas décadas (2000/01-2009/10 y 2009/10-2019/20). Este incremento se debe principalmente al aumento de la producción y a la disminución del consumo interno de aceite de oliva. El consumo de aceite de oliva disminuyó de 40.000 t año⁻¹ en la

década 2010/11-2019/20 a 35.100 t año⁻¹ en la década 2009/10-2019/20, lo que corresponde a una disminución del 12%, aproximadamente (Figura 4).

Figura 4. Evolución de las exportaciones y del consumo interno de aceite de oliva en Túnez (x 1000 toneladas) (2000/01 a 2019/20)



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del COI (2020)

El bajo consumo de aceite de oliva en Túnez (18% de la producción) se debe principalmente a su alto precio y al bajo poder adquisitivo del consumidor, como resultado de la inestabilidad de la política de precios. De hecho, el precio del aceite de oliva en el mercado local es igual al del mercado internacional (Elfkhi et al., 2015).

3.2. Sistemas de producción olivarera en Túnez

El olivar en Túnez se caracteriza por tener el 81,8% de su superficie con sistemas convencionales tradicionales, el 13,6% con sistemas ecológicos tradicionales y el 4,6% con sistemas intensivos y súper-intensivos (DGPA, 2019; AgriDATA, 2020) (Tabla 3). El sector del olivar en Túnez ha experimentado importantes cambios en las prácticas agronómicas, obteniendo así una diversificación de los sistemas de producción. Debido a la baja productividad del olivar de secano, la política agrícola tunecina ha apostado por la renovación de este olivar tradicional. Una de las principales prácticas recientemente adoptadas es el riego, especialmente en plantaciones de alta densidad.

Tabla 3. Sistemas representativos de la producción actual de olivar en Túnez

Sistemas de producción de aceituna en Túnez		
Tradicional/Intensivo	Convencional/Ecológico	Superficie Total (%)
	CONVENCIONAL	81,8
TRADICIONAL		
	ECOLÓGICO	13,6
INTENSIVO	CONVENCIONAL	4,6

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del ministerio de AgriDATA (2020)

3.2.1. Sistema tradicional

3.2.1.1. Sistema convencional

El cultivo del olivo en Túnez es principalmente un cultivo extensivo de secano (95%), mayoritariamente tradicional convencional (81,8%) (AgriDATA, 2020). La densidad de plantación del olivar de secano es relativamente baja y varía de Norte a Sur en función de la precipitación (Tabla 4). Como resultado, la productividad del olivar es significativamente baja en comparación con otros países productores del área mediterránea. Esta productividad varía desde un máximo de 1 t ha⁻¹ y un mínimo de 0,2 t ha⁻¹, con una tasa regional entre 0,9 t ha⁻¹ en el Norte, y de 0,65 a 0,8 t ha⁻¹ en el sur y en el centro (Tabla 4). Además, el bajo nivel de mecanización, la elevada edad de las plantaciones, el gran tamaño de los olivos y la limitada precipitación anual, afectan a la competitividad del sector (Jackson et al., 2015; Larbi et al., 2017).

El manejo convencional (manejo mecánico del suelo) ha contribuido a la degradación de la materia orgánica del suelo, sobre todo en el centro y sur del país y especialmente en la región de Sfax, la más importante en cuanto a producción de aceite de oliva en Túnez (Rivals, 1961; Ben Abdallah et al., 2018). En el centro y el sur, donde las precipitaciones son muy escasas, el olivo es una opción de cultivo altamente resistente a la sequía y, por lo tanto, desempeña un papel medioambiental vital que tendrá que ser explotado de una manera más eficiente para mejorar su sostenibilidad. De hecho, en el 95% del olivar de secano se utilizan técnicas tradicionales sin apenas utilizar insumos químicos de síntesis. Este sistema de cultivo ha

contribuido de manera significativa a la adopción del cultivo ecológico, ya que es fácil de convertirlo a este sistema (Ben Abdallah et al., 2018; Fernández-Uclés et al., 2020).

Tabla 4. Densidad de plantación y productividad del cultivo de olivar de secano por zonas de producción en Túnez

Zona	Densidad (árboles ha ⁻¹)	Precipitación (mm año ⁻¹)	Productividad (t ha ⁻¹)
Norte	100	400-600	0,9
Centro	40-50	300-350	0,8
Sur y Centro	17-34	200-250	0,65

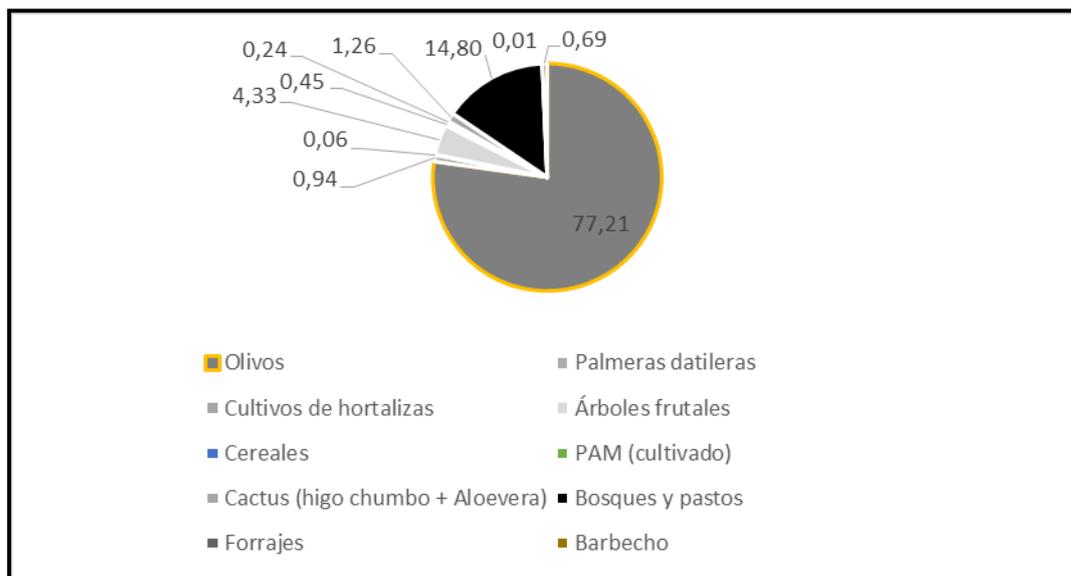
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Larbi et al., 2017

3.2.1.2. Sistema ecológico

En Túnez la agricultura ecológica es una actividad que comenzó en la década de los 80 y evolucionó lentamente hasta finales de la década de los 90, cuando se elaboró una estrategia nacional que condujo al desarrollo de este sector (CTAB, 2020). De hecho, se desarrolló un interés específico en la agricultura ecológica por parte de un grupo de agricultores motivados e innovadores y con el apoyo de un compromiso político. Así, en 1999 se estableció un reglamento específico que establece las normas que rigen la producción y el control de la agricultura ecológica (Reglamento tunecino N° 99-30, de 5 de abril de 1999). El sistema tunecino y las medidas de control de la producción ecológica se reconocen como equivalentes a las establecidas en el Reglamento (CE) N° 834/2007 y (CE) N° 537/2009). En Túnez, la agricultura ecológica, incluyendo todos los cultivos, cubre una superficie de 325.817 hectáreas en 2019 (AgriDATA, 2020). Los productos agrícolas ecológicos contribuyeron al 14% del valor total de las exportaciones agroalimentarias en 2018, lo que supone un aumento considerable con respecto al 4% de 2010 (Onagri, 2019). Esto destaca la importancia del sector ecológico en el panorama de los productos agroalimentarios.

El olivar es el principal cultivo ecológico en Túnez, representando alrededor del 77% de la superficie total dedicada a la agricultura ecológica (Figura 5). El olivar tradicional tunecino es cultivado con muy pocos o ningún insumo químico sintético, lo que facilita su conversión en cultivo ecológico. En 2017, Túnez era el líder mundial en cultivo de olivar ecológico, con 254.411 ha, seguido de Italia (235.700 ha) y España (195.100 ha) (Helga y Lemoud, 2019).

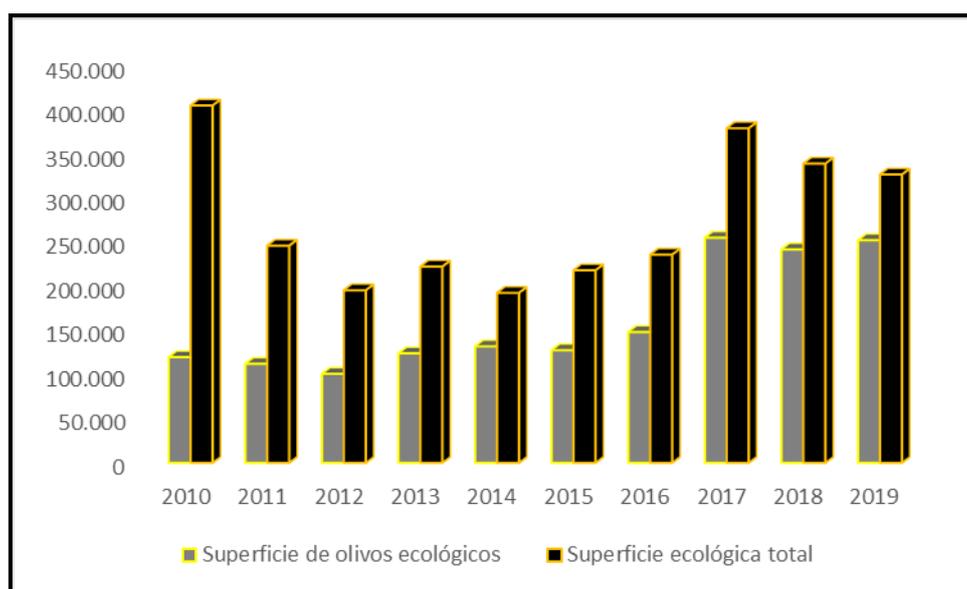
Figura 5. Distribución de la superficie agrícola ecológica (%) por cultivo en Túnez (2019)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de AgriDATA (2020)

La superficie ecológica dedicada al cultivo del olivo se incrementó de 119.400 ha en 2010 a 251.573 ha en 2019 (Figura 6).

Figura 6. Evolución de la superficie dedicada a la agricultura ecológica y a los olivares ecológicos en Túnez (2010-2019)

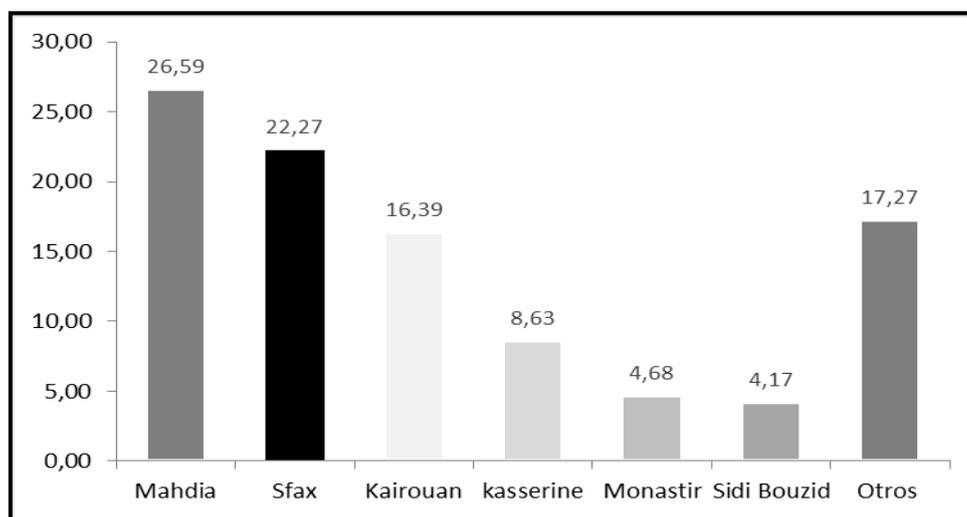


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de AgriDATA (2020) y DGAB (2020)

El aceite de oliva ecológico es un producto de exportación por excelencia. En 2018, su contribución en el total de las exportaciones de productos ecológicos fue del 80,4%, mientras que en 2017 fue del 77,6% (Onagri, 2019). En los años 2017 y 2018, Túnez exportó 31.000 t año⁻¹ y 48.000 t año⁻¹ de aceite de oliva ecológico, respectivamente, lo que representa alrededor del 25,5% del total de las cantidades exportadas de aceite de oliva y 30,2 % del valor total de las exportaciones de aceite de oliva durante esos dos años, mientras que la superficie del olivar ecológico solo representa el 13,5% de la superficie total (AgriDATA, 2020). Esta contribución en términos de valor revela la importancia económica del aceite de oliva ecológico y las oportunidades resultantes de sus mercados de exportación. Los principales destinos del aceite de oliva ecológico tunecino son: Italia, Estados Unidos, España y Francia.

Las regiones del centro de Túnez son también líderes en el sector del olivar ecológico y la región de Sfax ocupa el segundo lugar a nivel nacional. En 2019, las principales regiones en términos de superficie de olivar ecológico eran: Mahdia (26,59%), Sfax (22,27%), Kairouan (16,39%), Kasserine (8,63%), Monastir (4,68%) y Sidi Bouzid (4,17%), mientras que la contribución del resto de regiones (18 en total) era muy reducida (Figura 7).

Figura 7. Principales regiones con olivar ecológico certificado en Túnez (%) (2019)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de AgriDATA (2020)

Cabe señalar que el Gobierno de Túnez ofrece subvenciones y medidas de exención para alentar a los agricultores a incorporarse al sector de la producción ecológica, tales como:

- Una subvención del 50% del coste del material relacionado con el equipo y las herramientas específicas de la agricultura ecológica, con un límite máximo de 500 mil dinares (154,84 mil euros), y una subvención del 50% del material y el equipo específico para la producción de abono y la recuperación de los residuos orgánicos.
- Un subsidio del 50% del coste del control y la certificación para la agricultura ecológica.
- Una subvención del 50% del coste del análisis, registro y prueba de los insumos específicos de la agricultura ecológica.
- Una suspensión de los derechos de aduana y del IVA sobre ciertos insumos específicos para la agricultura ecológica.

Sin embargo, la estructura financiera de esos incentivos y los avances en materia de formación y divulgación de los resultados de investigación a los operadores siguen siendo insuficientes para optimizar el potencial existente (solo el 13,5 % del olivar es certificado como ecológico) a pesar de i) las oportunidades de mercado que este sector podría ofrecer, y ii) la facilidad de conversión del cultivo tradicional del olivar al cultivo ecológico (Ben Abdallah et al., 2018). Además, existen otras debilidades estructurales y organizativas de las explotaciones olivareras, como su longevidad, su pequeño tamaño y el bajo nivel de formación y profesionalización del agricultor (Jackson et al., 2015).

3.2.2. Sistema intensivo y sistema súper-intensivo

Dada la baja productividad del olivar tradicional, la política agrícola tunecina se ha orientado hacia su renovación. Una de las principales prácticas de gestión agrícola adoptadas recientemente es el riego, especialmente en plantaciones de alta densidad. Por ejemplo, durante las temporadas de cultivo de 2015-2018, el olivar en regadío ha aumentado de 82.560 hectáreas a 101.600 hectáreas (DGEDA, 2019). La región más importante con olivar en regadío es Sidi Bouzid, con un 21,6% del total de las plantaciones de olivos de regadío de Túnez (DGEDA, 2019).

Por otra parte, además de los sistemas tradicionales de baja densidad (17-34 árboles ha⁻¹), los agricultores han introducido gradualmente, pero de manera significativa, sistemas de cultivo de alta densidad (1.250 a 1.666 árboles ha⁻¹). Los sistemas intensivos tienen una alta productividad y una producción temprana. En Túnez hay tres principales tipos de sistemas intensivos: el

sistema intensivo clásico (200-300 pies ha⁻¹), el sistema intensivo dinámico (400-600 pies ha⁻¹) y el sistema súper-intensivo (1.250-1.666 pies ha⁻¹) (Tabla 5).

Tabla 5. Características de los sistemas de cultivo de olivar intensivo en Túnez

Sistema intensivo	Densidad (árboles ha ⁻¹)	Variedades
Intensivo clásico	204-278	Chemlali; korneiki
Intensivo dinámico	416-555	Arbosana; korneiki
Súper-intensivo	1250-1666	Arbequina; arbosana; korneiki

Fuente: Elaboración propia a partir de encuestas propias a agricultores y técnicos, Sai et al. (2012) y Larbi et al. (2017)

En Túnez, el sistema súper-intensivo se introdujo en el año 2000 por iniciativa de promotores privados y posteriormente ha sido objeto de una ampliación muy importante en los últimos años (Larbi et al., 2017). Este sistema de cultivo tiene por objeto aumentar el rendimiento por unidad de superficie, permitir una entrada temprana en la producción, mecanizar la recolección y recuperar el capital invertido con bastante rapidez (Msallem et al., 2004).

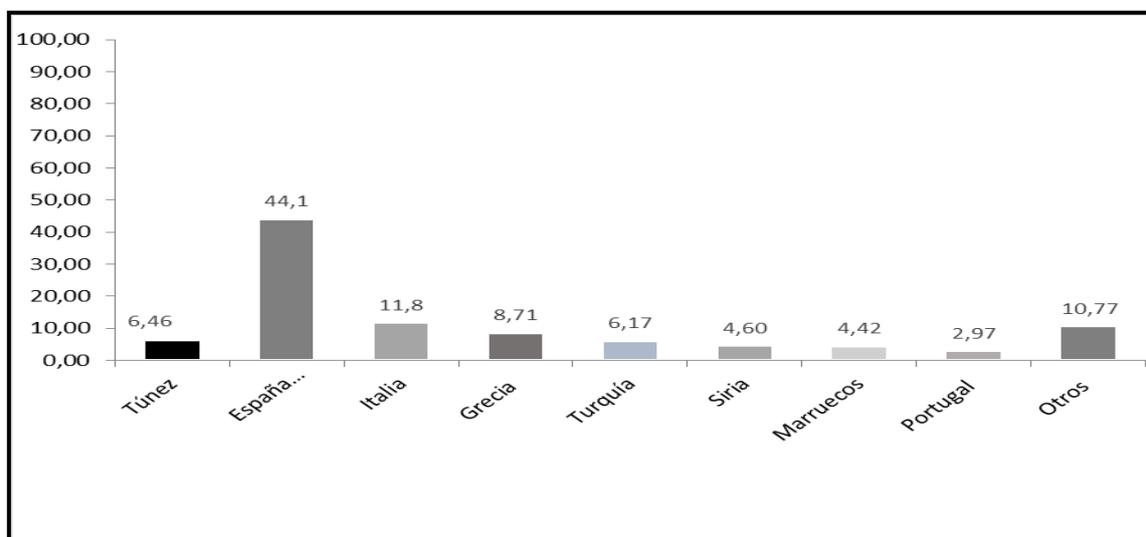
Este sistema requiere una elección adecuada de la variedad, debido a la alta densidad de plantación y las necesidades de la planta para el desarrollo de sus funciones fisiológicas (luz, aire, agua). En la actualidad, se basa en el uso de variedades extranjeras. Según Sai et al. (2012), la principal variedad en el sistema súper-intensivo es la “arbequina” (variedad española) (62,7%), seguida de la ‘arbosana’ (variedad española) (30,3%) y, por último, la ‘koroneiki’ (variedad griega) (7,05%). Dada la producción que caracteriza al olivo en secano y la sensibilidad de la variedad ‘chemlali’ al fenómeno de ‘vecería’ que es la variedad más importante en Túnez (80% de la superficie olivarera), el sistema de regadío, en general, y el sistema intensivo, en particular, contribuyen a garantizar una producción anual mínima. Así, el olivo intensivo de regadío contribuyó a la producción del 90% de las aceitunas en la región de Sidi Bouzid durante el año 2013 (DGPA, 2013). Sin embargo, la elección de la variedad, la densidad, la productividad, la rentabilidad y la sostenibilidad en general del sistema súper-intensivo, son objeto de debate (Sai et al., 2012).

A pesar de la alta producción y la entrada temprana en producción, el sistema súper-intensivo podría también tener efectos adversos en el medio ambiente debido a la gran utilización de energía, agua e insumos químicos (De Gennaro et al., 2012). En general, este sistema requiere un dominio técnico, una gran superficie de terreno y una cantidad considerable de capital invertido. Además, faltan estudios exhaustivos para examinar las principales características de este sistema de olivar en Túnez y su sostenibilidad desde el punto de vista económico, social y ambiental.

3.3. Posición mundial y competencia

A pesar de ser el segundo mayor país del mundo en cuanto a superficie de olivar, solo superado por España, Túnez es el cuarto país productor de aceite de oliva ($198.700 \text{ t año}^{-1}$), por detrás de España, Italia y Grecia y el tercer exportador mundial ($152.650 \text{ t año}^{-1}$) (Figura 8). Esta discrepancia entre la superficie y la producción se debe a la baja productividad del olivar tunecino en comparación con otros países del Mediterráneo.

Figura 8. Principales productores de aceite de oliva en el mundo (%) (2010/11- 2019/20)



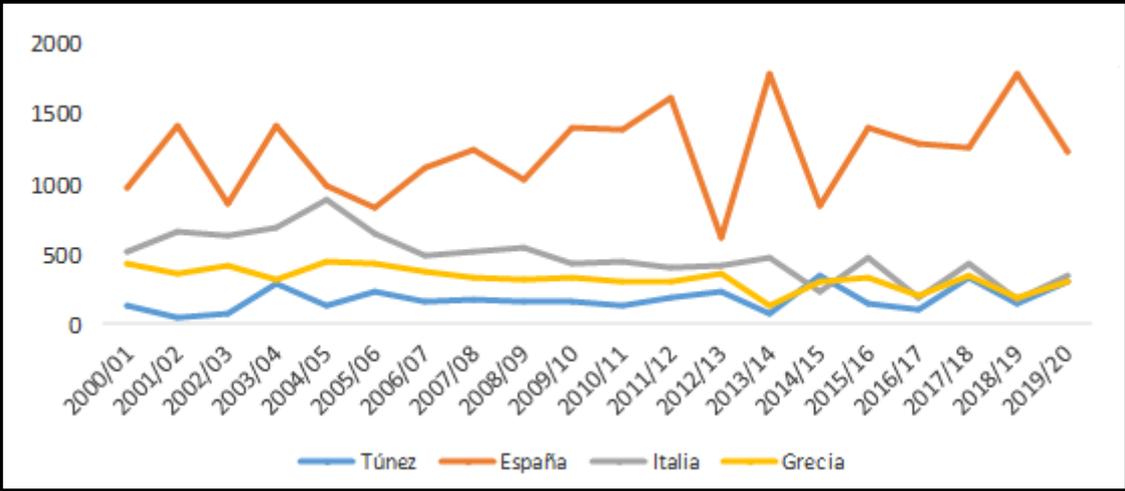
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del COI

Cabe señalar que desde la campaña 2013/14, la producción de aceite de oliva de Túnez se ha acercado cada vez más a las de Grecia e Italia (Figura 9). Esto se debe a la disminución de la producción italiana y griega y al aumento de la producción en Túnez. En efecto, durante las dos

últimas décadas (2000/01-2009/10) y (2010/11-2019/20) las producciones de aceite de oliva de Italia y Grecia disminuyeron un 50% y 26%, respectivamente, mientras que la de Túnez aumentó en un 28,5% aproximadamente. Sin embargo, España mantiene una evolución positiva con un aumento del 17,5% en el mismo período.

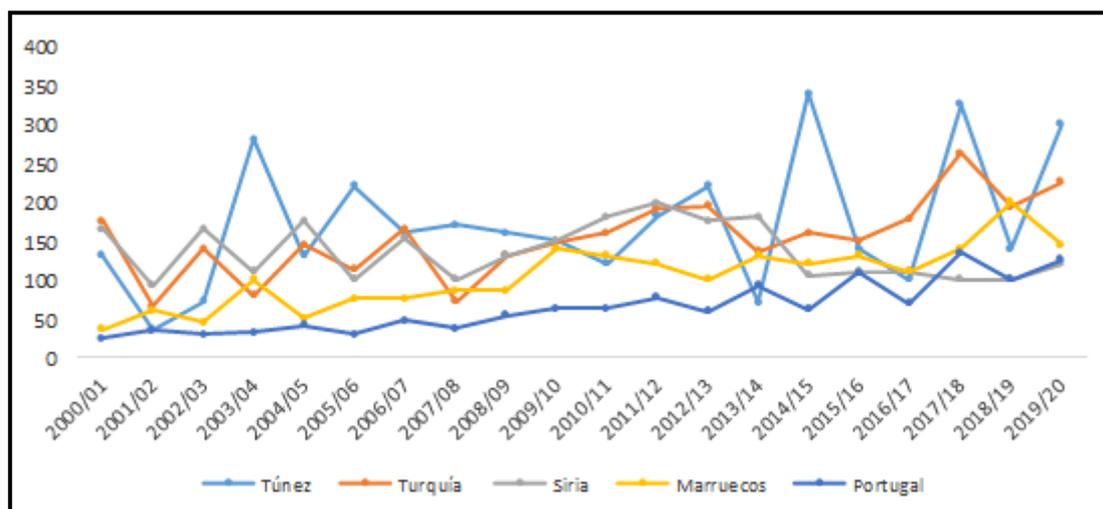
Por otra parte, la competencia de otros países está aumentando. Turquía y Marruecos, que se encuentran justo después de Túnez en el ranking mundial de producción de aceite de oliva, han aumentado su producción de manera significativa, con una evolución positiva del 50% y el 76% en los dos decenios (2000/01-2009/10) y (2010/11-2019/20), respectivamente, acercándose cada vez más a la producción tunecina (Figura 10).

Figura 9. Evolución de la producción de aceite de oliva (x1000 toneladas) en los principales países productores del mundo en el periodo (2000/01- 2019/20)



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del COI

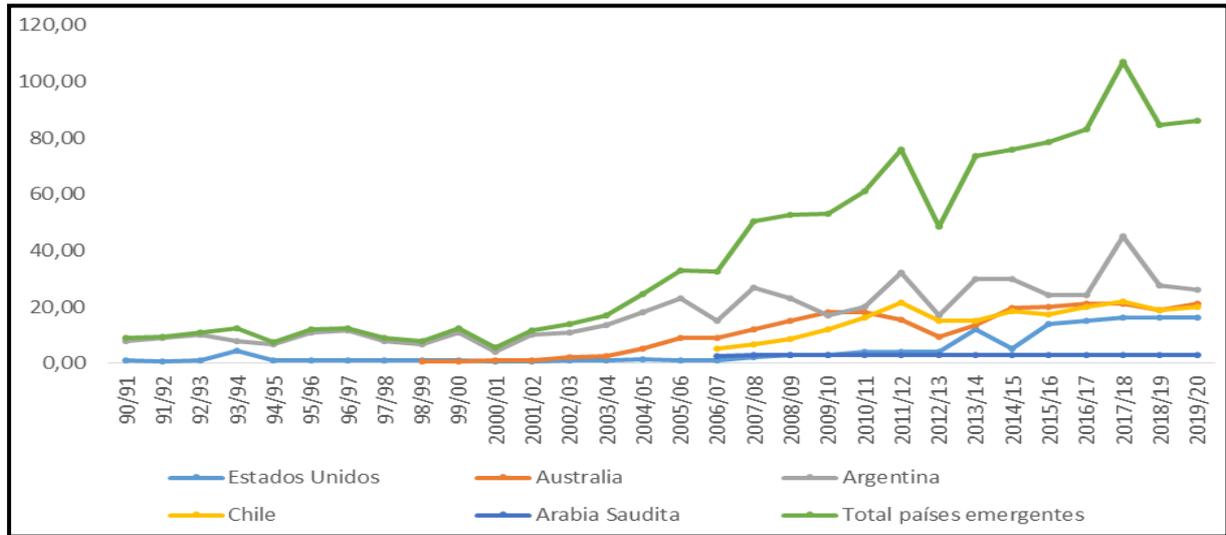
Figura 10. Evolución de la producción de aceite de oliva (x1000 toneladas) en los principales países competidores de Túnez en el periodo (2000/01 a 2019/20)



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del COI

Por otra parte, el sector del olivar ha sido testigo del notable surgimiento de nuevos países en la producción mundial de aceite de oliva, principalmente: Estados Unidos, Australia, Argentina, Chile y Arabia Saudita (Figura 11). Estos nuevos países han aumentado su producción de una manera muy significativa. Por ejemplo, la producción entre las décadas (1990/91-1999/00 y 2010/11-2019/20) registró en: i) Estados Unidos, un aumento del 715%; ii) Australia, un aumento del 3.460%; iii) Argentina, un incremento del 208% (Figura 11).

Figura 11. Evolución de la producción de aceite de oliva (x1000 toneladas) en los principales países emergentes en el sector oleícola mundial (90/91-2019/20)



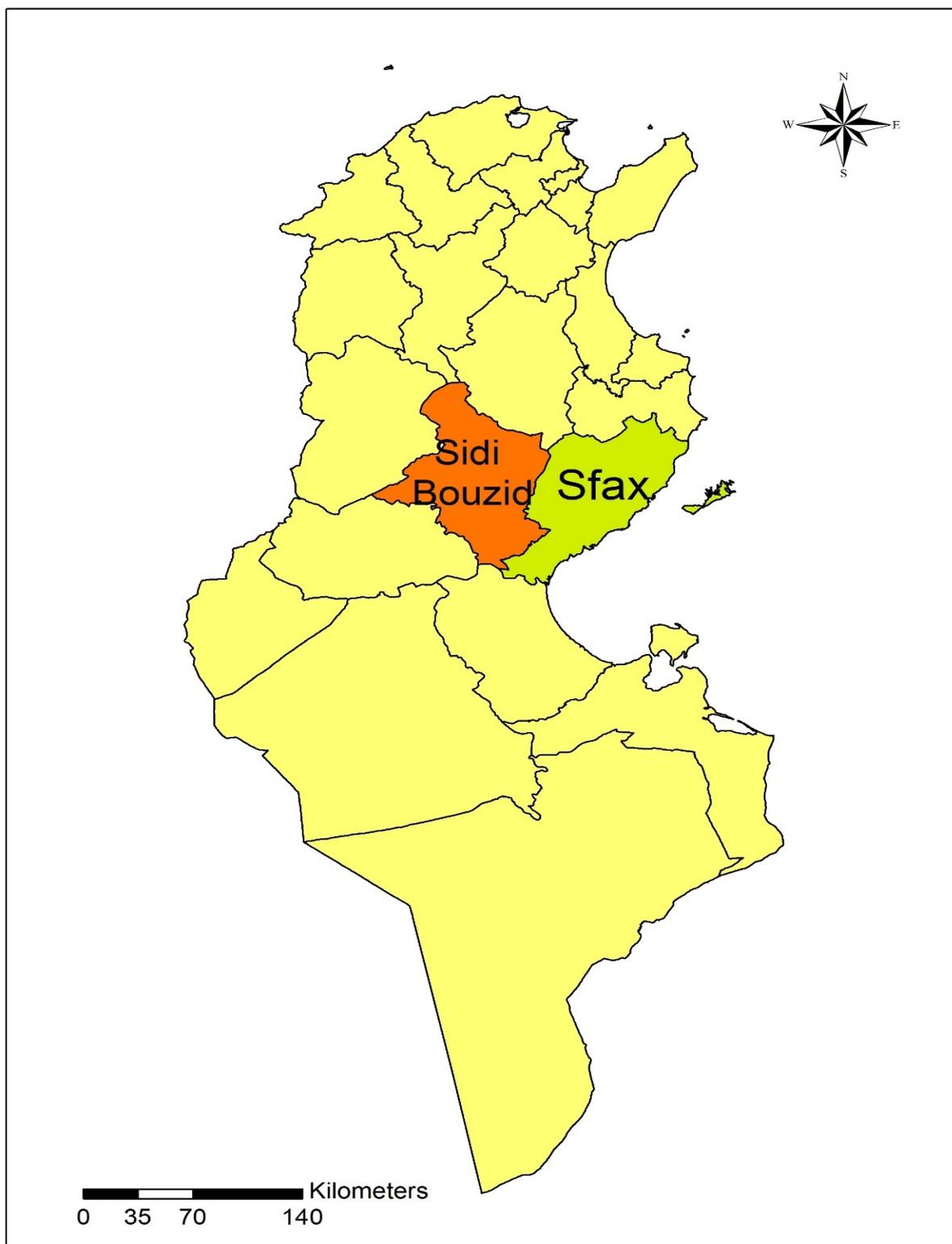
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del COI

Estados Unidos de América, Australia, Argentina, Chile, Arabia Saudita, México, Nueva Zelanda, Sudáfrica, entre otros, recurren a métodos intensivos y altamente mecanizados permitiendo aumentar los rendimientos y reducir los costes de producción (De Gennaro et al., 2012; Espadas-Aldana et al., 2019).

3.4. Zonas olivareras objeto de estudio

Este estudio se centra en las regiones de Sfax y Sidi Bouzid, localizadas en el centro-este de Túnez (Figura 12). Estas regiones suponen el 34% de la superficie oleícola y son las mayores productoras de aceite de oliva del país (32% de la producción) (DGPA, 2019; AgriDATA, 2020). En estas zonas, el cultivo del olivo está limitado por las condiciones climáticas adversas (clima árido y una precipitación media anual de 250 mm). La densidad media de plantación del olivo tradicional de secano es muy baja (17-34 árboles ha⁻¹) con rendimiento muy bajo (0,6 t ha⁻¹), lo que afecta cada vez más a la sostenibilidad del sector (Jackson et al., 2015).

Figura 12. Sfax y Sidi Bouzid en el mapa de Túnez



3.4.1. Sfax

La región de Sfax es la más importante en cuanto a la superficie de olivar y la producción de aceite de oliva en Túnez. La superficie olivarera de esta región es de aproximadamente 354.647 ha, lo que representa alrededor del 19% de la superficie olivarera nacional, que es aproximadamente de 1,85 millones ha (AgriData, 2020). En el periodo 2015-2019, Sfax contribuyó a alrededor del 21% de la producción nacional de aceite de oliva. En 2019, Sfax representó la segunda área de olivar ecológico, con alrededor del 22,27% de la superficie total del país dedicada al olivar ecológico.

3.4.2. Sidi Bouzid

Sidi Bouzid es la segunda región en términos de superficie de olivar y producción de aceite de oliva en Túnez. En esta región el cultivo del olivo ocupa 277.272 ha, lo que corresponde aproximadamente al 15% de la superficie olivarera total del país. La producción de aceite de oliva de Sidi Bouzid representa alrededor de 10,4% de la producción nacional. Sidi Bouzid es la región que tiene la mayor superficie de olivos intensivos de regadío, con un 21,6% de la superficie total del olivar de regadío (DGEDA, 2019). Además, Sidi Bouzid está dentro de las seis regiones más importantes con cultivo de olivar ecológico, con aproximadamente un 4% de la superficie nacional.

Parte II: Marco conceptual para la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas olivareros

Capítulo 4: Marco conceptual para la evaluación de la sostenibilidad

Capítulo 5: Evaluación de la sostenibilidad del sector de la olivicultura y elaiotecnia

Capítulo 4

Marco conceptual para la evaluación de la sostenibilidad

En el presente Capítulo se expone el marco conceptual utilizado en la tesis. El Capítulo está estructurado en tres apartados: 1) se presenta el concepto de la sostenibilidad; 2) se define y se describen diferentes enfoques en la evaluación de la sostenibilidad; y 3) se presentan las metodologías analíticas para la evaluación de la sostenibilidad usadas, esto es, el Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA), en concreto la metodología AHP, y las herramientas de la evaluación del Ciclo de Vida (CV).

4.1. Concepto de sostenibilidad

El concepto de sostenibilidad se introdujo por primera vez hace más de 300 años (en 1713) en un tratado sobre la gestión forestal en Alemania, en el que se recomendaba la tala sostenible de árboles para preservar el bosque a largo plazo (Michelsen et al., 2016). La sostenibilidad se ha convertido en un asunto de gran relevancia, pero a la vez de gran controversia, en la investigación científica, las políticas de desarrollo y las prácticas de gestión agrícola e industrial, especialmente tras el debate sobre el desarrollo sostenible desencadenado por el informe Brundtland en 1987 (WCED, 1987) y la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro en 1992 (Naciones Unidas 1993). Sin embargo, el mundo aún está lejos de alcanzar el deseado equilibrio de las necesidades ambientales, económicas y sociales inter e intra-generacionales.

En el ámbito académico y científico, los conceptos de desarrollo sostenible y sostenibilidad están frecuentemente asociados y se utilizan como sinónimos en la literatura (Olawumi y Chan, 2018; Sartori et al., 2014; Ruggerio, 2021). El concepto de desarrollo sostenible se definió en el informe "Nuestro futuro común", publicado por la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo en 1987, como: "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades..." (WCED, 1987). Desde entonces, han surgido diferentes interpretaciones del concepto y se ha desencadenado un importante debate científico, criticando la ambigüedad y la vaguedad de esta definición y la contradicción del concepto vinculada a la impracticabilidad de un crecimiento económico infinito en un planeta limitado (Sachs, 1999; Onisto, 1999; Redclift, 2005). Así, la sostenibilidad pasó de ser un término localizado y técnico en sus orígenes a una

cuestión global y cargada de valores. Este cambio de alcance y contenido vino acompañado de una amplia variedad de definiciones (Troullaki et al., 2021).

Actualmente, existe cierto consenso en la literatura sobre la naturaleza multidimensional de la sostenibilidad, referida a la vez las dimensiones ambiental, económica y social, que a su vez están interrelacionadas (Ruggerio, 2021). La necesidad de esta conceptualización multidimensional de la sostenibilidad ha sido destacada por varios autores como Drexhage y Murphy (2010), que señalan que es necesario sacar el desarrollo sostenible de la "caja" ambiental y considerar agendas sociales, económicas y geopolíticas más amplias. Esto ha sido reiterado en el documento final de Río+20 "El futuro que queremos", que aborda tres dimensiones del desarrollo sostenible: ambiental, económica y social. Estas dimensiones fueron también adoptadas por la Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible (SDSN) incluyendo la buena gobernanza como otra dimensión. Además, la SDSN insiste sobre la necesidad de un enfoque integrado y multidimensional de la sostenibilidad como destacado en el documento "Una Agenda de Acción para el Desarrollo Sostenible" (SDSN, 2013). En términos sencillos, la sostenibilidad de un sistema debe abarcar y asegurar la protección del medio ambiente y la gestión responsable de los recursos naturales en la dimensión ambiental, la viabilidad económica garantizando un rendimiento financiero estable en la dimensión económica, y la generación de valor y bienestar (inclusión, equidad, etc.) para las poblaciones en la dimensión social.

Cabe destacar que las diferentes interpretaciones e implicaciones de la sostenibilidad dependen de las condiciones y prioridades ambientales, económicas, sociales y culturales de la sociedad y de los diferentes grupos de interés afectados y la zona geográfica en cuestión y de la visión y los objetivos de los investigadores y decisores (Landais, 1998, André et al., 2007). Por tanto, la sostenibilidad puede tener una connotación política o normativa (Troullaki et al., 2021). Para algunos autores la sostenibilidad es un concepto "perverso" (Rittel y Webber, 1973) y, entendida como propiedad de un sistema complejo, emergente y socialmente estructurado, cualquier iniciativa para analizarla está sujeta a perspectivas normativas y exige un razonamiento sistémico (Brown et al., 2010).

4.2. Evaluación de la sostenibilidad

Para la evaluación de la sostenibilidad se dispone de un conjunto de herramientas emergentes de toma de decisiones y ampliamente empleado en muchos campos de investigación (agricultura, industria, etc.) para apoyar el cambio hacia procesos, prácticas, productos y/o servicios más sostenibles. La evaluación de la sostenibilidad no sólo tiene el potencial de detectar los puntos conflictivos de la sostenibilidad, sino también de seleccionar la solución más sostenible y apoyar así el proceso de toma de decisiones (Lettner et al., 2018). Algunos ejemplos de definiciones disponibles de la evaluación de la sostenibilidad incluyen:

- "La evaluación de la sostenibilidad es... una herramienta que puede ayudar a los decisores y a los responsables políticos a decidir qué medidas deben tomar y cuáles no para intentar que la sociedad sea más sostenible" (Devuyst, 2001, p. 9).
- El objetivo de la evaluación de la sostenibilidad es perseguir que "los planes y las actividades contribuyan de forma óptima al desarrollo sostenible" (Verheem, 2002).

Las técnicas para la evaluación de la sostenibilidad se consideran una extensión de los métodos de evaluación del impacto que adoptan diferentes enfoques, desde los más holísticos hasta los más operativos, que incluyen múltiples criterios/dimensiones como el enfoque de los tres pilares ambiental, económico y social de la Triple Cuenta de Resultados (TBL) (Convertino et al., 2013; Tatham et al., 2014; Cinelli et al., 2014). La implementación de un enfoque concreto depende del marco y los objetivos planteados para la evaluación de la sostenibilidad, así como de los mecanismos y procesos considerados según la escala del análisis, que puede ser micro, meso o macro (Zamagni et al., 2009; Cinelli et al., 2013; Cinelli et al., 2014). A pesar de la existencia de multitud de métodos, la elección de un marco metodológico adecuado para la evaluación de la sostenibilidad es un proceso complejo debido a la existencia de pocas directrices y criterios para su elección en casos concretos y la escasa disponibilidad de datos en el contexto de las actividades de investigación y desarrollo (Gasparatos y Scolobig, 2012; Chebaeva et al., 2021). Para ello, para implementar un instrumento/herramienta adecuado/a, es necesario definir y estructurar claramente los elementos clave del estudio de caso, tales como el problema abordado, el alcance y los aspectos o dimensiones (unidimensionales/multidimensionales) del estudio (Sala et al., 2013a, b).

En este contexto, existen algunas diferencias entre las metodologías y herramientas e indicadores desarrolladas para llevar a cabo estudios de evaluación de la sostenibilidad. Algunas pueden abarcar una dimensión/pilar (por ejemplo, el Análisis del Ciclo de Vida - ACV)

y otras pueden tratar o integrar cuestiones unidimensionales/multidimensionales (tales como los métodos de análisis multicriterio) (Singh et al., 2009; Zamagni et al., 2009). Por ejemplo, el análisis de decisión multicriterio (MCDA) es un conjunto de métodos que pueden cubrir una o más dimensiones de la sostenibilidad para evaluar y comparar alternativas desde el nivel de producto hasta el de la política (Munda, 2005; Epa, 2006) mientras que el ACV es un instrumento que permite evaluar el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de productos, sistemas (por ejemplo, sistemas de producción agraria), procesos (por ejemplo, gestión de residuos), sectores, etc.

Ness et al. (2007) proporcionan una clasificación de una amplia gama de herramientas de evaluación de la sostenibilidad, incluyendo tres áreas principales: 1) los indicadores y los índices; 2) las evaluaciones relacionadas con los productos; y 3) la evaluación integrada.

- 1) Los indicadores y los índices reúnen los métodos basados en convertir los conocimientos en unidades de información manejables (UN, 2001) y la interpretación de los indicadores y sus agregaciones (índices) y pueden ser definidos como una "representación operativa de un atributo de un sistema" (Gasparatos et al., 2008), que puede consistir en un estado ambiental, económico o social del que se trate (sistema, proceso, etc.). Cabe citar, por ejemplo, los indicadores nacionales elaborados por la División de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y los indicadores de presión ambiental (UN, 2001; Gasparatos et al., 2008). Este enfoque relativamente sencillo no comprende la interpretación de los indicadores en un complejo de análisis de seguimiento (Cinelli et al., 2014).
- 2) Las evaluaciones relacionadas con los productos abarcan herramientas que se aplican a los procesos de producción y consumo de bienes y servicios mediante un enfoque de flujo. Estas metodologías se emplean para evaluar los impactos y el uso de recursos a lo largo del ciclo de vida del producto, generalmente considerando la dimensión ambiental o incluyendo un número limitado de factores sociales y/o económicos. En este caso, los métodos aplicados incluyen los enfoques basados sobre el ciclo de vida (el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), el cálculo del coste del ciclo de vida (CCV), el Análisis Social del Ciclo de Vida (AS-CV)), el análisis energético del producto y el análisis del flujo de materiales.
- 3) La evaluación integrada reúne enfoques que pretenden manejar la información de los indicadores individuales de forma holística, teniendo en cuenta sus diferentes

importancias y diferentes grados de agregación, así como las interdependencias e interrelaciones entre ellos, y suele implicar la evaluación ex-ante de la sostenibilidad de una política o proyecto. Por ejemplo, el análisis multicriterio, el análisis de riesgos e incertidumbres, la modelización conceptual y la dinámica de sistemas, el análisis coste-beneficio, la evaluación de impacto y el análisis de vulnerabilidad.

Por otra parte, en función de los tipos de datos requeridos, las metodologías de evaluación de la sostenibilidad pueden también dividirse en enfoques cuantitativos, semi-cuantitativos o cualitativos (Bovea y Pérez-Belis, 2012).

4.3. Metodologías para la evaluación de la sostenibilidad

A continuación, se presentan y describen las metodologías utilizadas para la evaluación de la sostenibilidad en esta tesis.

4.3.1. Análisis de decisión multicriterio (MCDA)

El MCDA consiste en un conjunto de métodos que pueden ser de utilidad para realizar una evaluación integrada de la sostenibilidad, al permitir tener en cuenta tanto aspectos unidimensionales como multidimensionales de la sostenibilidad. El MCDA permite incorporar diferentes valores, perspectivas, partes interesadas, así como consideraciones intergeneracionales e intra-generacionales, incertidumbres, etc. (Munda 2005; Bond et al., 2012). El MCDA, como su nombre indica, es un enfoque orientado a apoyar los procesos de toma de decisiones y tiene la propiedad de procesar varias informaciones/elementos a la vez (criterios/indicadores, sub-criterios/sub- indicadores, opiniones, alternativas), lo que le confiere la capacidad de estructurar y tratar de forma adecuada un concepto polifacético y complejo como es la sostenibilidad. Las metodologías del MCDA permiten examinar múltiples criterios de forma explícita y utilizarlos para evaluar, comparar y clasificar alternativas (productos, procesos, sistemas, tecnologías, etc.) en función de su cumplimiento del objetivo de análisis (Belton y Stewart, 2002).

En general, el MCDA se divide en dos categorías: la toma de decisiones multi-objetivo "MODM" (Multi Objective Decision Making) y la toma de decisiones multiatributo "MADM" (Multi Attribute Decision Making) (Geldermann y Lerche, 2015). En el MODM se establece un compromiso entre criterios libres de alternativas concretas (espacio de solución continuo),

es decir, el problema implica naturalmente varios objetivos en competencia que deben optimizarse simultáneamente y las alternativas no están predeterminadas. En el MADM el número de alternativas está predeterminado y, por tanto, la mejor alternativa se determina a partir de un conjunto de alternativas discretas.

En la literatura científica, el MCDA ha sido ampliamente utilizado para evaluar la sostenibilidad, como destacan varios autores (Huang et al., 2011; Akadiri y Olomolaiye, 2012, entre otros). En particular, los enfoques de la MADM (específicamente: MAUT (Multi Attribute Utility Theory), AHP (Analytic Hierarchy Process), ELECTRE (Elimination and choice expressing the reality) y PROMETHEE (Preference ranking organization method for enrichment of evaluations)) han sido las herramientas MCDA más utilizadas en la investigación sobre la sostenibilidad (Wang et al., 2009; Huang et al., 2011; Herva y Roca, 2013). Los métodos de evaluación del MADM pueden clasificarse en escuelas clásicas americanas y europeas/francesas. Así, el análisis de utilidad (UTA) o el AHP (Analytic Hierarchy Process) pertenecen a los enfoques clásicos de la escuela americana. La teoría basada en la utilidad (MAUT) incluye métodos que permiten sintetizar la información en un único parámetro (también llamada enfoques basados en la agregación del desempeño) y fue introducida durante la década de 1970 por Keeney y Raiffa (1976). La escuela europea/francesa proporciona enfoques de superación “outranking” como los adoptados en el ELECTRE y el PROMETHEE. La teoría del “outranking” (también llamados enfoques de agregación de preferencias) propone métodos basados en la comparación de opciones por pares para comprobar si "una alternativa es al menos tan buena como otra" (Roy, 1991). Los métodos clásicos incluyen siempre un enfoque compensatorio, es decir, los malos resultados en un criterio pueden compensarse con los buenos resultados en otro criterio, mientras que en los enfoques de “outranking” es posible aplicar procesos totalmente compensatorios o no compensatorios en absoluto.

Entre todos los métodos, MCDA, AHP y MAUT son los más utilizados en la evaluación de la sostenibilidad (Troullaki et al., 2021), debido a su comprensión bastante sencilla y a la existencia de software específico (Cinelli et al., 2014). El siguiente apartado describe la metodología AHP, que es el método MCDA utilizado en la evaluación de la sostenibilidad en esta tesis (Capítulos 6 y 8).

4.3.1.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico – Analytic Hierarchy Process (AHP) introducido por Saaty (1980) dentro del MCDA, y está basado en la agregación de resultados y creado para mejorar el proceso de toma de decisiones a través de la organización de las opiniones de diferentes decisores. El AHP permite estructurar problemas reales multi-objetivo en un modelo jerárquico racional, es decir, organizar un problema de toma de decisiones en subniveles más comprensibles y evaluables subjetiva u objetivamente (Bushan y Rai, 2004). Examinar todos los aspectos de una elección compleja puede resultar arduo y, en consecuencia, priorizar las posibles alternativas para tomar decisiones racionales se convierte en algo complicado para los responsables de la toma de decisiones (De Luca et al., 2018b).

Para resolver un problema de decisión y simplificar el proceso, el método AHP propone una serie de fases/etapas. En primer lugar, hay que identificar claramente los elementos clave del análisis, es decir, el objetivo general o meta, los objetivos/criterios de evaluación y las alternativas, y organizarlos en una estructura jerárquica de árbol. En un nivel descendente, el objetivo general del análisis o meta es la base o raíz principal de este árbol, del que se derivan los nodos (objetivos o criterios principales) y del que se desprenden los correspondientes sub-criterios y a cada uno de ellos se le asignan las alternativas en la parte inferior del árbol.

La segunda fase consiste en la recogida de los juicios de los expertos, agentes implicados y/o responsables de la toma de decisiones (soft data), que deben ser especialistas y, preferiblemente, directamente implicados en el tema abordado. En cada nivel del modelo jerárquico, los expertos/decisores realizan comparaciones por pares entre los elementos de ese nivel (criterios, sub-criterios y alternativas) con respecto a la satisfacción del elemento correspondiente del nivel inmediatamente superior. La preferencia o importancia relativa de cada criterio/sub-criterio//alternativa asignada por el decisor se expresa en términos cualitativos según una escala de valores numéricos de 1 a 9 (Saaty, 1980). En caso de existir información cuantificada (hard data), también pueden incorporarse en AHP.

El tercer paso consiste en la elaboración de una matriz cuadrada de comparaciones expresada como ratios con un rango igual al número de criterios considerados. Posteriormente, se procede a la reducción de la matriz de comparaciones por pares a un conjunto de prioridades locales (con respecto al elemento del que dependen) que representan la importancia/preferencia/probabilidad relativa de cada criterio y sub-criterio y de las alternativas (vectores de prioridad) (Belton y Stewart, 2002).

Finalmente, en la última fase, las prioridades locales de los criterios, sub-criterios y alternativas se combinan para calcular la prioridad global de cada alternativa a nivel del objetivo general o meta mediante la suma ponderada de las prioridades locales (Parra-López et al., 2008b). Estas prioridades globales de las alternativas están normalizadas, es decir, toman valores entre 0 y 1 y deben sumar 1 (Belton y Stewart, 2002).

4.3.2. Métodos de evaluación del Ciclo de Vida (CV)

4.3.2.1. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

4.3.2.1.1. Definición y objetivos del ACV

El ACV es una metodología que permite cuantificar los impactos ambientales generados durante el ciclo de vida de un producto o proceso y, por lo tanto, establecer el perfil ambiental de un sistema determinado. El ACV es una técnica muy útil para i) analizar y evaluar los impactos ambientales en las fases del ciclo de vida; ii) identificar los puntos críticos de alta carga ambiental; y iii) comparar diferentes soluciones o escenarios (De Luca et al., 2018b). Así, el ACV permite proponer estrategias de mitigación para una gestión eficiente y respetuosa con el medio ambiente de un proceso productivo determinado. Una evaluación adecuada del impacto ambiental es un instrumento útil para promover un desarrollo sostenible (Bruhn-Tysk y Eklund., 2002). En el contexto del desarrollo sostenible, las tres dimensiones clásicas de la sostenibilidad (ambiental, económica y social) son complementarias y están estrechamente interrelacionadas. Por lo tanto, la mejora de una dimensión tiene consecuencias para el bienestar social en su conjunto.

El ACV es una de las principales herramientas de evaluación ambiental utilizadas para apoyar la toma de decisiones para el desarrollo sostenible (Brusseau, 2019). Es un método multicriterio y holístico de toma de decisiones utilizado para diseñar o rediseñar sistemas, comparar escenarios y proponer estrategias de mejora. Este instrumento es el único método que evalúa el impacto ambiental de un producto a lo largo de todo su ciclo de vida (Muthu, 2014). El origen del ACV proviene de los análisis de energía en los años 60 y 70 para convertirse en una herramienta de gran alcance en el campo de la evaluación ambiental (McManus y Taylor., 2015). Esta herramienta de evaluación ambiental proporciona un apoyo científico a los responsables de la toma de decisiones. El ACV se rige por las normas internacionales de gestión ambiental ISO 14040 e ISO 14044 (ISO 14040: 2006: Environmental management- Life Cycle

Assessment- Principles and framework, 2006a; ISO 14044: 2006: Environmental management- Life Cycle Assessment- Requirement and guidelines, 2006b).

4.3.2.1.2. Evolución histórica del ACV

El ACV surgió a finales de la década de 1960 en Estados Unidos, en el sector del análisis y gestión de energía y recursos y los efectos ambientales asociados. El ACV ha pasado por tres grandes etapas de desarrollo y adopción (McManus y Taylor, 2015). Inicialmente, fue utilizado por empresas en la gestión de la energía y manejo de residuos, limitado a productos específicos, pero la mayoría de estos estudios no fueron publicados. Los primeros motivos de su uso fueron la crisis energética y el manejo de residuos sólidos. Entre 1980 y 1990 aumentan las preocupaciones ambientales internacionales tales como las relacionadas con la destrucción de la capa de ozono y el cambio climático, que fueron los temas principales de la Conferencia de Río de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en la que se establecieron normas relacionadas con el calentamiento global, a nivel de naciones individuales y colectivamente (como a nivel de la UE). Desde entonces, se han realizado esfuerzos para desarrollar y definir un marco metodológico del ACV.

Cabe destacar el papel de la SETAC en Estados Unidos (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) que, desde su creación en 1979 y sobre todo a principios de los años 1990, ha desempeñado un papel muy importante en el desarrollo de la metodología del ACV, su conceptualización y los criterios de aplicación, así como en la publicación de las primeras directrices para realizar el inventario del ciclo de vida y las guías para su difusión. En este marco, otras organizaciones también se han esforzado por patrocinar talleres y proyectos como la USEPA (US Environmental Protection Agency), SETACEurope, asociaciones de grandes compañías como SPOLD en Europa (Society for the Promotion of LCA Development) y otras organizaciones internacionales, como la Organización Internacional de Normalización (ISO), y profesionales del ACV en todo el mundo. A finales de los años noventa, empezaron los trabajos con software específicos. Las primeras normas internacionales ISO relacionadas con el desarrollo del ACV se inspiraron en las normas establecidas por SETAC. Por lo que en 1993 se creó el Comité Técnico 207 (ISO/TC 207) con el fin de desarrollar normas internacionales para la gestión medioambiental. En 1997, se establecieron cuatro normas (ISO 14040, 14041, 14042 y 14043) indicando respectivamente los principios y estructura del ACV (marco metodológico), definición de objetivos y alcance, análisis del inventario (evaluación de

impactos) y la interpretación del ACV. En 2006, estos estándares enumerados se fusionaron en dos normas: ISO 14040 (ISO, 2006a) y 14044 (ISO, 2006b), que definen los principios generales y marco de referencia de la metodología y el contenido técnico para los usuarios del ACV. En el año 2012, la plataforma europea sobre análisis de ciclo de vida publicó el ILCD (International Reference Life Cycle Data System) como referencia para el desarrollo de ACV.

4.3.2.1.1. ACV y agricultura

Actualmente se espera que la agricultura sea competitiva, para producir alimentos de alta calidad en cantidades suficientes, y que sea respetuosa con el medio ambiente (Commission of the European Communities, 1999; UN-DSD, 2000). Debido a la creciente conciencia ambiental de los consumidores de un gran número de países de todo el mundo, se requiere un conocimiento más profundo sobre los impactos ambientales de las actividades agrícolas (Mourad et al., 2007). Pero la agricultura implica una explotación del medio natural. Los primeros estudios acerca de la influencia de la agricultura sobre el medio ambiente se inician en 1973 coincidiendo con la crisis energética, y se basan en los análisis de la energía utilizada. Entre los diversos trabajos existentes en este campo, cabe destacar la obra de Pimentel (1980) y la aplicación específica a cultivos en invernadero (Stanhill, 1980).

Desde 1995 se han desarrollado diversas acciones para investigar cómo debería aplicarse el ACV a la producción agrícola. Así, a escala europea se han realizado algunos proyectos de adaptación de la metodología del ACV a la agricultura. Mediante la acción concertada “Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture” (Audsley, 1997), se investigó como el ACV puede ser aplicado a la producción agraria, estableciendo las primeras pautas para su aplicación en esta actividad económica e identificando las dificultades metodológicas que requieren una investigación más profunda. En el ámbito metodológico, destacan las contribuciones de Cowell (1998) en cuanto al establecimiento de pautas para el desarrollo de ACVs en los productos agrarios y de Milà (2003), destacando la importancia del estudio de los factores locales en el ACV de los productos agrícolas. Los sistemas de producción agrícola contribuyen a un amplio rango de impactos ambientales (ej. Huella de carbono, acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, etc.). Con el fin de analizar y comparar las cargas ambientales relacionadas con los sistemas de producción agrícola, es necesario considerar todos los impactos ambientales (Brenttrup et al., 2004).

Tras la adaptación de la metodología para su aplicación en agricultura, diversos estudios lo han utilizado para comparar diferentes sistemas de producción de cultivos intensivos, orgánicos, integrados y convencionales (Cowell, 1998; Mattsson, 1999; Milà, 2003; Romero-Gómez et al., 2014, 2017, 2020, entre otros). La agricultura ecológica es un sector en auge, donde también se aplica el ACV. Hay una gran necesidad de una evaluación comparativa sistemática del impacto ambiental de la agricultura ecológica con el fin de proporcionar orientaciones para la mejora continua de la sostenibilidad en este sector.

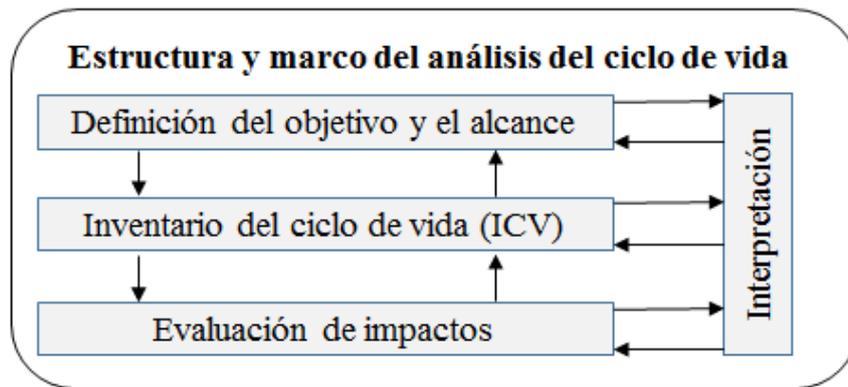
En el territorio español diversos grupos de investigación aplican el ACV en diferentes sectores agrarios: IFAPA (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera), IRTA (*Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries*), AGA (Grup d'Anàlisi i Gestió Ambiental), Universitat Politècnica de Valencia, Universitat Autònoma de Barcelona, entre otros. El sector de la ganadería y otros ámbitos dentro del sector agrario también cuentan con diversos grupos de trabajo.

4.3.2.1.2. Esquema general y etapas del ACV

El ACV es considerado un importante instrumento de análisis ambiental basado en una metodología rigurosa y transparente que se desarrolla y se mejora constantemente (Jolliet et al., 2005; Jolliet et al., 2010). El ACV consiste en calcular, para un producto dado, las cargas ambientales producidas desde la extracción de las materias primas hasta la eliminación del producto al final de su ciclo de vida, teniendo en cuenta las fases de transporte, fabricación y gestión de los residuos. Esta herramienta ambiental propone una compilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un proceso y/o producto a lo largo de su ciclo de vida (Padey, 2013). Por tanto, la implementación de un ACV apropiado requiere una gran cantidad de datos fiables y un marco metodológico bien definido y estructurado.

Como ya se ha indicado, para definir un proceso común bien estructurado del ACV, se han establecido las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044. En la primera norma se esboza el esquema general de la metodología y en la segunda se describe detalladamente cada etapa (ISO 2006a, 2006b). Según las normas ISO, el estudio del ACV tiene cuatro fases principales (Figura 13): i) definición del objetivo y el alcance; ii) establecimiento y análisis del inventario de datos, extracciones y emisiones relacionados con el objeto de estudio a lo largo del ciclo de vida (ICV); iii) análisis del impacto del ciclo de vida (AICV); y iv) interpretación de los resultados.

Figura 13. Etapas del ACV



Fuente: ISO, 2006a

4.3.2.1.2.1. Definición del objetivo y el alcance

Esta fase es la base del enfoque metodológico del ACV y es fundamental para lograr el éxito del análisis. Esta etapa consiste en definir y especificar claramente los límites del campo de estudio y los objetivos a alcanzar. En primer lugar, es necesario identificar claramente la problemática y las razones de la aplicación del ACV, ya que de estos objetivos fijados se derivan los principales elementos del análisis como los límites del sistema y la elección de la unidad funcional. Esta fase también implica la definición de los límites funcionales del sistema, es decir, los procesos y elementos considerados en el análisis. Los límites funcionales del sistema suelen corresponder a las siguientes expresiones: "puerta a puerta", "cuna a puerta" o "cuna a tumba", que deben adaptarse según el sistema estudiado (Jacquemin et al., 2012).

a) Función del sistema y unidad funcional

Se trata de definir la función del sistema y la unidad funcional, la cual corresponde a la unidad de referencia para la cuantificación de los parámetros de estudio (por ejemplo: unidad de producto agrícola en tonelada o litro, o unidad por área cultivada en hectárea). En esta etapa del ciclo de vida, debe fijarse el sistema a estudiar ya que es el conjunto de fases que componen la vida de un producto y su función. Por ejemplo, la elaboración de productos agroalimentarios incluye dos fases (la fase agrícola y la fase industrial o de transformación) generando dos productos diferentes como en el caso de las aceitunas (fase agrícola) y el aceite de oliva (fase industrial). En todo caso, la elección del sistema y de la unidad funcional deben cumplir los objetivos previstos.

Todos los flujos de inventario (recursos y emisiones), así como los resultados de los impactos, tomarán la unidad funcional (UF) como referencia (Jolliet et al., 2010). La unidad funcional es una unidad medible, precisa y aditiva que describe la función principal del sistema, y los impactos ambientales deben cuantificarse basándose en esta función y teniendo en cuenta los componentes espaciales y temporales en el cálculo de impactos (Abdou, 2017). Respecto a la componente temporal, por ejemplo, un sistema tradicional de producción de aceitunas puede tener un rendimiento constante de aceitunas hasta 50 años o más para disminuir luego, mientras que un sistema súper-intensivo puede tener como máximo un período de 16 años de ciclo de vida. En este caso, si el período de comparación es 50 años, las entradas y salidas del sistema súper-intensivo deben multiplicarse por tres para que sean comparables (De Gennaro et al., 2012). Con respecto a la dimensión espacial, se puede ilustrar simplemente un ejemplo de una comparación de los impactos de dos pesticidas A y B (Abdou, 2017): si el pesticida A genera la mitad del impacto del pesticida B, pero el pesticida B proporciona protección a los cultivos en una superficie de 50 km² mientras que el pesticida A sólo protege 25 km², el impacto del pesticida A debe multiplicarse por dos y finalmente el impacto real de los dos pesticidas es el mismo. Así que la UF debe ser el área protegida por el pesticida.

b) Límites funcionales

Tras definir los elementos citados anteriormente, hay que establecer los diferentes límites del sistema e identificar las entradas y salidas correspondientes, así como los procesos implicados. Además, es necesario definir los límites geográficos, temporales y tecnológicos del estudio, ya que tanto las características de los sistemas de producción como los requisitos legislativos pueden cambiar con el tiempo y de una región a otra, así como los hábitos y prácticas empleadas (Guinée et al., 2002).

En el desarrollo de un ACV, hay diferentes alcances dependiendo del objetivo del estudio y del producto analizado:

- (i) De puerta a puerta (Gate to gate): sólo tiene en cuenta las actividades productivas (proceso de producción).
- (ii) Desde la cuna a la puerta (Cradle to gate): teniendo en cuenta los aspectos desde la extracción y el envasado de las materias primas hasta el proceso de producción.
- (iii) De la puerta a la tumba (Gate to grave): considera el proceso de producción y cubre hasta la etapa de la gestión de los residuos.

- (iv) De la cuna a la tumba (Cradle to grave): incluye las fases desde el acondicionamiento de la materia prima hasta la gestión final de los residuos (incluyendo el reciclaje y otros).
- (v) De la cuna a la cuna (Cradle to cradle): considera todos los aspectos o el ciclo de vida completo del producto, a partir del acondicionamiento de las materias primas hasta la reintroducción del producto en otro proceso de producción después de no ser usado.

En agricultura, los estudios de ACV se han centrado por lo general en la fase agrícola ("de la cuna a la puerta" en lugar de "de la cuna a la tumba"), ya que se considera la parte más contribuyente al impacto en la mayoría de los casos (Roy et al., 2009; De Luca et al., 2018a).

Los procesos a cuantificar son los que componen el Ciclo de Vida considerado de un producto tales como: (i) Adquisición de materias primas (ii) Fabricación, procesado y formulación (iii) Distribución y Transporte (iv) Uso/Reutilización/Mantenimiento (v) Reciclado y (vi) Gestión de residuos.

4.3.2.1.2.2. Inventario del ciclo de vida (ICV)

Esta fase es crucial, ya que corresponde a la recopilación, cuantificación y organización de las entradas y salidas pertinentes de la base de datos o inventario y, por lo tanto, influye directamente en los resultados finales en función de la calidad de los datos recopilados. Esta fase es la que tarda más en completarse. Se trata de un flujo de materiales y energía asociado a cada fase o proceso elemental del ciclo de vida (los recursos consumidos y emisiones en los compartimentos considerados como el aire, el agua y el suelo). Todas las emisiones se expresan en relación a la unidad funcional. En base a los datos de este inventario, se calculan los impactos ambientales.

Los datos de las entradas y salidas ('inputs/outputs') del sistema estudiado pueden recopilarse de varias fuentes a través de estudios, experimentos o encuestas de campo, complementados por una búsqueda de la bibliografía en el área temática que se trate. Los datos sobre las emisiones se suelen recopilar a partir de modelos, expertos o, con mayor frecuencia, de bases de datos de inventarios establecidas, como la base de datos 'Ecoinvent' que es la más importante y la más utilizada en los estudios del ACV (Weidema et al., 2013). Esta base de datos proporciona una sinopsis de los datos relativos a los diferentes tipos de energía (petróleo, electricidad, gas natural, carbón, hidroeléctrica, etc.), materiales (biológicos, químicos, etc.),

tráfico (carretera, aéreo, marítimo, etc.), gestión de residuos (depósito, incineración, etc.) y también incluye procesos y productos electrónicos, agrícolas, etc. (Abdou, 2017). Además, se recomienda un análisis crítico de su calidad como base para el análisis de la incertidumbre (Busset, 2014; ISO, 2006a).

4.3.2.1.2.3. Análisis del impacto del ciclo de vida (AICV)

En esta etapa, el flujo de los recursos y emisiones incluido en el inventario (materiales, cantidades de energía consumida, etc.) se interpreta y se transforma en un número reducido de indicadores que representan los impactos ambientales del sistema o producto estudiado. El cálculo de estos indicadores se basa en una serie de pasos, unos obligatorios y otros opcionales, recomendados por la norma ISO (2006a). Los pasos obligatorios son la definición, clasificación y caracterización de las categorías de impacto. Los pasos opcionales comprenden la normalización y la ponderación.

Las categorías de impacto se seleccionan de acuerdo con el propósito y la relevancia en el contexto del estudio y deben ser lo más independientes posible y los modelos de su caracterización deben ser validados científicamente (ISO, 2006b). La clasificación es la asociación de las emisiones de contaminantes con efectos similares en el medio ambiente. La caracterización es la agregación de sus efectos en una sola categoría de impacto. Para ello, se multiplican los resultados del inventario obtenidos en la fase de clasificación por los factores de caracterización de cada sustancia dentro de cada categoría de impacto (ISO, 2006).

Tras finalizar la etapa de caracterización, la normalización consiste en dividir por un valor de referencia la suma de los resultados de cada indicador de categoría para comparar los indicadores de impacto entre sí. Con respecto a la ponderación, los indicadores normalizados de las diferentes categorías de impacto se convierten mediante factores numéricos (factores de ponderación) basados en valoraciones subjetivas. Se trata de multiplicar los resultados obtenidos en la fase de normalización por los factores de ponderación de cada sustancia dentro de cada categoría de impacto.

Con el fin de simplificar la complejidad existente en la etapa de evaluación de impacto, se han desarrollado metodologías de análisis del impacto del ciclo de vida (AICV). En la mayoría de las metodologías de AICV, las emisiones y el consumo de recursos son atribuibles a tres áreas principales de protección: calidad del ecosistema, salud humana y recursos naturales. Estas metodologías son herramientas para clasificar los resultados del ICV en categorías de impacto,

facilitando las comparaciones entre las diferentes alternativas de procesos o productos. En este contexto, hay dos tipos de enfoques de caracterización: enfoque de punto medio y enfoque de punto final. Estos dos enfoques permiten distinguir dos tipos de categorías de impacto (Figura 14):

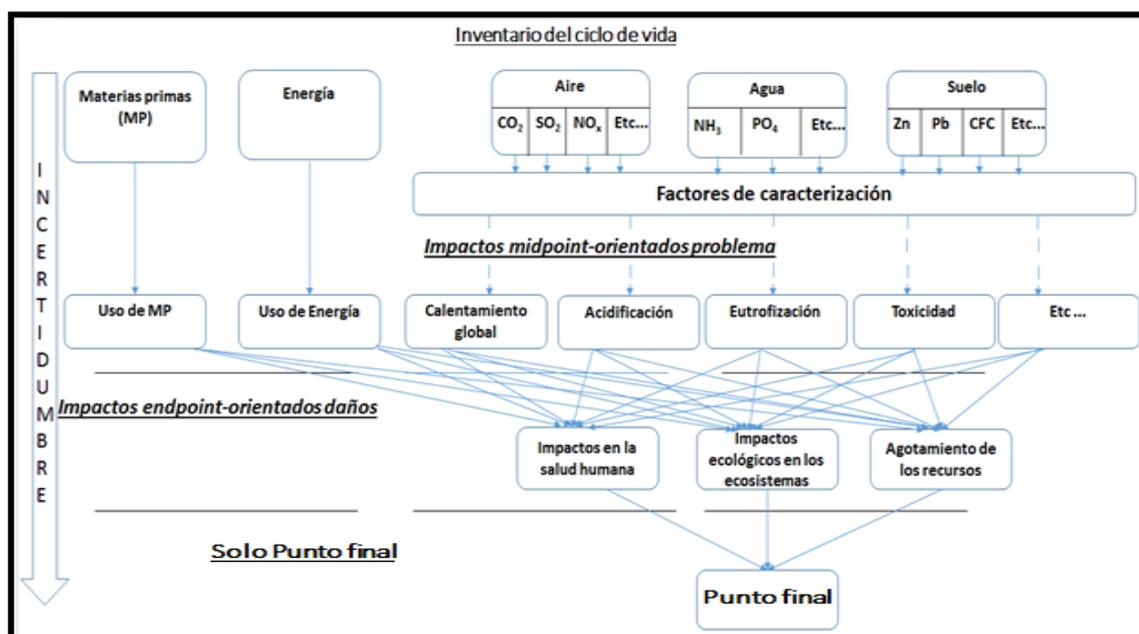
i) Categorías de impacto orientadas al problema o punto medio (midpoint): La caracterización en este nivel permite indicar principalmente la influencia relativa de las emisiones de una sustancia en una categoría de impacto. Ejemplos de estas categorías de impacto de punto medio son: el calentamiento global, la acidificación, la eutrofización, la toxicidad, etc.

ii) Categorías de impacto orientadas a los daños o al punto final (endpoint): La caracterización a nivel de punto final requiere modelar las categorías de punto final descritas por las áreas de protección (en la mayoría de las metodologías, las áreas principales de protección son, como ya se ha indicado: calidad del ecosistema, salud humana y recursos). En este caso, las categorías de impacto representan una cuantificación de los efectos secundarios de las emisiones (por ejemplo, los problemas de cataratas y cáncer pueden ser causados por el aumento de la radiación UV debido al agotamiento del ozono).

En este marco, existen dos métodos de evaluación (Jolliet et al., 2003) (Tabla 6):

- 1) Métodos orientados a problemas:** Por ejemplo, los métodos CML y EDIP. Estos métodos de evaluación agrupan los resultados del ICV en las denominadas categorías de punto medio, según los temas y, por lo tanto, limitan la modelización cuantitativa a las primeras etapas de la cadena causa-efecto.
- 2) Métodos orientados a los daños:** Como el Eco-indicador 99 y el EPS. Este método de evaluación de impactos modela la cadena causa-efecto hasta el daño relacionado con las diferentes áreas de protección ambiental consideradas y, por tanto, hasta el punto final.
- 3) Métodos orientados a problemas y daños:** Recientemente, es válido otro tipo de método combinación de ambos enfoques (punto medio y punto final) con el fin de explotar las ventajas de ambos métodos. Esta iniciativa fue el resultado del trabajo conjunto entre la SETAC y UNEP (United Nations Environmental Program).

Figura 14. Categorías de impactos asociados al análisis del ciclo de vida



Fuente: Elaboración propia basada en ISO (2006b)

Tabla 6. Enfoque metodológico de los principales métodos de cálculo de impacto

Método	Midpoint	Endpoint
CML 2001	X	
ILCD 2011	X	
EDIP 2003	X	
Recipe	X	X
IMPACT 2002+	X	
EcoIndicator 99		X
BEES	X	
TRACI 2.1	X	
Ecological Footprint		X
IPCC 2007	X	
USEtox	X	

Fuente: Elaboración propia

Para ayudar a los usuarios en el desarrollo de estudios de ACV, existen herramientas informáticas específicas de software: SimaPro, Gabi, Umberto[®] y openLCA (Silva et al., 2017). Según Speck et al. (2016) y Silva et al. (2019) cada software tiene sus propias características y

los resultados pueden ser diferentes según el software que elija el usuario. Por tanto, la elección del programa informático para realizar una evaluación del ciclo de vida es un factor muy importante. En base a ciertos criterios, Ormazabal et al. (2014) concluyen que SimaPro y GaBi fueron las herramientas de software ACV más utilizadas en la literatura y en el mercado.

4.3.2.1.2.4. Interpretación

Esta última etapa de la evaluación del ciclo de vida es una síntesis de las tres primeras fases. Se trata de extraer conclusiones y recomendaciones generales basadas en i) los objetivos del estudio, y ii) análisis críticos e interpretaciones objetivas del enfoque o los resultados de cada fase. De esta manera, se puede hacer una revisión a través de las interpretaciones críticas en las tres etapas mencionadas anteriormente. Esto le confiere al ACV el aspecto de un método iterativo (ISO, 2006a).

4.3.2.1.3. Principales limitaciones, críticas y complejidades asociadas a la metodología ACV

El ACV es una metodología que ofrece varias ventajas para la evaluación ambiental de los sistemas con un enfoque holístico, que considera múltiples criterios ambientales y todo el ciclo de vida. Esto es evidente en su amplia expansión como metodología de referencia a diferentes niveles: en la investigación, la industria y la toma de decisiones políticas, entre otros (McManus y Taylor, 2015).

No obstante, el ACV tiene limitaciones y dificultades en su implementación tanto a nivel teórico como práctico (Laratte et al., 2012). En el plano teórico, varios autores revelan una importante limitación del ACV en lo que respecta a la falta de consideración de los aspectos temporales y espaciales tanto para los datos como para los impactos (Levine et al., 2007; Zamagni et al., 2009, Levasseur, 2011). De hecho, los datos del inventario no proyectan realmente la posible evolución de los datos en el momento del estudio y los métodos de cálculo de los impactos tienen dos limitaciones importantes: i) consideran un factor de impacto fijo sin resolución temporal y ii) descuidan la cuestión de la distribución espacial de los impactos de sustancias emitidas (Laratte et al., 2012).

Las principales limitaciones prácticas están relacionadas con la disponibilidad de datos tanto en cantidad como en calidad y la explotación de los resultados, respectivamente, en particular en

los países en desarrollo, donde el difícil acceso a la información y la falta de bases de datos sólidas son los principales obstáculos para la ejecución de dichos proyectos y estudios que requieren una gran cantidad de información fiable. En la mayoría de los casos, los usuarios de ACV recurren a estudios de campo (encuestas, experimentos, etc.) que requieren recursos físicos y materiales, lo que hace que este tipo de estudios sean más costosos.

4.3.2.2. Cálculo de los Costes del Ciclo de Vida (CCV)

El cambio en el marco empresarial y la creciente importancia de las consideraciones que se desprenden del ámbito de la empresa tradicional han puesto de manifiesto la necesidad de controlar los costes no sólo durante la fase de producción, sino a lo largo de todo el ciclo del producto (Savić et al., 2019). El cálculo del coste del ciclo de vida (CCV) se introdujo como equivalente económico del ACV en la década de 1980 (Guinée et al., 2011) para evaluar las externalidades y los costes a lo largo del ciclo de vida de un producto, sistema y/o servicios en valores monetarios. Es una herramienta exhaustiva para la toma de decisiones que se utiliza para evaluar y comparar diferentes alternativas y permite i) detectar los "puntos calientes" e identificar los factores responsables de la generación de costes elevados; ii) proponer posibles escenarios hacia una gestión más eficiente y un ahorro de costes de un producto, servicio o sistema; iii) determinar la configuración más competitiva; y iv) tomar decisiones adecuadas (Gasia et al., 2021).

Existen diferentes definiciones de CCV, por ejemplo, la ISO (2008) define el CCV como "una técnica que permite realizar evaluaciones comparativas de costes a lo largo de un periodo de tiempo determinado, teniendo en cuenta todos los factores económicos relevantes en términos de costes iniciales y futuros de funcionamiento". Ravenmark (2008) define el CCV como "la suma de los costes iniciales, de instalación, de energía, de mantenimiento operativo, de tiempo de inactividad, ambientales y de desmantelamiento a lo largo de la vida útil del proyecto o producto". A diferencia del ACV, existen varias normas, directrices y metodologías para realizar el CCV en diferentes contextos (IEC, 2004, PKN, 2006; ISO, 2008).

El CCV convencional es el más empleado, ya que se aplica con éxito desde hace muchos años y, como tal, se centra en el análisis económico en diferentes etapas del ciclo de vida de los efectos del uso de los recursos y de los costes asociados a un producto soportados directamente por uno de los agentes implicados en la cadena de valor del producto: el fabricante, el distribuidor o el consumidor (Vladisavljević y Vukasović, 2017). En este método convencional,

se incluyen los costes incurridos en la fase de preproducción y producción, y los costes de funcionamiento del producto (consumo de materiales o energía relacionados, etc.), los costes de mantenimiento, los costes de retirada de los productos del uso, el desmontaje y la eliminación (SIGMA, 2016). Este enfoque se basa en un modelo de flujo de caja (ISO, 2008), y permite racionalizar el proceso de toma de decisiones a largo plazo cuando se dispone de diferentes alternativas de inversión (De Luca et al., 2018b).

El marco metodológico del CCV es el mismo que del ACV (definición del objetivo y el alcance, inventario del ciclo de vida, evaluación de impactos e interpretación). Según la definición del CCV, es el costo global ampliado (CGA) el que le corresponde, por incluir no sólo el costo global, sino también los ingresos, las externalidades y los costos diversos (MEEDDAT, 2009; Buset, 2014). De esta manera, el inventario económico corresponde a la monetización de las entradas y salidas (inputs-outputs) consideradas y se realiza multiplicando las cantidades usadas por el precio unitario de un año de referencia. El enfoque de costes globales utiliza varios indicadores/categorías de impactos económicos, como el coste descontado, el tiempo de retorno de la inversión, la tasa interna de retorno, el coste anualizado, entre otros. (MEEDDAT, 2009). En los análisis del coste de ciclo de vida, el valor actual neto, la tasa interna de retorno y los costes del ciclo de vida son ampliamente aceptados y usados por la comunidad científica (Hossaini et al., 2014; Yu y Halog, 2015; Kubba, 2017), ya que permiten detectar los puntos calientes económicos en las fases del ciclo de vida y proporcionar información útil para determinar las alternativas más sostenibles económicamente a largo plazo.

4.3.2.3. Análisis Social del Ciclo de Vida (ACV-Social)

Según Iofrida et al. (2016) y De Luca et al. (2018b), el ACV y CCV se originan en disciplinas pertenecientes a las denominadas "ciencias duras", por lo que predominan los paradigmas post-positivistas y es probablemente la razón principal que ha conducido al alcance de un consenso metodológico y estandarizaciones en las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 para el ACV y en la norma ISO 15686-5:2008 y la norma noruega NS 3454 para el CCV, pero solo para edificios y activos construidos. Por el contrario, el ACV-Social requiere más tiempo e investigación para ser estandarizado y todavía no existe un procedimiento metodológico común debido a la complejidad de identificar y evaluar los impactos sociales. El ACV-Social se refiere en gran medida a los impactos derivados de los comportamientos mientras que el ACV y CCV

se centran en los productos, procesos o servicios (Couture, 2013; Busset, 2014) y por lo tanto la integración de las tres metodologías parece ser una barrera a superar (UNEP-SETAC, 2009). Según UNEP-SETAC (2009), el Análisis Social del Ciclo de Vida (ACV-Social) se define como "una técnica para evaluar los impactos sociales y socioeconómicos positivos y negativos (reales y potenciales) a lo largo del ciclo de vida de los productos". Norris et al. (2014) define el ACV-Social como "una técnica para recoger, analizar y comunicar información sobre las condiciones e impactos sociales asociados a la producción y el consumo". Con la información proporcionada por el ACV-social, los responsables de la toma de decisiones pueden elegir las alternativas que resulten más favorables según sus consecuencias sociales (Huertas-Valdivia et al., 2020).

En la literatura científica, los trabajos del ACV-Social han estado basados en una gran parte en las líneas directrices proporcionados por UNEP-SETAC (UNEP-SETAC, 2009) que sirven de referencia y describen las etapas de aplicación derivadas de las de la norma ISO 14040. Este campo de estudio sigue siendo un tema emergente con un creciente interés en el desarrollo de marcos metodológicos y estudios de caso por parte de la comunidad científica. Sin embargo, la literatura sobre el ACV-social se considera todavía escasa, con sólo un número limitado de trabajos publicados.

El ACV-Social sigue las etapas propuestas para el ACV ambiental (ISO 14040) dada la falta de estandarización de este método (Arcese et al., 2013). Así, el ACV-Social se divide en cuatro fases: (1) Fijación del objetivo del estudio y los motivos por los que se realiza (por ejemplo, comparaciones de sistemas, productos, procesos, o potenciales de mejora de productos o procesos) y la definición de su alcance (objeto de estudio y límites del sistema) y establecimiento de la unidad funcional (UF) por la que se describe la función principal del sistema y a la que se refieren los resultados o impactos; (2) Elaboración del inventario social del CV (recopilación, cuantificación y organización de los datos permitiendo el cálculo de las categorías de impactos); (3) Evaluación de los impactos, que consiste en calcular las categorías de impactos consideradas y asignadas mediante los resultados del inventario; y (4) Interpretación, que permite obtener recomendaciones y conclusiones.

La elaboración del inventario Social-LCA es un proceso complejo dada la necesidad y la dificultad de recopilar y cuantificar los datos, especialmente los relacionados con algunos impactos, aspectos o indicadores sociales caracterizados por su naturaleza subjetiva (Onat et al., 2017). En este sentido, existe un creciente debate en la literatura científica, en el que se

encuentran diferentes opiniones sobre los métodos de recopilación de datos. Algunos autores consideran que la compilación de una base de datos tan precisa y detallada para el ACV-social no puede realizarse como en el caso del ACV ambiental (Dreyer et al., 2006; Jorgensen et al., 2010). Otros expertos critican el uso de datos genéricos proporcionados por las bases de datos estadísticas (ejemplos nacionales, datos promedios del sector, etc.) sobre algunos impactos sociales, por considerar que dan lugar a estimaciones demasiado aproximadas y por lo tanto abogan por la recopilación de los datos de campo específicos al caso del estudio (Weidema, 2006; Foolmaun y Ramjeeawon, 2013).

En la guía de la UNEP-SETAC (2009), existen más de 200 indicadores para caracterizar los impactos sociales y repartidos en 31 sub-categorías que pueden clasificarse en 2 grupos de categorías: categorías de impactos o categorías de partes interesadas. Estos dos grupos de categorías son complementarios. Las categorías de impacto están más centradas en los principios, mientras que las categorías de las partes interesadas se orientan a las cuestiones que hay que proteger. Así se definen 6 categorías de impactos: gobernanza e impactos socioeconómicos, condiciones de trabajo, derechos humanos, salud y seguridad, patrimonio cultural (UNEP-SETAC, 2009). La guía de la UNEP-SETAC (2009) define 5 categorías de partes interesadas: comunidades locales, trabajadores, proveedores y socios, consumidores y sociedad.

4.3.2.4. Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV)

El creciente interés por la sostenibilidad ha dirigido el foco del Ciclo de Vida hacia el Análisis de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV). Kloepffer (2008). Así, se define el ASCV como una combinación de ACV, CCV y ACV-Social centrándose en los tres pilares o triple resultado de la sostenibilidad. Guinée et al. (2011) define el ASCV como un marco de integración transdisciplinar de modelos para evaluar las cuestiones de la sostenibilidad. Estos autores consideran el ASCV como una ampliación del alcance del ACV (ambiental) a otras dimensiones de la sostenibilidad y discuten la complejidad y la necesidad de integrar los múltiples aspectos (ambientales, económicos y sociales) desde la perspectiva del ciclo de vida (CV). El ASCV proporciona el nivel más alto de análisis entre las herramientas ambientales y de sostenibilidad existentes (Finkbeiner et al., 2010) pues incorpora los aspectos ambientales, económicos y sociales, es decir, los tres pilares de la sostenibilidad, permitiendo una visión más

holística de la sostenibilidad de los productos y procesos, lo que se traduce en un mejor apoyo para los responsables de la toma de decisiones (UNEP/SETAC, 2011; Costa et al., 2019).

El ASCV se basa en el marco establecido por la norma ISO 14040, que incluye los cuatro pasos descritos anteriormente, pero aún no existe un procedimiento estandarizado específico para el ASCV. El principal reto relacionado con la implementación del ASCV reside en la forma de integrar diferentes aspectos, disciplinas y metodologías, es decir, el ACV, el CCV y el ACV-Social. En la literatura existen diferentes enfoques para aplicar el ASCV y muchos autores aplican herramientas del CV por separado y utilizan diferentes métodos para agregar e integrar los resultados finales del CV. Según De Luca et al. (2017) y Costa et al. (2019), el enfoque basado en la agregación de las tres metodologías, es decir, ACV, CCV y ACV-Social, es el más utilizado, y los métodos del análisis multicriterio (MCDA) son los más empleados en integrar y evaluar los resultados de las tres metodologías a través de la agregación ponderada de los indicadores y resultados.

Capítulo 5

Evaluación de la sostenibilidad del sector de la olivicultura y elaiotecnia

Durante las dos últimas décadas, el sector del olivo y del aceite de oliva ha sido objeto de estudio en cuanto a su sostenibilidad desde el Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA) y del Ciclo de Vida (CV), en distintas regiones, sobre todo en la cuenca Mediterránea. En este Capítulo se examinan los aspectos, tendencias y principales resultados de la evaluación de la sostenibilidad en el sector del olivar mediante un análisis de la bibliografía. El Capítulo se estructura en dos apartados: en el primero se analizan las principales evaluaciones de la sostenibilidad del sector del olivar mediante el Análisis de Decisión Multicriterio; y en el segundo se examinan los aspectos, tendencias y principales resultados de la evaluación del Ciclo de Vida en el sector del olivar en los trabajos precedentes.

5.1. Evaluación de la sostenibilidad del sector de la olivicultura y elaiotecnia mediante el Análisis de Decisión Multicriterio

Aunque existen numerosos estudios que han evaluado las externalidades del olivar (López-Pintor et al., 2018; Rodríguez Sousa et al., 2019), la utilidad del uso del Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA) para evaluar la multifuncionalidad del olivar como enfoque integrado y estimar su sostenibilidad ha sido investigada con menor detalle (Rodríguez Sousa et al., 2020), destacando los estudios de Parra-López et al. (2008b), Laajimi y Ben Nasr (2009), Elfkhi et al. (2012), Carmona-Torres et al. (2014); Egea y Pérez y Pérez (2016) y Rodríguez Sousa et al. (2020). La Tabla 7 presenta las características de los estudios publicados en relación con la evaluación de la sostenibilidad y/o multifuncionalidad de la producción olivarera (Tabla 7). En esta revisión bibliográfica se consideran los trabajos publicados en artículos científicos y los análisis realizados desde la perspectiva de la triple cuenta de resultados (TBL), que consideran los pilares ambiental, económico y social de la sostenibilidad.

Como resumen de este análisis se puede indicar que [A: Rodríguez Sousa et al., 2020] compararon dos tipos de manejo del olivar (integrado y ecológico) bajo el enfoque de multifuncionalidad de la agricultura, en Estepa (Andalucía, España), usando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), y demostraron que la agricultura ecológica presenta una mayor valoración en la satisfacción de las demandas sociales, con una mejor ponderación en todos los

indicadores evaluados, a excepción de los ingresos de la explotación y la riqueza de lepidópteros. [B: Egea y Pérez y Pérez., 2016] analizaron la sostenibilidad de algunas Denominaciones de Origen Protegidas (DOP) de aceite de oliva españolas mediante Proceso Analítico de Red (ANP), teniendo en cuenta diferentes sistemas de cultivo y obtuvieron que la agricultura ecológica es la que se comporta mejor, seguida de la integrada y la convencional. [C: Carmona-Torres et al., 2014] desarrollaron y aplicaron un modelo integrado de la multifuncionalidad a nivel de la explotación agrícola e indicaron que los agricultores están más centrados en producir productos de alta calidad, pero descuidan los impactos sociales y a gran medida los impactos ambientales de su actividad y que las prácticas más sensibles para los cambios son el manejo del suelo, el riego y la fertilización. [D: Elfkah S., et al., 2012] aplicaron un enfoque adaptado del método de evaluación multicriterio (Indicadores de Sostenibilidad de las Explotaciones Agrícolas (IDEA)) para evaluar la sostenibilidad de las prácticas agrícolas de dos grupos de sistemas de producción olivarera ecológica, e indicaron que en algunos casos no hay antagonismo entre la sostenibilidad medioambiental, socio-territorial y económica y, por lo tanto, proponen estrategias para mejorar simultáneamente estas tres dimensiones de la sostenibilidad. [E: Laajimi y Ben Nasr., 2009] evaluaron de una manera comparativa el nivel de sostenibilidad del modo de producción ecológico con el convencional en las explotaciones de producción olivarera en la región de Sfax (Túnez) sobre la base del cálculo de algunos indicadores de sostenibilidad inspirados en el método IDEA y mostraron una mayor clasificación de las explotaciones ecológicas en la escala superior de la sostenibilidad. [F: Parra-López., et al., 2008b] desarrollaron y usaron un marco extendido del método AHP y demostraron que es una poderosa metodología para evaluar de forma comparativa los rendimientos multifuncionales de diferentes sistemas agrícolas y demostraron la mayor sostenibilidad de la producción olivarera ecológica e integrada con respecto a los sistemas de producción convencional a medio/largo plazo en condiciones medias para la región de Andalucía (España).

Cabe destacar que dentro de los trabajos mencionados anteriormente solo [A], [B], [C] y [F] realizaron un análisis más completo a través de un análisis de sensibilidad de los resultados de la evaluación multicriterio y solo el trabajo realizado por [F] calculó el grado de acuerdo entre las opiniones de los expertos consultados para evaluar la robustez de los resultados obtenidos. Con respecto a los criterios e indicadores evaluados, los autores calcularon varios y diferentes criterios. En particular, los indicadores/criterios que evalúan la fertilidad del suelo, los ingresos

y la creación del empleo son los más estudiados y más comunes en las dimensiones ambiental, económica y social, respectivamente.

Como se ha mencionado anteriormente, estas investigaciones revelan que no existe un modelo común de evaluación de la sostenibilidad que pueda aplicarse a todos los casos y sistemas, pues depende de las características específicas de cada caso estudiado y cada región.

Tabla 7. Principales características de los análisis de decisión multicriterio aplicados en la evaluación de la sostenibilidad de la producción olivarera

Código	Título	Método MCDA	Alcance	Alternativas/Sistemas de producción	Dimensiones e indicadores/criterios
[A]	Rodríguez Sousa et al., 2020. A multifunctional assessment of integrated and ecological farming in olive agroecosystems in southwestern Spain using the Analytic Hierarchy Process	AHP	Producción olivarera	Integrado y ecológico	-Ambiental: Carbono oxidable en el suelo; Contenido de carbono de la hojarasca; Riqueza de lepidópteros (especies); Diversidad vegetal (bits) ;Cubierta vegetal; Cobertura de herbáceas; Cobertura de las plantas leñosas; Menos suelo desnudo; Riqueza de hierbas (especies); Riqueza de leguminosas (especies) -Económica: Ingresos -Social: Trabajo familiar; Trabajo permanente asalariada; Trabajo temporal asalariado
[B]	Egea y Pérez y Pérez., 2016. Sustainability and multifunctionality of protected designations of origin of olive oil in Spain	ANP	Producción olivarera	Integrado, ecológico, convencional y abandono	-Ambiental: Erosión; Contaminación; Biodiversidad -Económica: Ingresos; Calidad Comercialización; Seguridad -Sociocultural: Población; Gobernanza; Patrimonio
[C]	Carmona-Torres et al., 2014. Farm-level multifunctionality associated with farming techniques in olive growing: An integrated modelling approach.	ANP	Producción olivarera	Diferentes prácticas agrícolas	-Ambiental: Menos erosión del suelo; Capacidad de retención de agua del suelo; Fertilidad del suelo; Menos contaminación del agua; Menos consumo de agua; Biodiversidad -Económica: Menores costes de producción; Rendimiento de la aceituna; Calidad del producto -Social: Desarrollo rural y empleo; Identidad cultural y paisaje;
[D]	Elfkih S., et al., 2012. Are Tunisian organic olive growing farms sustainable? An adapted IDEA approach analysis.	IDEA	Producción olivarera	Ecológico	-Agroambiental: Diversidad; Organización del espacio; Prácticas agrícolas; -Económica: Viabilidad; Independencia; Transferibilidad; Eficiencia -Socio-territorial: Calidad de los productos y de la tierra; Empleo y servicios; Ética y desarrollo humano;
[E]	Laajimi y Ben Nasr., 2009. Appréciation et comparaison de la	IDEA	Producción olivarera	Ecológico y convencional	-Agroecológica: Diversidad de cultivos anuales y temporales; diversidad animal; gestión de la materia orgánica;

durabilité des exploitations agricoles biologiques et conventionnelle en Tunisie : Cas de l'oléiculture dans la région de Sfax.

fertilización nitrogenada; pesticidas; protección de los recursos del suelo; riego; -Económica: Viabilidad económica; Índice de especialización; Sensibilidad a las ayudas; Autonomía financiera; Probable sostenibilidad; Eficiencia del proceso productivo
-Socio-territorial: Contribución al empleo; Implicación social; Multifuncionalidad o pluriactividad; Enfoque de calidad; Trabajo colectivo

[F] Parra-López., et al., 2008b. A systemic comparative assessment of the multifunctional performance of alternative olive systems in Spain within an AHP-extended framework.

AHP

Producción olivarera

Ecológico, integrado y convencional

-Ambiental: Menos erosión del suelo; Fertilidad del suelo; Uso racional del agua de riego; Menos contaminación del agua; Menos contaminación atmosférica; Biodiversidad
-Económica: Ingresos; Estabilidad de los ingresos en el tiempo; Autonomía de las subvenciones institucionales; Independencia de los insumos agrícolas externos; Oportunidades de comercio y venta;
-Sociocultural: Empleo local directo; Empleo local indirecto; Justicia social en zonas rurales; Presencia de la agricultura en regiones desfavorecidas; Compatibilidad con los valores socioculturales locales; Uso recreativo
-Técnica: Productividad; Perspectivas de éxito de la cosecha; Calidad del aceite de oliva; Condiciones de salud laboral de los agricultores

Fuente: Elaboración propia

5.2. Evaluación de la sostenibilidad del sector de la olivicultura y elaiotecnia mediante el Ciclo de Vida (CV)

Esta revisión bibliográfica se centra en los estudios más relevantes relacionados con el concepto del CV aplicados al sector productor olivarero y la agroindustria del olivo. La búsqueda bibliográfica se ha llevado a cabo hasta el mes de agosto de 2020 en las siguientes bases de datos: ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com>), ISI Web of Knowledge (www.isiwebofknowledge.com) y Scopus (www.scopus.com). Se utilizaron los términos ("Life Cycle Assessment"+"Life Cycle Costing"+"Social-Life Cycle Assessment"+"Life Cycle Sustainability Assessment"+"olive"+"olive oil"), sin restricción de año de publicación o contexto geográfico. Así, se han identificado 33 publicaciones. La Tabla 8 presenta las características generales de estos estudios, desde las publicaciones más recientes hasta las más antiguas.

Además de esta búsqueda bibliográfica, se consultaron estudios anteriores de revisión sobre la aplicación del concepto del CV en el sector oleícola. Entre estos estudios, Salomone et al. (2010) publicaron en las actas de la conferencia de 2010 de la "Séptima Conferencia Internacional sobre el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en el Sector Agroalimentario" una revisión del ACV exclusiva a la producción italiana del aceite de oliva e identificaron un número importante de trabajos (21). Baniyas et al. (2017) revisaron sistémicamente el uso de herramientas ambientales en el ciclo de vida del aceite de oliva (fase de cultivo, fabricación, envasado, almacenamiento, transporte y logística inversa). Esta revisión incluyó 98 trabajos publicados hasta el final de 2015 y sólo 18 son estudios de ACV. Recientemente, Espadas-Aldana et al. (2019) han revisado los estudios del ACV en el sector del aceite de oliva hasta el mes de diciembre de 2018 y analizaron 23 estudios.

Los trabajos precedentes sobre el CV en el sector olivarero se han centrado en el área mediterránea, principalmente en Europa (Italia (20); España (4); Grecia (3); Chipre (2)), y sólo se identificaron tres países fuera de esta zona (Irán (1); Australia (1); Jordania (1)). Esto destaca la falta de estudios en el Sur del Mediterráneo y otros países, a pesar de la importancia económica, social y ambiental de este sector en países como Túnez, Marruecos, Siria, Turquía y Argelia.

Tabla 8. Principales características de los estudios de CV en el sector agroindustrial del olivo

Código	Título	País	Fuentes de datos	Dimensiones de la sostenibilidad, Alcance y límites del sistema	UF	Categorías de impacto/ Indicadores	Método y enfoque	Software
Ambiental								
[1]	Maffia et al., 2020. Environmental Impact Assessment of Organic vs. Integrated Olive-Oil Systems in Mediterranean Context	Italia	Encuesta Literatura SimaPro's LCI databases; IPCC Ecoinvent 3	"Cradle to grave" ; (desde la extracción de las materias primas hasta la venta del producto final (aceite de oliva), excluyendo la fase de plantación de los olivos)	1 hectárea y 1 litro de aceite	Ambiental : AD; ADFP; GWP; PO; ODP; HT; FWE; MAE; TE; AA; EU	ACV (CML)	SimaPro 8.02
Económica y social								
[2]	Iofrida et al., 2020. The socio-economic impacts of organic and conventional olive growing in Italy	Italia	Datos técnicos medios (datos de la literatura) + cuestionarios	"From cradle to farm gate" (la fase agrícola de la producción olivarera)	1 hectárea de superficie cultivada	Económico: NPV y IRR Social: "hours working conditions"	CCV; ACV-Social	-
[3]	Stillitano et al., 2019. A Life Cycle Perspective to Assess the Environmental and Economic Impacts of Innovative Technologies in Extra Virgin Olive Oil Extraction	Italia	Ensayos experimentales; encuesta; Ecoinvent 3.4; Agri-footprint 4.0 databases.	Ambiental y Económica "farm's gate to gate of olive oil milling plant"- fase industrial	1 litro de aceite (AOVE) y 1 mg de clorofila	Ambiental: CC; OD; HTnoc; HTC; PM; AC; POF; TEU; FEU; MEU; FT; WRD; MFDR Económico: DGM; NPV; DLCC	ACV (ILCD 2011 midpoint method); CCV	Simapro 8.5

[4]	Guarino et al., 2019. Life cycle assessment of olive oil: A case study in southern Italy	Italia	Encuesta; literatura; Ecoinvent 3	Ambiental "Cradle to gate" fase agronómica y fase industrial (incluso el embotellado)	0,75 L de aceite (AOVE)	Ambiental: CC; ODP; HTnoc; HTC; PM; IRHH; IRE; POF; AC; TEU; FEU; MEU; FT; LU; WRD; MFDR; PE	ACV (CED; ILCD Mid-point 2011)	-
[5]	Batuecas et al., 2019. Life Cycle Assessment of waste disposal from olive oil production: Anaerobic digestion and conventional disposal on soil	Italia	Literatura; fichas técnicas;	Ambiental 'Gate to grave' (desde el cultivo hasta la producción de aceite de oliva y las dos alternativas al final de la vida útil de los residuos producidos)	1 litro de aceite (AOVE)	Ambiental: AC; CC; TEU; WRD; CED	ACV (ILCD; CED)	SimaPro
[6]	De Luca et al., 2018a. Economic and Environmental Assessment of Extra Virgin Olive Oil Processing Innovations	Italia	Encuesta; estudio experimental; literatura; Ecoinvent V. 3.4; Agri-footprint V. 3 databases; Ecoinvent (2007)	Ambiental y económica "From cradle to the milling plant gate"	1 botella con 0,75 l de aceite (AOVE)	Ambiental: GW ; SOD; IR; OFHH; FPMF; OF; OFT; ECS; FEU; MEU; TE; FT; ME; HCT; HNCT; LU; MRS; FRS; WC) Económico: CLC	ACV (ReCiPe 2016);	SimaPro 8.4
[7]	De Luca et al., 2018b. Evaluation of sustainable innovations in olive growing systems: A Life Cycle Sustainability Assessment case study in southern Italy	Italia	Encuestas específicas de campo; Ecoinvent 3.2	Ambiental, económica y social "Cradle-to-gate" fase agraria	1 ha	Ambiental: CC; T; LU Económico: GM; DLCC; NPV Social: SH; JO; CNW	ACV (IPCC 100a - 2013; CML v3.03; ReCiPe midpoint); CCV; ACV-Social	SimaPro

[8]	Bernardi et al., 2018. Harvesting system sustainability in Mediterranean olive cultivation	Italia	Cuestionarios, mediciones in situ, Ecoinvent 3.3.	Ambiental y económica "Gate-to-gate" (fase agraria-aceitunas)	1 ha, 1 kg ; 1 hora	Ambiental: CC; OD; TA; FEU; MEU; HT; POXF; PMF; TE; FT; ME; IR;ALO; ULO; NLT; WD; MFFD Económico: Costes	ACV (ReCiPe *midpoint (H) *endpoint (H)); PCA	SimaPro 8.1
[9]	Parascanu et al., 2018a. Life cycle assessment of olive pomace valorisation through pyrolysis	España	Mediciones in situ; Ecoinvent.	Ambiental "Cradle-to-grave" (producción de aceitunas; extracción de aceite de oliva; Residuos de almazara)	100 kg de orujo de aceituna	Ambiental: CC, OD, TA, FEU, MEU, HT,POXF, PMF, TE, FE, ME, ALO, WD; FD ; HH, ED; RA	ACV (ReCiPe *midpoint (H) *endpoint (H))	SimaPro 8.2
[10]	Parascanu et al., 2018b. Environmental assessment of olive pomace valorisation through two different thermochemical processes for energy production	España	Mediciones in situ; Ecoinvent 3.4	Ambiental "Cradle-to-gate" (producción de aceitunas, extracción de aceite de oliva, proceso de combustión del orujo de oliva y proceso de gasificación del orujo de oliva.)	1MJ de producción de energía	Ambiental: CC, OD, TA, FEU, MEU, HT, POXF, PMF, FD, HH, ED, RA	ACV (ReCiPe *midpoint (H) *endpoint (H))	SimaPro 8.2
[11]	Navarro et al., 2018. Tackling the Relevance of Packaging in Life Cycle Assessment of Virgin Olive Oil and the Environmental Consequences of Regulation	España	Cuestionarios; comunicación personal; GaBi professional 2015; Ecoinvent 3.0	Ambiental Cradle-to-grave (producción de aceitunas, elaboración, envasado, distribución y fin de	Botella de 0,5 L de aceite de oliva (AOVE)	Ambiental: ADE, ADF, AP, EP, FE, GWP100, HT, MAET, TE)	ACV (CML, 2001 (actualizado en 2015))	GaBi

vida del aceite de
oliva virgen)

[12]	Romero-Gómez et al., 2017. Optimization of olive growing practices in Spain from a life cycle assessment perspective	España	Datos experimentales; literatura; Ecoinvent	Ambiental Cradle-to-gate (producción de aceitunas)	1 tonelada de aceitunas	Ambiental: CC; AC; FEU; FE; LU; WRD	ACV (ILCD, 2011 V1.05/EU27 2010)	SimaPro 8.0.4.30
[13]	Proietti et al., 2017. Extra Virgin Olive oil as carbon negative product: Experimental analysis and validation of results	Italia	Cuestionarios presenciales, entrevistas, fichas técnicas.	Ambiental Cradle-to-gate (desde el cultivo del olivo hasta los procesos de transformación y envasado)	1 litro de aceite (AOVE)	Ambiental: EU, AC, GWP100, POXF	ACV (EPD 2013, CML)	SimaPro 8
[14]	El Hanandeh y Gharaibeh, 2016. Environmental efficiency of olive oil production by small and micro-scale farmers in northern Jordan: Life cycle assessment	Jordania	Encuesta;	Ambiental "Cradle-to-gate" (cultivo de olivos; recolección y mantenimiento de huertos; producción de aceite de oliva y gestión de residuos)	1 kg de aceite de oliva	Ambiental: AC, PMF, HT, CC, ALO	ACV (ReCiPe Midpoint (H))	openLCA v1.4.1; Excel 2010; con Analysis ToolPak
[15]	Christoforou y Fokaides., 2016. Life cycle assessment (LCA) of olive husk torrefaction	Chipre	GaBi database	Ambiental "Gate-to-gate" El (impacto ambiental del sistema de torrefacción de cascarilla de olivo)	1 tonelada de cáscara de oliva torrefacta	Ambiental: GWP100, AP, EUP,ODP, AD	ACV (CML, 2001)	GaBi

[16]	Guiso et al., 2016. Environmental impact assessment of three packages for high-quality extra-virgin olive oil	Italia	Fichas técnicas, revisión bibliográfica, Ecoinvent 3.	Ambiental Cradle-to-grave (extracción y embotellado de aceite)	1 L de capacidad de embotellado	Ambiental: GWP, ODP, PO, AC, EU, NRF	ACV (IPCC, 2013)	SimaPro 8.0.2,
[17]	Proietti et al., 2016. Assessment of carbon balance in intensive and extensive tree cultivation systems for oak, olive, poplar and walnut plantation	Italia	Fichas técnicas, Ecoinvent.	Ambiental Gate-to-gate (Olives)	1 ha	Ambiental: GWP100	ACV (EPD,2013)	SimaPro 8.0.3.14
[18]	Pattara et al., 2016. Carbon Footprint of extra olive oil: a comparative and driver analysis of different production processes in Centre Italy	Italia	Encuesta	Ambiental Cradle-to-gate (cultivo de olivos y la producción de aceite de oliva)	5 L de aceite (AOVE)	Ambiental: GWP100	ACV (IPCC, 2007)	SimaPro 8.0.1
[19]	Accorsi et al., 2015. Glass vs. Plastic: Life Cycle Assessment of Extra-Virgin Olive Oil Bottles across Global Supply Chains	Italia	Entrevista; seguimiento en campo; Base de datos Ecoinvent; ARPA; Eurostat;	Ambiental (embotellado de aceite)- desde suministro de AOVE, su procesamiento y embotellado hasta la eliminación de residuos	Botella de 1 litro de aceite (AOVE) es decir, igual a 0.916 kg · por · L	Ambiental: GWP, ODP, AC, EU, PS, NREU	ACV (Environmental Design of Industrial Products (EDIP) 2003)	SimaPro v7.1.8
[20]	Tsarouhas et al., 2015. Life Cycle Assessment of olive oil production in Greece	Grecia	Contacto personal con productores, revisión de literatura.	Ambiental “Cradle-to-gate“ (producción de aceitunas, extracción de aceite de oliva, envasado y	1 L AOVE	Ambiental: GWP, AC, EU, POXF	ACV (Eco-indicator 99)	-

				paletizado de botellas.)				
				Ambiental				
[21]	Iraldo et al., 2015. An application of Life Cycle Assessment (LCA) as a green marketing tool for agricultural products: the case of extravirgin olive oil in Val di Cornia, Italy	Italia	Encuesta; Ecoinvent 2.0;	'cradle to gate' fase agrícola e industrial (la molienda de la aceituna)	1 kg de aceite (AOVE)	Ambiental: CC; OD; AA; EU; AD; PO; HT; FAE; MAE; TE	ACV (CML2000; CML 2001; CED)	-
				Ambiental				
[22]	El Hanandeh., 2015. Energy recovery alternatives for the sustainable management of olive oil industry waste in Australia: Life Cycle Assessment	Australia	Bases de datos: ELCD, NREL, AusLCI	Fabricación, transporte, tratamiento de los residuos de aceituna	1 Mg de residuos sólidos de aceituna	Ambiental: ODP; GWP100; EU; AP; HT; FFD; IR ; POXF	ACV (ReCiPe Midpoint (H))	OpenLCA
				Ambiental				
[23]	Taxidis et al., 2015. Comparing organic and conventional olive groves relative to energy use and greenhouse gas emissions associated with the cultivation of two varieties	Grecia	Encuesta; Ecoinvent 2.0;	'at the farm gate" fase agraria	1 kg de aceitunas	Ambiental: CC; EU	ACV (CML2000; CML 2001; CED)	-
				Ambiental				
[24]	Rinaldi et al., 2014. Assessment of carbon footprint and energy performance of the extra virgin olive oil chain in Umbria, Italy	Italia	Cuestionarios, mediciones in situ, Ecoinvent.	Cradle-to-grave (cultivo del olivo, extracción de AOVE, embotellado, envasado, almacenamiento a -18 °C y distribución)	1 L de aceite (AOVE)	Ambiental: CF, EF	ACV (IPCC, 2006)	SimaPro 7.3
				Ambiental				
[25]	Proietti et al., 2014. Carbon footprint of an olive tree grove	Italia	Mediciones in situ, Ecoinvent. -:	Cradle-to-gate (producción de aceitunas)	1 ha	Ambiental: GWP100, ODP; PO; AC; EU; NRF	ACV (Ecoindicad or 99; EPD, 2007)	SimaPro 7.1

[26]	Rajaeifar et al., 2014. Energy-economic life cycle assessment (LCA) and greenhouse gas emissions analysis of olive oil production in Iran	Irán	Cuestionarios cara a cara, hojas de cálculo de Excel.	Ambiental y económica Cradle-to-gate (producción de aceitunas, extracción de aceite de oliva y su transporte a los centros de clientes.)	1 ha	Ambiental: GHG ; EC Económico: Costes	ACV; EM	Microsoft Excel
[27]	Mohamad et al., 2014. Optimization of organic and conventional olive agricultural practices from a Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing perspectives	Italia	Cuestionarios; Revisión de la literatura; Ecoinvent.	Ambiental y económica Cradle-to-gate (Aceitunas)	1 ha	Ambiental: HH; EQ, RD Económico: NPV; IRR	ACV (Eco-indicador 99 (H)); CCV	SimaPro 7.1
[28]	Chatzisyneon et al., 2013. Life cycle assessment of advanced oxidation processes for olive mill wastewater treatment	Grecia	Ecoinvent 2.2.	Ambiental Gate-to-gate (tratamiento de residuos de almazara)	1 L Residuos de almazara	Ambiental: GWP	ACV (IPCC v1.02, 2007; ReCiPe v1.06, 2008)	SimaPro 7.3.3
[29]	Pergola et al., 2013. Alternative management for olive orchards grown in semi-arid environments: An energy, economic and environmental analysis	Italia	Seguimiento de ensayos experimentales; literatura; Ecoinvent databases;	Ambiental y económica “At the farm gate” fase agraria	1 ha y 1 kg de aceitunas	Ambiental: AD; GWP; ODP; EP; PO; AA; EU Económico: Rentabilidad	ACV; GP	SimaPro7.2
[30]	Salomone y Ioppolo., 2012. Environmental impacts of olive oil production: a Life Cycle Assessment case study in the province of Messina (Sicily)	Italia	Cuestionarios, entrevistas. Literatura internacional, bases de datos.	Ambiental Cradle-to-gate (Fase agrícola; Fase de producción de aceite; Tratamiento de residuos de molinos)	1 tonelada de aceitunas	Ambiental: LU ; RIN; FF; AC; EU; CC; HH ; FD ; ALO ; PMF; TE ; LO; NC; AEU ; HTS; TEU	ACV (CML; Eco-indicador 99; ReCiPe (E) ; ReCiPe E/E; Impact	SimaPro 7.2

							2002 /; EDIP 2003)		
[31]	De Gennaro et al., 2012. Innovative olive-growing models: an environmental and economic assessment	Italia	Literatura agronómica; Ecoinvent; Ecoinvent, 2010; Ecoinvent database 2.2	Ambiental y económica Producción de aceitunas	1 tonelada de aceitunas	Ambiental: AD ; AC; EU ; GWP100; ODP; HT; FWE; MAE; TE; PO Económico: NPV; IRR	ACV (IPCC, 2007; ECETOC, 1994 Brentrup et al., 2000; Hauschild, 2000 CML 2000); CCV		
				Ambiental					
[32]	Avraamides y Fatta., 2008. Resource consumption and emissions from olive oil production: a life cycle inventory case study in Cyprus	Chipre	Cuestionarios, entrevistas, mediciones in situ, bases de datos de inventarios.	Cradle-to-gate (procesos agrícolas, el procesamiento industrial y el transporte y gestión de residuos de almazara)	1 L AOVE	Ambiental: GHG ; RC	ACV		SimaPro 7
[33]	Notarnicola et al., 2004. Environmental and economic analysis of the organic and conventional extra-virgin olive oil	Italia	Encuesta; LCA database (Pre, 2003); literatura	Ambiental y económica Prácticas agrícolas, recolección, transporte y extracción de aceite	1 kg de aceite (AOVE)	Ambiental: EC, GWP, ODP, HT, FAE, MAE, TE, AC, NP, PO, CP; LU Económico: IC; EC	ACV (CML method); CCV		-

Acrónimos:

Ambiental: **AD:** abiotic depletion; **ADFF** abiotic depletion (fossil fuels); **GWP:** Global warming potential or climate change; **PO:** photochemical oxidation; **ODP:** ozone layer depletion; **HT:** human toxicity; **FWE:** fresh water aquatic ecotoxicity; **MAE:** marine aquatic ecotoxicity; **TE** terrestrial ecotoxicity; **AA:** air acidification; **EU:** eutrophication; **CC:** climate change; **HTnoc:** Human toxicity, non-cancer effects; **HTC:** Human toxicity, cancer effects; **PM:** Particulate matter;

POF: Photochemical ozone formation; **AC:** Acidification; **TEU:** Terrestrial eutrophication; **FEU:** Freshwater eutrophication; **MEU:** Marine eutrophication; **FT:** Freshwater ecotoxicity ; **WRD:** Water resource depletion; **MFDR:** Mineral, fossil, and ren resource depletion; **IRHH:** Ionizing radiation (HH); **IRE:** Ionizing radiation E (interim); **LU:** Land use; **PE:** Primary Energy; **CED:** Cumulative Energy Demand; **GW:** Global warming; **SOD:** Stratospheric ozone depletion; **IR:** Ionizing radiation; **FPMF:** Fine particulate matter formation; **OF:** Ozone formation; **OFT:** Terrestrial Ozone formation; **ECS:** ecosystems; **TA:** Terrestrial acidification; **ME:** Marine ecotoxicity; **HCT:** Human carcinogenic toxicity; **HNCT:** Human non-carcinogenic toxicity; **MRS:** Mineral resource scarcity; **FRS:** Fossil resource scarcity; **WC:** Water consumption; **T:** toxicity; **TTE:** Toxicity Toxic emissions; **OD:** Ozone depletion; **HT:** Human toxicity; **POXF:** Photochemical oxidant formation; **ALO:** Agricultural land occupation; **ULO:** Urban land occupation; **NLT:** Natural land transformation; **WD:** Water depletion; **MD:** Metal depletion; **FFD:** Fossil fuel depletion; **PMF:** Particulate matter formation; **HH:** Human health; **ED:** ecosystem diversity; **RA:** resource availability; **FD:** fossil depletion; **ADE:** abiotic depletion (elements); **ADF:** abiotic depletion (fossil); **AP:** Acidification Potential; **EUP:** Eutrophication Potential; **GWP:** Global warming potential; **NRF:** Non Renewable fossil; **NREU:** Non-renewable energy use; **PS:** photochemical smog; **CF:** carbon footprint; **EF:** energy footprint; **GHG:** greenhouse gas emissions; **EQ:** ecosystem quality; **RD:** resource depletion; **EP:** ecotoxicity potential; **LO:** Land occupation; **RIN:** Respiratory inorganics; **FF:** Fossil fuels; **NC:** Non carcinogens; **HTS:** Human toxicity soil; **HTA:** Human toxicity air; **NP:** Nitrification Potential; **CP:**Creation Potential.

- **Económico:** **NPV:** Net Present Value; **IRR:** Internal Rate of Return; **CLC:** Costs of Life Cycle; **DGM:** Discounted Gross Margin; **DLCC:** Discounted Life Cycle Costs; **IC:** Internal Costs; **EC:** External Costs; **GP:** Gross Profit; **EM:** Econometric Model; **PCA:** Production Costs Analysis; **GM:** Gross Margin.
- **Social:** **SH:** Social Health; **JO:** Job opportunities; **CNW:** Contribution to National Welfare.

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.1. Dimensiones de la sostenibilidad

En los trabajos de CV considerados en el sector del olivar y el aceite de oliva, la mayoría de los análisis incluyeron la dimensión ambiental (32 estudios) y unos pocos ampliaron la evaluación a la dimensión económica ([2]; [3]; [6]; [7]; [8]; [26]; [27]; [29]; [31]; [33]), y sólo [7] abordó las tres dimensiones de la sostenibilidad (Tabla 8). En particular, la dimensión social es la menos estudiada ([2]; [7]) (Tabla 8). Esto pone de manifiesto la falta de estudios que tengan en cuenta la evaluación holística de la sostenibilidad. El número más elevado de estudios que consideran la dimensión ambiental se debe principalmente a la existencia de un marco metodológico estandarizado (ACV), que facilita el proceso de evaluación en comparación con otros aspectos, especialmente los sociales.

5.2.2.2. Objetivo y alcance

5.2.2.2.1. Objetivo y límites funcionales

Los estudios del CV aplicados al sector de la olivicultura y elaiotecnia abordaron varios aspectos y en algunos casos se centraron en ciertas prácticas o innovaciones según el objetivo (Tabla 8). Algunos autores ([1]; [3]; [4]; [5]; [6]; [9]; [10]; [11]; [13]; [14]; [18]; [20]; [21]; [24]; [26]; [30]; [32]; [33]) consideraron en el ciclo de vida las dos fases de producción de aceite de oliva (fase agraria y extracción de aceite) (Tabla 8). Otros autores ([2]; [7]; [8]; [12]; [17]; [23]; [25]; [27]; [29]; [31]) estudiaron únicamente la fase agraria. En otros estudios, se consideraron solamente la gestión de residuos o subproductos ([15]; [22]; [28]), la extracción y/o el envasado del aceite ([3]; [16]; [19]) (Tabla 8).

Dado que el objetivo principal de esta tesis es la fase de producción olivarera, en los siguientes apartados sólo se consideran los trabajos que han estudiado la fase agrícola y, más concretamente, los que tienen en cuenta los impactos de las prácticas agrícolas, tales como manejo del suelo, pesticidas, fertilización, poda, riego y recolección.

5.2.2.2.2. Unidad funcional (UF)

La elección de la UF depende en gran medida de los objetivos de la evaluación, los destinatarios del estudio y la tipología de la investigación (De Luca et al., 2018b). En el sector del aceite de oliva, la mayoría de los estudios de CV expresan los impactos ambientales por unidad de producto (Kg de aceituna o litro de aceite de oliva) ya que el principal objetivo de los sistemas

agrícolas es la producción de alimentos (Audsley et al., 1997). En los estudios ([2]; [7]; [17]; [25]; [26]; [27]) la unidad funcional fue la superficie cultivada (ha) y solo en tres artículos ([1]; [8]; [29]) se eligieron las dos unidades funcionales (unidad por superficie cultivada y por producción). Según Cerutti et al. (2015), se recomienda el uso de la UF en función de la superficie, cuando se evalúan las prácticas de gestión agrícola. Sin embargo, se pueden elegir dos unidades funcionales para procesar los datos y resultados del inventario y mejorar la interpretación de los resultados ambientales (Seda et al., 2010). De hecho, la interpretación de los resultados basada en una sola unidad funcional puede ser insuficiente o criticada en algunos estudios. Según una revisión de los estudios comparativos de los sistemas agrarios convencionales y ecológicos realizada por Meier et al. (2015), los impactos ambientales por superficie cultivada suelen ser menores en los sistemas ecológicos y suelen ser mayores cuando se trata del impacto generado por unidad de masa producida. Por tanto, estos autores subrayaron la importancia de mostrar los impactos en ambas unidades funcionales.

5.2.2.3. Inventario del ciclo de vida (ICV)

En los estudios mencionados, la elaboración del ICV (entradas y salidas) se realizó a través de las fuentes disponibles (literatura, encuestas, experimentos, bases de datos internacionales, etc.). Con respecto a los datos primarios (insumos, energía, producción), la recopilación y la cuantificación se realizaron a través de la literatura, las encuestas de campo y a veces mediante ensayos experimentales cuando se trata de la evaluación de una nueva técnica o innovación. En los estudios previos ([1]; [2]; [3]; [4]; [6]; [7]; [8]; [11]; [13]; [14]; [18]; [19]; [20]; [21]; [23]; [24]; [26]; [27]; [30]; [32]; [33]), la mayoría de los datos primarios se recogieron a partir de encuestas de campo (cuestionarios, entrevistas) (Tabla 8). Según Abdou (2017), el procedimiento ideal para la recopilación de datos es la integración de estudios de campo (encuestas o experimentos) con datos procedentes de la literatura. La base de datos más utilizada para la extracción de datos secundarios (emisiones) para los impactos ambientales es la base de datos Ecoinvent, que es también el caso de la mayoría de las investigaciones científicas en el análisis ambiental del CV (ACV). Esta base de datos es considerada líder internacional en el campo de los datos de Ecobalance (Wernet et al., 2016).

5.2.2.4. Análisis del impacto del ciclo de vida (AICV) e interpretación

Al examinar los trabajos de ACV realizados hasta la fecha en el sector olivarero, los métodos más comunes utilizados para clasificar los resultados del ICV en categorías de impacto son los siguientes: CML; ILCD y Recipe (Tabla 8). Los autores evaluaron distintas categorías de impacto y las más comunes y repetidas son: Cambio climático o huella de carbono, acidificación, eutrofización y ecotoxicidad (Tabla 8). El software más empleado para calcular las categorías de impacto ambiental es 'Simapro' que es también el caso de la mayoría de los estudios del ACV existentes en la literatura científica (Ormazabal et al., 2014). Con respecto a la dimensión económica, las categorías de impacto más evaluadas son el Valor Actual Neto (NPV), los costes y la Tasa Interna de Retorno (IRR). En cuanto a la dimensión social, las cuestiones de impacto más comunes son las relacionadas con la creación del empleo y la salud (Tabla 8).

En la Tabla 9 se presenta los principales resultados de los estudios más relevantes relacionados con la fase de producción olivarera. Con respecto a toda la cadena de la producción del aceite de oliva (producción de aceitunas, producción de aceite de oliva, embalaje y gestión de residuos), la fase agraria (producción de aceitunas) es la más contribuyente en los impactos ambientales evaluados (Tabla 9). Por tanto, la fase agraria debe considerarse prioritaria en cualquier estudio o estrategia orientada hacia la evaluación, la mejora o la optimización de la producción de aceite de oliva.

En estudios comparativos de sistemas de producción olivarera, el sistema ecológico ha sido el sistema con un menor impacto ambiental (Notarnicola et al., 2004; Mohamad et al., 2014; Romero-Gómez et al., 2017; Parascanu et al., 2018b) salvo algunas excepciones (De Luca et al., 2018b; Maffia et al., 2020). Sin embargo, el sistema ecológico tiene en general una baja productividad en comparación con los sistemas convencionales e intensivos (Notarnicola et al., 2004; Romero-Gómez et al., 2017; Ben Abdallah et al., 2018). Este último factor puede afectar a la sostenibilidad ambiental del sistema ecológico, ya que los impactos generados por unidad de masa producida pueden superar en algunos casos a los del sistema convencional (Meier et al., 2015). Romero-Gómez et al. (2017) compararon los impactos de una amplia gama de sistemas de producción de aceitunas en España, incluyendo los sistemas de producción integrada y ecológica, y concluyeron que el sistema integrado fue el mejor desde el punto de vista ambiental y productivo. Sin embargo, aunque las dosis y las emisiones al aire y al agua de los fertilizantes de N fueron menores en los sistemas ecológicos e integrados en comparación con el manejo convencional y que se produjo una ganancia ambiental de los sistemas ecológicos

e integrados con respecto a los sistemas convencionales, el uso de fertilizantes debe ajustarse y reducirse aún más en ambos. Meier et al. (2015) destacaron la importancia de cuantificar los impactos ambientales de los productos agrícolas ecológicos y convencionales para ambas unidades funcionales (por superficie cultivada y por producción). De Gennaro et al. (2012) comparó dos modelos intensivos de producción de aceitunas (intensivo y súper-intensivo) y demostró que el sistema intensivo tuvo mejores resultados desde el punto de vista económico y ambiental. Proietti et al. (2014) analizaron la huella de carbono de un olivar en Italia aplicando el ACV y concluyeron que el mayor impacto lo causó el uso de fertilizantes y pesticidas (especialmente después del primer año). El Hanandeh y Gharaibeh (2016) evaluaron los impactos ambientales de las prácticas de micro agricultura de aceite de oliva en la región norte de Jordania. De Luca et al. (2018b) se centraron en las prácticas de eliminación de malas hierbas en tres escenarios desde una perspectiva de evaluación del ciclo de vida y propusieron que la mejor solución fue la reducción del uso de productos químicos y de la maquinaria operativa con respecto a los sistemas de agricultura convencional y ecológica, pero, aun así, se deberían realizar más mejoras teniendo en cuenta otras categorías de impacto. Bernardi et al. (2018) evaluaron varios escenarios de recolección de aceitunas, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales. Navarro et al. (2018) aplicaron la metodología ACV en diferentes estudios de caso en España centrándose en el papel del envasado del aceite de oliva virgen.

Tabla 9. Principales resultados de los trabajos previos de evaluación del CV en la producción olivarera

Código/Referencia	Sistemas de producción	'Hotspots' en el ciclo de vida	'Hotspots' en la fase agraria	Comparación de sistemas de producción
[1] Maffia et al., 2020	* Dos certificados como ecológicos (BIO1, BIO2), * Dos integrados (INT1, INT2) * Dos ecológicos - aficionados (HOBB1-BIO, HOBB2-BIO).	Embalaje; fase agrícola (producción de aceitunas)	Fertilización, manejo del suelo, recolección y transporte	Menor impacto ambiental: HOBB1-BIO, HOBB2-BIO; Mayor impacto ambiental: INT1, INT2
[2] Iofrida et al., 2020	Sistemas agrícolas ecológicos y convencionales	-	Recolección y poda (mayores costes); Pesticidas sintéticos (impacto social)	Un nivel similar de rentabilidad económica en ambos escenarios; Mayores costes de producción en el sistema ecológico; Mejor impacto social: sistema ecológico; mejor salud laboral
[4] Guarino et al., 2019	i. Convencional en zonas llanas - Evoline (PCE), ii. Convencional en zonas de colinas - Evoline (HCE), iii. Ecológico en zonas llanas - Evoline (POE), iv. Ecológico en zonas de colinas - Evoline (HOE).	Fase agrícola (producción de aceitunas)	Fertilización	-
[5] Batuecas et al., 2019	S1: Residuos de aceite de oliva como materia prima en la digestión anaeróbica S2: eliminación en el suelo sin tratamiento de los residuos del aceite de oliva	Fase agrícola (producción de aceitunas)	Electricidad producida; Electricidad (Irrigación); Fertilizantes; Agua (Irrigación);	Menor impacto ambiental: S1; Mayor impacto ambiental: S2
[7] De Luca et al., 2018b	- Un escenario de control (CS), representado por el sistema agrícola convencional y tradicional, - Un escenario de baja dosis / sin laboreo (LDNT), representado por un uso reducido de productos químicos - Un escenario de cero deshierbe químico (ZCW), que representa el sistema de agricultura ecológica.	-	Fertilización, recolección mecánica y control fitosanitario	Menor impacto ambiental: LDNT Mayor impacto ambiental: CS; Mejor impacto económico: LDNT; Social: mejor desempeño en la salud social: LDNT; mejores oportunidades de trabajo: CS y

ZCW; bienestar nacional: CS y ZCW;

Mejor sostenibilidad global: LDNT

[6] De Luca et al., 2018a	-	Fase agrícola (producción de aceitunas)	-	-
[8] Bernardi et al., 2018	Intensivo (I) Tradicional (T)	-	-	-
[9] Parascanu et al., 2018a	Ecológico (EC) Convencional (C)	-	Fertilización, transporte de aceitunas, energía eléctrica	Menor impacto ambiental: EC Mayor impacto ambiental: C
[10] Parascanu et al., 2018b	Combustión (CO) y gasificación del orujo de oliva (GO)	Extracción del aceite de oliva y producción de aceitunas	Fertilización	Menor impacto ambiental: CO Mayor impacto ambiental : GO
[11] Navarro et al., 2018	Intensivo	Fase agrícola (producción de aceitunas)	-	-
[12] Romero-Gómez et al., 2017	Ocho sistemas tradicionales (TS), tres sistemas intensivos (IS) y un sistema súper-intensivo (SS)	-	Fertilización	Menor impacto ambiental: ecológicos Mayor impacto ambiental: sistema integrado en regadío intensivo y el sistema integrado en regadío súper-intensivo
[14] El Hanandeh y Gharaibeh., 2016	Tradicional	Fase agrícola (producción de aceitunas)	Manejo de suelo	-

[17] Proietti et al., 2016	Olivar de secano	-	Manejo de suelo y Fertilización	-
[20] Tsarouhas et al., 2015	-	Extracción del aceite de oliva y producción de aceitunas	Fertilización	-
[21] Iraldo et al., 2015	Olivar de secano	Fase agrícola (producción de aceitunas)	Fertilización y pesticidas	-
[24] Rinaldi et al., 2014	Olivar tradicional	Distribución; Fase agrícola (producción de aceitunas)	Fertilización, recolección, uso de combustibles	-
[25] Proietti et al., 2014	Olivar de secano	-	Fertilización y pesticidas	-
[26] Rajaeifar et al., 2014	-	Fase agrícola (producción de aceitunas)	Fertilización (con nitrógeno)	-
[27] Mohamad et al., 2014	Sistema ecológico (ECS) y convencional (CS)	-	Fertilización	Menor impacto ambiental: ECS Mayor impacto ambiental: CS; Mejor resultados económicos: ECS
[29] Pergola et al., 2013	Sistema con uso de agua residual (RS) y sistema convencional (CS)	-	CS: Recolección, manejo de suelo, Fertilización, RS: tratamiento de agua residual y pesticidas	Menor impacto ambiental: CS Mayor impacto ambiental: RS; Mejor impacto económico: RS
[30] Salomone y Ioppolo., 2012	Sistema ecológico (ECS) y convencional (CS)	-	Fertilización y pesticidas	Menor impacto ambiental: ECS Mayor impacto ambiental: CS

[31] De Gennaro et al., 2012.	Intensivo (HDO) y súper-intensivo (SHDO)	-	Combustible y lubricante; Fertilizantes; Pesticidas	Menor impacto ambiental: HDO Mayor impacto ambiental: SHDO; Mejor impacto económico: HDO
[32] Avraamides y Fatta., 2008	-	Fase agrícola (producción de aceitunas) y Extracción del aceite de oliva	Fertilización y Manejo de suelo	-
[33] Notarnicola et al., 2004	Sistema ecológico (ECS) y convencional (CS)	-	Fertilización y pesticidas	Menor impacto ambiental: ECS Mayor impacto ambiental: CS; Mejor perfil de costes: CS

Fuente: Elaboración propia

Parte III: Métodos de análisis, resultados y discusión

Capítulo 6: Evaluación comparativa de la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional en Túnez, mediante la metodología AHP

Capítulo 7: Evaluación de la sostenibilidad ambiental de los sistemas de producción olivarera en Túnez mediante el Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

Capítulo 8: Análisis de la sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera en Túnez mediante un enfoque integrado de evaluación del ciclo de vida y de decisión multicriterio

Capítulo 6

Evaluación comparativa de la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional en Túnez, mediante la metodología AHP

El objetivo principal de este Capítulo es evaluar la sostenibilidad de los dos grandes tipos de sistemas de producción olivarera, es decir, el ecológico y el convencional, mediante el método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). El Capítulo se estructura de la siguiente manera: la siguiente sección presenta el material y los métodos, centrándose especialmente en el modelo AHP implementado; las secciones segunda y tercera incluyen, respectivamente, una presentación y una discusión de los principales resultados obtenidos.

6.1. Material y métodos

Como se ha indicado, este trabajo pretende evaluar la sostenibilidad y el estado actual de los sistemas de cultivo de olivo ecológico y convencional, mediante la priorización en diferentes criterios de sostenibilidad de estos sistemas de producción a través la consulta de una muestra de expertos utilizando la metodología AHP. De este modo, los resultados podrían proporcionar una base científica para respaldar el apoyo institucional a la promoción e implementación de un sistema de cultivo con mayor valor para la sociedad, tanto para las generaciones presentes como para las futuras.

Para cumplir este objetivo es necesario adoptar un enfoque bien definido para evaluar la sostenibilidad. Para ello es necesaria una correcta estructuración del problema: desde la definición del objetivo hasta el análisis de sensibilidad. Así, se ha desglosado el análisis de sostenibilidad en cuatro etapas: 1) Estructuración del problema de decisión e identificación del contexto específico de los criterios necesarios para evaluar la sostenibilidad del olivar; 2) Selección del método para generar la puntuación de los criterios y las alternativas en las diferentes dimensiones de la sostenibilidad; 3) Asignación y comparación de valores de importancia/prioridad de los criterios mediante la consulta de los responsables de la toma de decisiones (conocimiento de expertos); y 4) Análisis de sensibilidad para identificar las funciones agrícolas más sensibles, es decir, aquellas con mayor potencial para afectar a la sostenibilidad de la producción olivarera a nivel de explotación.

La selección de los criterios de sostenibilidad se ha basado principalmente en el conocimiento de expertos sobre explotaciones olivareras de la región de Sfax. Así, los expertos fueron consultados en dos fases de la investigación: la selección de los criterios y la evaluación de los dos sistemas. Basarse en el juicio de expertos como herramienta de evaluación se justifica por el alto conocimiento que tienen de las características específicas de la región (sectores socioeconómicos, agronómicos y condiciones edafoclimáticas, etc.), y su experiencia para resolver la complejidad de la cuantificación del impacto ambiental y socioeconómico de los dos sistemas a través del método AHP.

6.1.1. Método de investigación: Metodología AHP

El AHP (Saaty, 1980), como ya se ha indicado en los capítulos anteriores, es un método intuitivamente sencillo para la resolución práctica de problemas complejos de toma de decisiones que implica la priorización de posibles soluciones alternativas. Varios trabajos han destacado los casos de éxito del AHP en campos muy diferentes (Ishizaka y Labib, 2009). En el ámbito de la evaluación de la sostenibilidad, Cinelli et al. (2014) mostraron que MAUT (Multi Attribute Utility Theory) y el AHP (Analytic Hierarchy Process) son bastante sencillos de entender y cuentan con un buen soporte de software en comparación con otros métodos como el Método PROMETHEE (Preference ranking organization method for enrichment of evaluations), ELECTRE (Elimination and choice expressing the reality) y el Enfoque DRSA (Dominance-based rough set approach).

En las aplicaciones del AHP, el software más utilizado es el 'Expert Choice' (www.expertchoice.com). El AHP y su software "Expert Choice" permiten a los responsables de la toma de decisiones estructurar una decisión como un modelo jerárquico de varios niveles (modelo AHP), pasando del objetivo principal o meta, a los objetivos y a los sub-objetivos, hasta llegar a los elementos más básicos del problema (alternativas). A continuación, los responsables de la toma de decisiones realizan simples juicios de comparación por pares (pairwise comparisons) entre los elementos de cada nivel de la jerarquía (objetivos/criterios, sub-objetivos/sub-criterios) por su importancia con respecto a cada uno de los elementos de un nivel superior de los que dependen, hasta llegar a las alternativas. Con estas comparaciones se obtienen las ponderaciones o prioridades de importancia de los elementos de decisión y el desempeño de las alternativas. Este proceso termina con la síntesis para obtener una priorización global de las alternativas.

En nuestro estudio de caso, el panel de responsables de la toma de decisiones consistió en 20 expertos especializados en la producción olivarera y los diferentes sistemas de cultivo de olivo en la región de Sfax. Los expertos se dividieron en dos grupos según el conocimiento personal de cada sistema de producción de la siguiente manera: 10 expertos especializados en el sistema de producción olivarera convencional y 10 expertos especializados en el sistema ecológico. Hay que señalar que estos participantes tienen una amplia experiencia en ambos campos de estudio (ecológico y convencional), pero se dividieron según sus áreas de conocimiento más importantes. Enumerados por profesión, 8 fueron agricultores-ingenieros privados (olivicultores), 2 investigadores de centros de investigación, 7 profesionales-ingenieros del sector oleícola en tierras del Estado, y 3 agentes de la Administración pública del sector agrícola.

Al depender de los expertos, el juicio tiene límites, principalmente debido a la subjetividad, y puede surgir una divergencia de opiniones. Para hacer frente a este problema y evaluar su efecto en los resultados obtenidos, se calculó un "índice de acuerdo global relativo" (índice RGA – Relative Global Agreement). El índice RGA mide el gradiente de consenso entre las opiniones de dos grupos de actores involucrados en el proceso de toma de decisiones (Parra- López et al., 2007).

Las etapas seguidas para la evaluación de la sostenibilidad realizada mediante la metodología AHP, desde la construcción del modelo de decisión hasta la determinación de las prioridades de las alternativas, se detallan en los siguientes apartados.

6.1.1.1. Definición del modelo AHP

La identificación y selección de sub-criterios (o sub-objetivos) de evaluación en cada dimensión de la sostenibilidad (económica, socio-territorial y ambiental) se basó en: (i) una revisión en profundidad de la literatura científica relacionada con el desarrollo sostenible del sector oleícola en Túnez y, en particular, en la región de Sfax; y (ii) la selección de un panel de expertos en olivicultura convencional y ecológica para que actuara como grupo de decisión. El grupo de decisión elaboró el modelo jerárquico de decisión AHP a partir de la selección de los criterios e indicadores más relevantes. Estos criterios han de ser los más significativos: para revelar las fortalezas y/o debilidades socioeconómicas y ambientales de cada sistema y para establecer, si es necesario, un programa de extensión para la difusión de métodos innovadores de producción

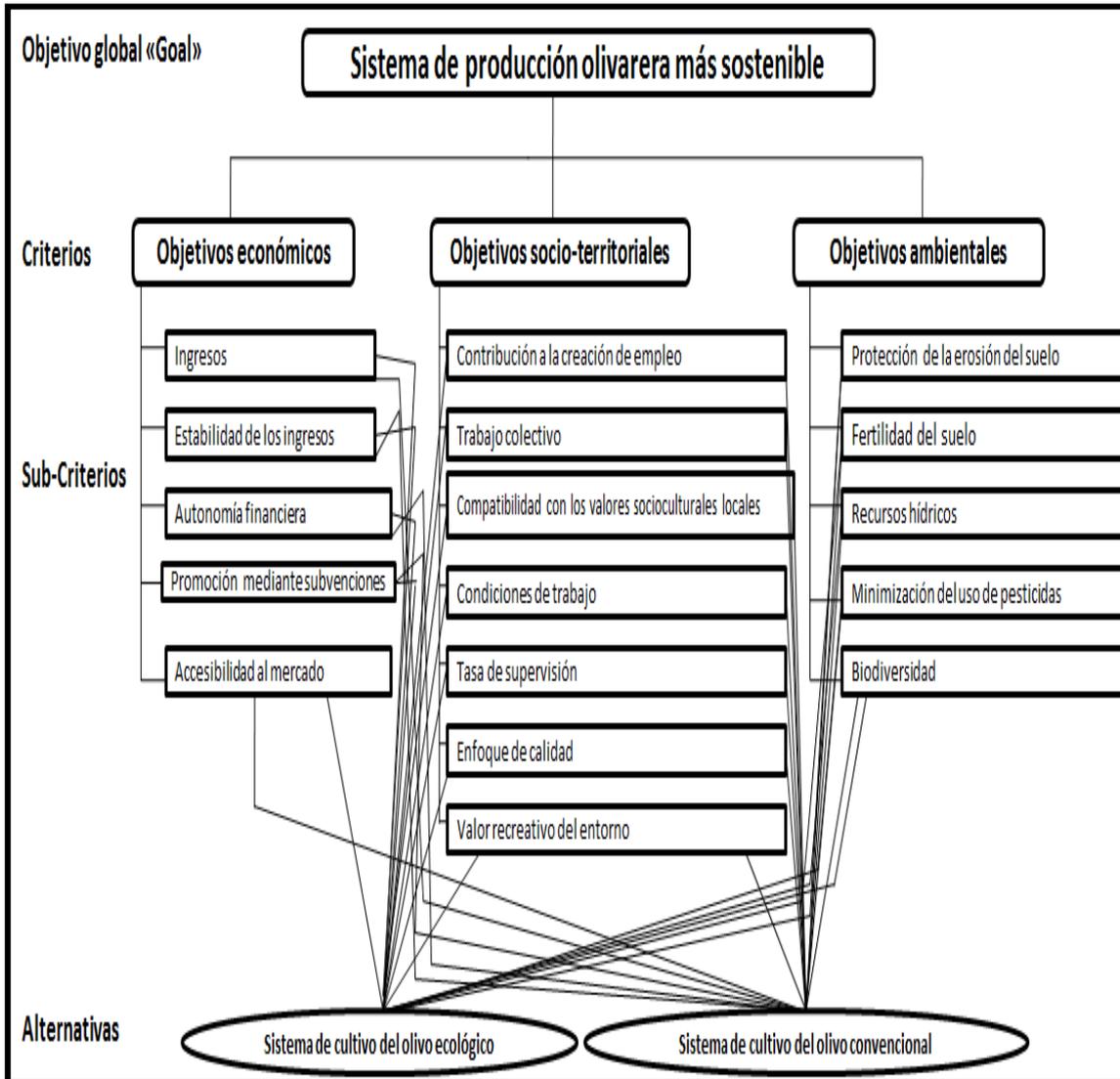
olivarera. La Figura 15 presenta el modelo AHP finalmente definido. A continuación, se presenta abreviadamente el significado de los diferentes elementos del modelo:

Objetivos económicos. *I.1. Ingresos:* Se refiere a los resultados financieros de la producción olivarera. *I.2. Estabilidad de los ingresos:* Se relaciona con la sostenibilidad del producto a medio-largo plazo. *I.3. Autonomía financiera:* Está relacionada con la independencia económica respecto a las deudas. *I.4. Promoción mediante subvenciones:* Este criterio refleja el índice de conocimiento del agricultor de las subvenciones existentes para la agricultura y el fomento estatal que se da a cada sistema de producción. *I.5. Accesibilidad al mercado:* Relaciona la accesibilidad al mercado y la valorización a través de canales cortos de comercialización.

Objetivos socio-territoriales. *II.1. Contribución a la creación de empleo:* Empleos directos e indirectos. *II.2. Trabajo colectivo:* Participación en el trabajo colectivo desarrollado en el territorio; esto supone solidaridad, mayor eficiencia, ahorro de escala y sinergias, etc. *II.3. Compatibilidad con los valores socioculturales locales:* Compatibilidad de las prácticas agrícolas con los valores tradicionales de los productores y conformidad de los productos generados con los hábitos culinarios de los consumidores. *II.4. Condiciones de trabajo:* Estado de salud laboral (higiene) y buenas condiciones de trabajo mediante: salario digno, seguridad social y participación en la formación. *II.5. Tasa de supervisión:* Refleja el interés del agricultor por mejorar la explotación a través del acceso a la información. *II.6. Enfoque de calidad:* Implantación de etiquetas de calidad para los alimentos reconocidos oficialmente. *II.7. Valor recreativo del entorno:* Pluriactividad asociada al sistema agrícola relacionada con actividades de ocio.

Objetivos ambientales. *III.1. Protección de la erosión del suelo:* Preservar el suelo limitando el efecto de la erosión hídrica o eólica y/o asegurando la presencia de una cubierta vegetal permanente. *III.2. Fertilidad del suelo:* Está relacionada con la gestión de la materia orgánica y la fertilización nitrogenada. *III.3. Recursos hídricos:* Buena gestión de este recurso por parte de los agricultores bajo el clima árido de la región. *III.4. Minimización del uso de pesticidas:* Reducción del uso de tratamientos químicos. *III.5. Biodiversidad:* La diversidad de plantas, animales y variedades genéticas de olivos puede contribuir a los ingresos económicos, minimizar los riesgos climáticos o sanitarios, aumentar la fertilidad del suelo y protegerlo de la erosión.

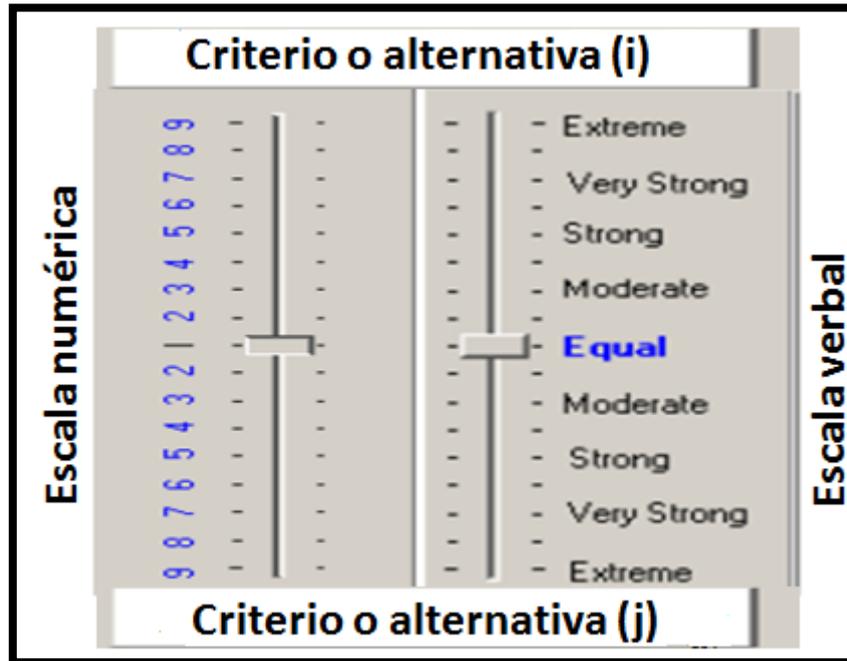
Figura 15. El modelo AHP para la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera



6.1.1.2. Comparación por pares y priorización

Una vez construido el modelo, el siguiente paso es evaluar sus elementos realizando una Comparación por Pares (CP). En cada nivel de la jerarquía, los expertos realizaron individualmente una CP entre dos elementos (i,j) con respecto a otro elemento del nivel superior del que dependen jerárquicamente. La CP se llevó a cabo a través de la escala de valoración propuesta por el AHP (Figura 16). Expert Choice permite tres modos de evaluación de la CP: verbal, gráfica y numérica. Los juicios numéricos se obtuvieron mediante la escala verbal/numérica de AHP (Figura 16), que representa cuántas veces es más importante un elemento con respecto a un otro (www.expertchoice.com).

Figura 16. La escala verbal y numérica fundamental de la comparación por pares en el AHP



6.1.1.3. Prioridades locales

Las prioridades locales o pesos (p_L) de los sub-elementos de cada nodo (un elemento de la jerarquía del que dependen otros sub-elementos) deben ser evaluadas y después normalizadas, es decir, deben cumplir:

$$\sum_{i=1}^n p_L(i) = 1 \quad (1)$$

Estas ponderaciones o prioridades pueden evaluarse a partir de la CP de estos sub-elementos ($p_{L(i)}/p_{L(j)}$) con respecto a la satisfacción del elemento del que dependen. A partir de estos ratios, es posible construir una matriz de comparación (\hat{A}) con los elementos: $a_{i,j}=p_{L(i)}/p_{L(j)}$:

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} 1 & p_L(1)/p_L(2) & p_L(1)/p_L(3) & \dots & p_L(1)/p_L(n) \\ & 1 & p_L(2)/p_L(3) & \dots & p_L(2)/p_L(n) \\ & & 1 & \dots & p_L(3)/p_L(n) \\ \text{inverse} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{elements} & & & & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Esta es una matriz recíproca positiva que tiene una serie de propiedades importantes (i) es cuadrada (orden $n \times n$); (ii) todos los elementos diagonales tienen el valor 1; (iii) sus elementos cumplen: $a_{i,j} = 1/a_{j,i}$, $\forall i,j$; siendo $a_{i,j}=p_{L(i)}/p_{L(j)}$ (Saaty, 1994; Forman y Selly, 2001). Para cada nodo, las prioridades locales de los sub-elementos que dependen del elemento del nivel superior pueden calcularse mediante la resolución del vector propio del sistema de ecuaciones:

$$\hat{A} * p_L = \lambda * p_L \quad (3)$$

Dónde p_L es el vector columna de las prioridades locales y λ es el valor propio máximo. Estas prioridades tienen una ratio natural (Saaty, 2001). La inconsistencia de la matriz de juicios puede calcularse mediante los indicadores $\lambda \geq n$ y la diferencia $\lambda - n$, donde n es el número de elementos comparativos. Una ratio de consistencia de 0,1 se considera el límite superior aceptable.

6.1.1.4. Síntesis de prioridades

Las alternativas pueden clasificarse según sus prioridades (o desempeño) con respecto al objetivo principal o meta (prioridades globales, p_G) o a cualquier elemento intermedio de la jerarquía de decisión (prioridades finales, p_F). Las prioridades finales de las alternativas (sistemas de producción olivarera convencional y ecológico) para un elemento determinado del modelo AHP (por ejemplo, los "objetivos económicos") pueden calcularse mediante una suma ponderada basada en las prioridades locales de los elementos que dependen de él, según:

$$p_{F(AK)} = \sum_{i=1}^I p_L \left(\frac{AK}{i} \right) * p_L(so(i)) \quad (4)$$

Donde $p_{F(AK)}$ es la prioridad final de la alternativa K (siendo en este caso A_k el sistema de agricultura convencional o ecológica); $p_{L(AK/i)}$ es la prioridad local de la alternativa K con respecto al sub-objetivo i dependiendo del criterio principal. $p_{L(so(i))}$ es la prioridad local del sub-objetivo i con respecto al criterio principal, e I es el número de sub-objetivos dependiendo del criterio (Saaty, 1994). Las prioridades globales (p_G) pueden calcularse de forma similar sobre la base de todas las prioridades locales de los sub-objetivos y las alternativas que dependen del objetivo principal.

6.1.2. Medición del acuerdo: Índice RGA

Como se ha mencionado anteriormente, el índice RGA mide el nivel de consenso entre las opiniones de los grupos de expertos. En este caso, se trata de dos grupos: uno especializado en el sistema ecológico y otro en el convencional. El índice de Acuerdo Global Relativo es una medida de la convergencia de las opiniones de los grupos individuales con respecto a la media de todos los grupos. El índice de Acuerdo Global Relativo en un nodo mide la importancia del consenso entre todos los grupos en la evaluación de ese nodo. El consenso es mayor cuando el índice RGA es el más alto. El índice RGA se define como:

$$RGA = \frac{1}{\frac{\sum_{g \in G} \left(\frac{\sum_{i=1}^n |pL(i),g - pL(i),m|}{n} \right)}{G}} \quad (5)$$

Donde G es el número de grupos de decisión, g es un grupo de decisión particular, pL(i),g es la prioridad local media del elemento i con respecto al nodo para el grupo g, pL(i), m es la prioridad local media del elemento i para los grupos G y n es el número de sub-nodos hijos o alternativas de nodo.

El índice RGA puede calcularse tanto para las prioridades locales de los elementos (nodos y alternativas) como para las prioridades finales y globales de las alternativas. El índice RGA para las prioridades finales de las alternativas se calcularía simplemente sustituyendo pL por pG o pF, respectivamente, en la ecuación (5). Una vez calculado el RGA para todos los nodos, los grados de acuerdo pueden segmentarse en bajo, medio y alto. Los límites del grado de acuerdo son los percentiles 1/3 y 2/3: el primer tercio engloba a los nodos con un grado de acuerdo bajo entre los grupos de expertos, el siguiente, los que tienen un grado de acuerdo medio y el último tercio, los que tienen un grado de acuerdo alto (Tabla 10).

Tabla 10. Segmentos de grados de acuerdo

Grado de acuerdo	RGA
Bajo	$RGA \leq \text{Percentil } 1/3$
Medio	$\text{Percentil } 1/3 < RGA \leq \text{Percentil } 2/3$
Alto	$\text{Percentil } 2/3 < RGA$

Es importante señalar que estos límites son exclusivos y diferentes para cada modelo AHP. Se utilizan para clasificar el nivel de acuerdo de cada nodo en términos relativos, es decir, en relación con el nivel de acuerdo de los restantes nodos del modelo evaluado en cada caso.

6.2. Resultados

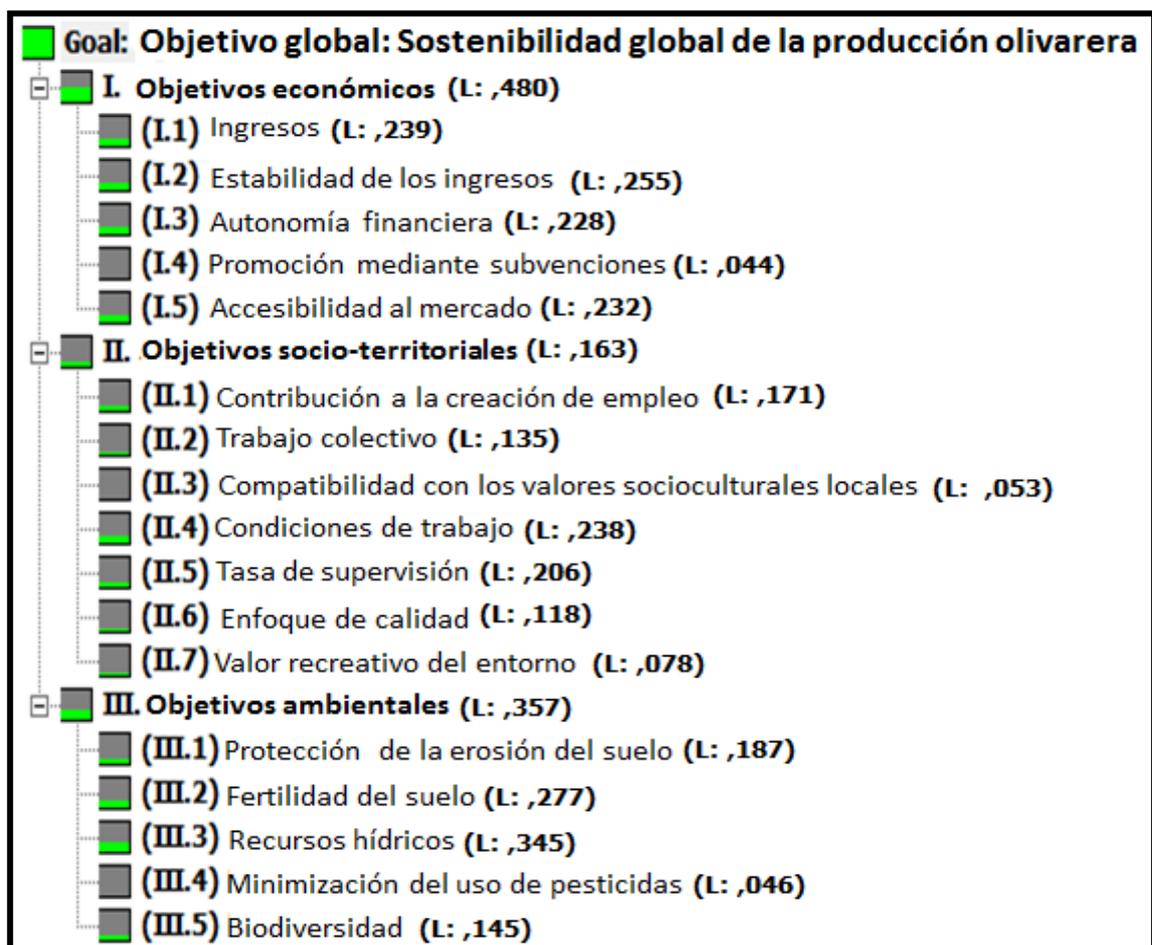
Los resultados mostrados en los siguientes apartados se refieren a las valoraciones medias de ambos grupos de expertos, no a las de cada grupo: prioridades relativas de los distintos criterios y sub-criterios en cada nivel del modelo ("Prioridades locales de los nodos"), así como los desempeños relativos de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional en cada

nodo ("Prioridades de las alternativas"). El índice de incoherencia también se refiere a las valoraciones medias. Éste es siempre inferior a 0,10 para estas valoraciones medias, así como para cada grupo y los expertos individuales.

6.2.1. Evaluación comparativa de los criterios y sub-criterios

Las prioridades locales de los tres criterios principales del modelo (económico, socio-territorial y ambiental) con respecto al objetivo global muestran una ligera diferencia siendo, en orden decreciente de importancia: criterios económicos, ambientales y socio-territoriales (0,480, 0,357 y 0,163) (Figura 17). Esto refleja la tendencia actual de los olivicultores de la región de Sfax. Están descuidando los objetivos ambientales y socio-territoriales de su actividad, en comparación con los objetivos económicos. Este mismo comportamiento de los olivicultores se observó en estudios anteriores en la región de Andalucía (España) (Parra-López et al., 2008b; Carmona-Torres et al., 2014).

Figura 17. Prioridades locales de los criterios y sub-criterios

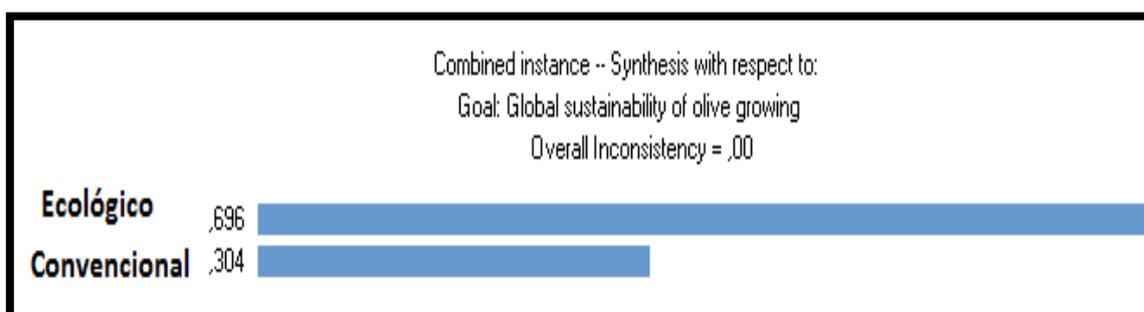


6.2.2. Evaluación comparativa de las alternativas

6.2.2.1. Sostenibilidad global

Según los resultados mostrados en la Figura 18, el sistema de ecológico es más sostenible globalmente de acuerdo con la opinión media de ambos grupos de expertos (prioridad global (pG) = 0,696). Este resultado concuerda con estudios anteriores que comparan estos dos sistemas de producción olivarera en la misma zona de estudio y desde un punto de vista multicriterio (Laajimi y Ben Nasr, 2009). Este resultado tiene importantes consecuencias políticas. Probablemente se trata de una aproximación al "valor económico total" real de estos sistemas de cultivo del olivo para la sociedad.

Figura 18. Desempeño de los sistemas olivareros en el objetivo principal



6.2.2.2. Sostenibilidad en las tres dimensiones

La Figura 19 muestra las prioridades de las alternativas con respecto a cada objetivo y sub-objetivo (sub-objetivos económicos, sub-objetivos socio-territoriales y sub-objetivos ambientales). La sostenibilidad del sistema ecológico es claramente superior al convencional en los tres objetivos principales del modelo (las tres dimensiones de la sostenibilidad) y, por tanto, a nivel global, como se ha mostrado en el apartado anterior. Cabe destacar que, de los tres criterios analizados, el criterio ambiental es en el que las dos alternativas presentan una mayor diferencia en su desempeño, es decir, es donde más destaca el olivar ecológico. Por el contrario, en el criterio económico se observan las menores diferencias entre ambas alternativas.

- Sostenibilidad en los sub-criterios económicos

En cuanto a los resultados de ambos sistemas de cultivo en los sub-criterios económicos ("Prioridades de las alternativas", Figura 19), el sistema ecológico presenta varias ventajas con

respecto al convencional, tales como: (i) una mayor estabilidad de los ingresos; (ii) una mayor independencia en el suministro de insumos y un pago regular de las deudas; y (iii) una mayor facilidad de venta en el mercado local, dada su buena reputación entre los consumidores tunecinos, y ello a pesar de su venta como producto convencional en este mercado (poca diferencia de precio) puesto las dificultades que se encuentran en el mercado internacional para comercializar toda la cantidad producida. Sin embargo, la opinión media de ambos grupos de expertos revela que la alternativa convencional tiene unos ingresos ligeramente superiores para los agricultores ($p=0,546$) que la ecológica (0,454). Este resultado parece aceptable teniendo en cuenta la situación actual del producto ecológico en Túnez. Así, según Lampkin y Padel (1994), los ingresos de la agricultura ecológica a corto/medio plazo son inferiores a los de la convencional. Esto está relacionado principalmente con: (i) unos mayores costes de producción del aceite de oliva ecológico; (ii) la fluctuación de los precios del producto ecológico, que a veces se vende al mismo precio que el aceite de oliva convencional; y (iii) las explotaciones con menor fertilidad o con una experiencia inadecuada en las prácticas ecológicas pueden tener rendimientos ecológicos sustancialmente inferiores a los convencionales (Delate et al., 2003).

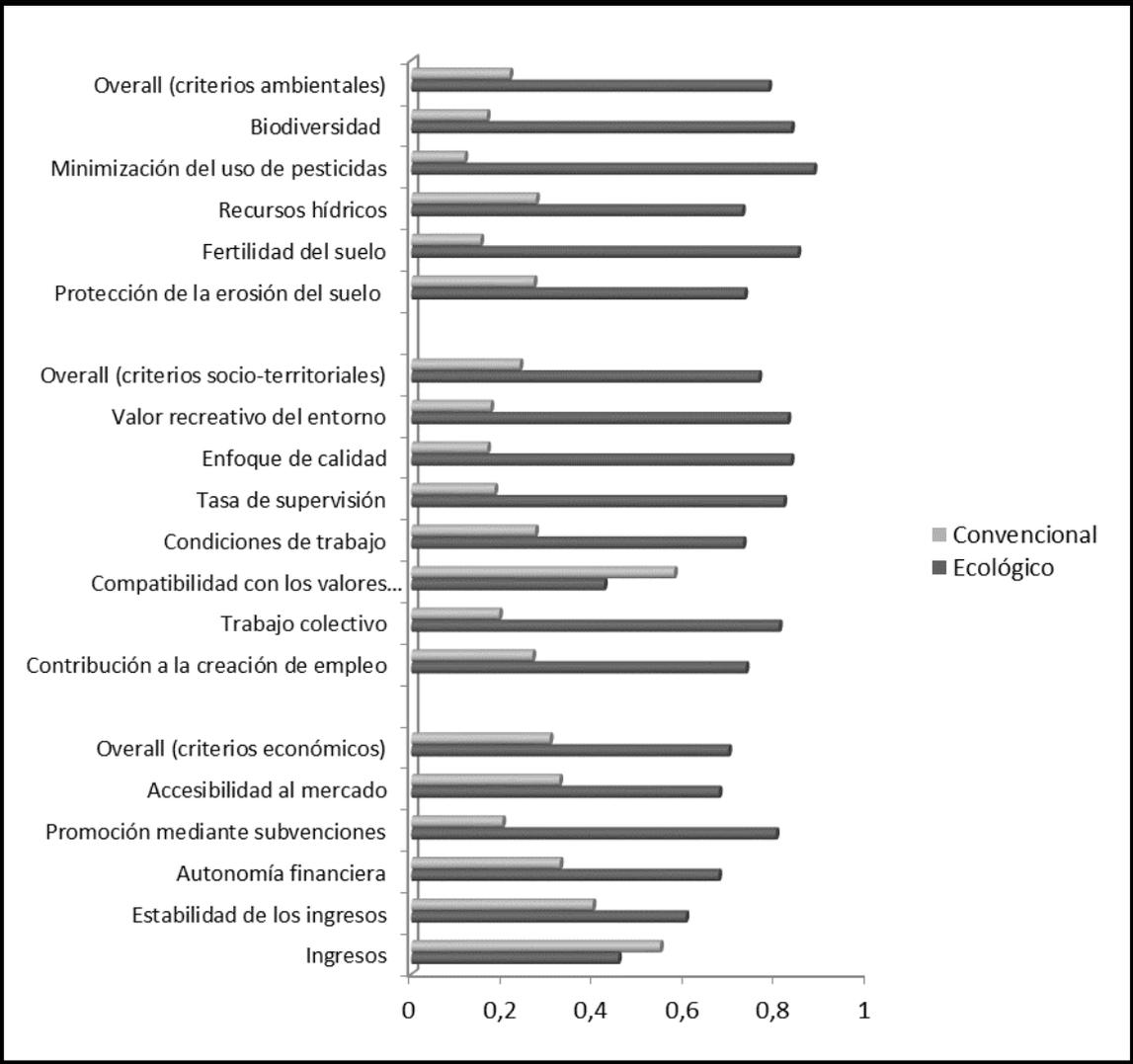
La mejora de la situación económica del sistema ecológico, siendo el modo de producción más sostenible, puede llevarse a cabo a través de varias medidas: i) El apoyo a los ingresos de los agricultores a través de subvenciones más adecuadas, ii) mejorar la integración vertical y horizontal en el sector mediante la organización de los productores a través de cooperativas.

- Sostenibilidad en los sub-criterios socio-territoriales

En cuanto a los criterios socio-territoriales (Figura 19), el sistema ecológico permite una mayor creación de empleo, una mejor calidad del producto y una posible valorización del medio ambiente, contribuyendo así al mantenimiento del espacio rural y de los paisajes. La diversidad biológica en el sistema ecológico permite una sinergia entre la agricultura y el territorio. Esto, contribuye a la creación no sólo de un valor económico tanto del espacio como del medio ambiente, sino también a la conservación de muchos sistemas agrícolas. En relación con el criterio "Compatibilidad con los valores socioculturales locales", la alternativa convencional tiene una prioridad sintética ligeramente superior a la alternativa ecológica debido a que: i) desde la perspectiva del productor, las prácticas ecológicas son más discordantes con las prácticas tradicionales; y ii) desde la perspectiva del consumidor, la falta de venta de productos ecológicos en el mercado local. Según los expertos, el producto ecológico sigue siendo un

producto orientado a una categoría específica de consumidores en el mercado local. Estos consumidores son los que tienen un poder adquisitivo relativamente alto.

Figura 19. Desempeño de los sistemas de cultivo de olivo en los objetivos y sub-objetivos



- Sostenibilidad en los sub-criterios ambientales

Según los expertos, la olivicultura ecológica es la mejor alternativa en la dimensión ambiental (Figura 19). Además, este sistema presenta las mayores diferencias de desempeño en comparación con la alternativa convencional en los diferentes sub-criterios ambientales. La superioridad ambiental global del sistema ecológico sobre el convencional está en consonancia con estudios anteriores (Stolze et al., 2000; Hansen et al., 2001; Pacini et al., 2003, 2004; Parra-López et al. 2007; Laajimi y Ben Nasr 2009; Tuomisto et al., 2012). Al preservar la fertilidad

del suelo, el sistema ecológico contribuye a frenar la degradación de la materia orgánica de los suelos. Asimismo, el modo ecológico, utilizando abono verde, permite a los agricultores de enriquecer el suelo con materia orgánica y mejorar su capacidad de retención de agua. La experiencia de terreno de la mayoría de los expertos (6 son agricultores ecológicos) demostró que el olivo se adapta bien al modo ecológico en las condiciones edafoclimáticas de la región de Sfax. Por otra parte, la diversidad de las plantaciones intercaladas de frutales refuerza la autonomía financiera y la estabilidad de los ingresos en el sistema ecológico.

6.2.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad permite analizar la validez de los resultados obtenidos al hacer variar las prioridades de los diferentes elementos del modelo (Figura 20 y Figura 21). Expert Choice (software del método AHP) proporciona cuatro modos de análisis de sensibilidad gráfica: dinámica, gradiente, desempeño y análisis bidimensional. La priorización de las alternativas puede variar al aumentar o disminuir la importancia de los criterios o sub-criterios (prioridades locales o ponderaciones). Por ello, las prioridades locales de los criterios y sub-criterios principales se pueden modificar por separado, simulando ponderaciones entre el 0% y 100% para un criterio o sub-criterio (se observa que las prioridades de los demás criterios o sub-criterios cambian en consecuencia, reflejando el carácter relativo y normalizado de las ponderaciones, es decir, las ponderaciones totales tienen que sumar siempre 1).

La Figura 20 muestra los resultados antes de realizar cualquier cambio en las ponderaciones locales de los criterios y sub-criterios (objetivos y sub-objetivos). Los gráficos (A, B, C, D) muestran sucesivamente: gráfico (A) - sensibilidad de los desempeños de los sistemas de producción olivarera en los tres objetivos principales y en el Objetivo Global; gráfico (B) sensibilidad de los desempeños de los sistemas de producción olivarera en los sub-criterios económicos; gráfico (C) sensibilidad de los desempeños de los sistemas de producción olivarera en los sub-criterios socio-territoriales y (D) sensibilidad de los desempeños de los sistemas de producción olivarera en los sub-criterios ambientales.

Un cambio de ordenación de las alternativas sólo es posible para las dimensiones económica y socio-territorial (Gráfico B y C). Por lo tanto, se obtuvieron otros dos gráficos después del cambio (Figura 21) B' y C'. En el caso de aumentar: i) la prioridad local del sub-criterio "ingresos" de 0,239 a 0,774 (Figura 21: B, B'), ii) la prioridad local del sub-criterio "compatibilidad con los valores socioculturales locales" de 0,053 a 0,786 (Figura 21: C, C'), el

sistema convencional será más sostenible comparando con el sistema ecológico, en los criterios económicos globales y en los criterios socio-territoriales globales. Por último, otros cambios en las prioridades locales de los criterios principales no pueden alterar el resultado de la sostenibilidad global (Objetivo principal o global) (Figura 20, gráfico A).

Figura 20. Gráficos de sensibilidad al desempeño

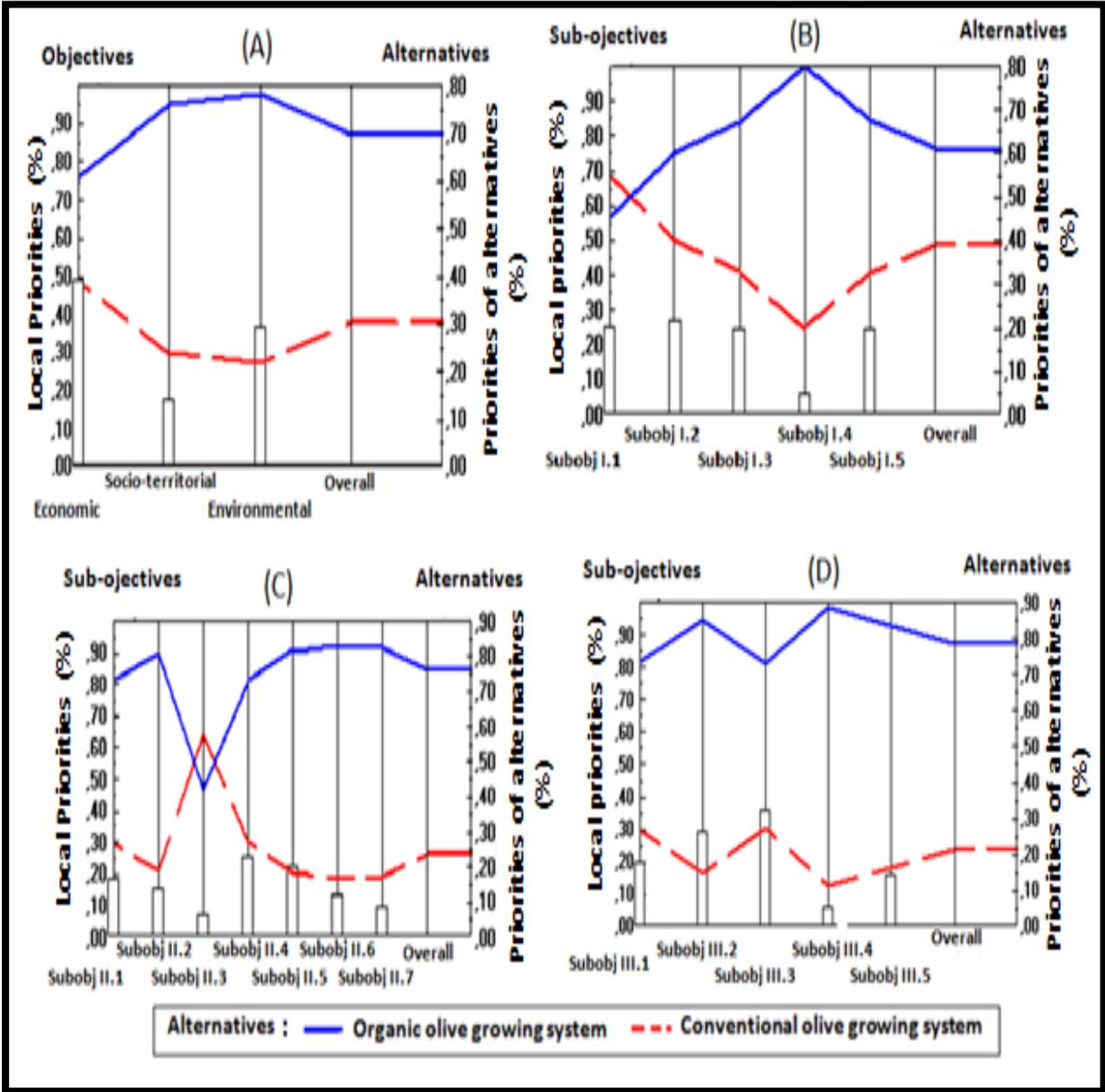
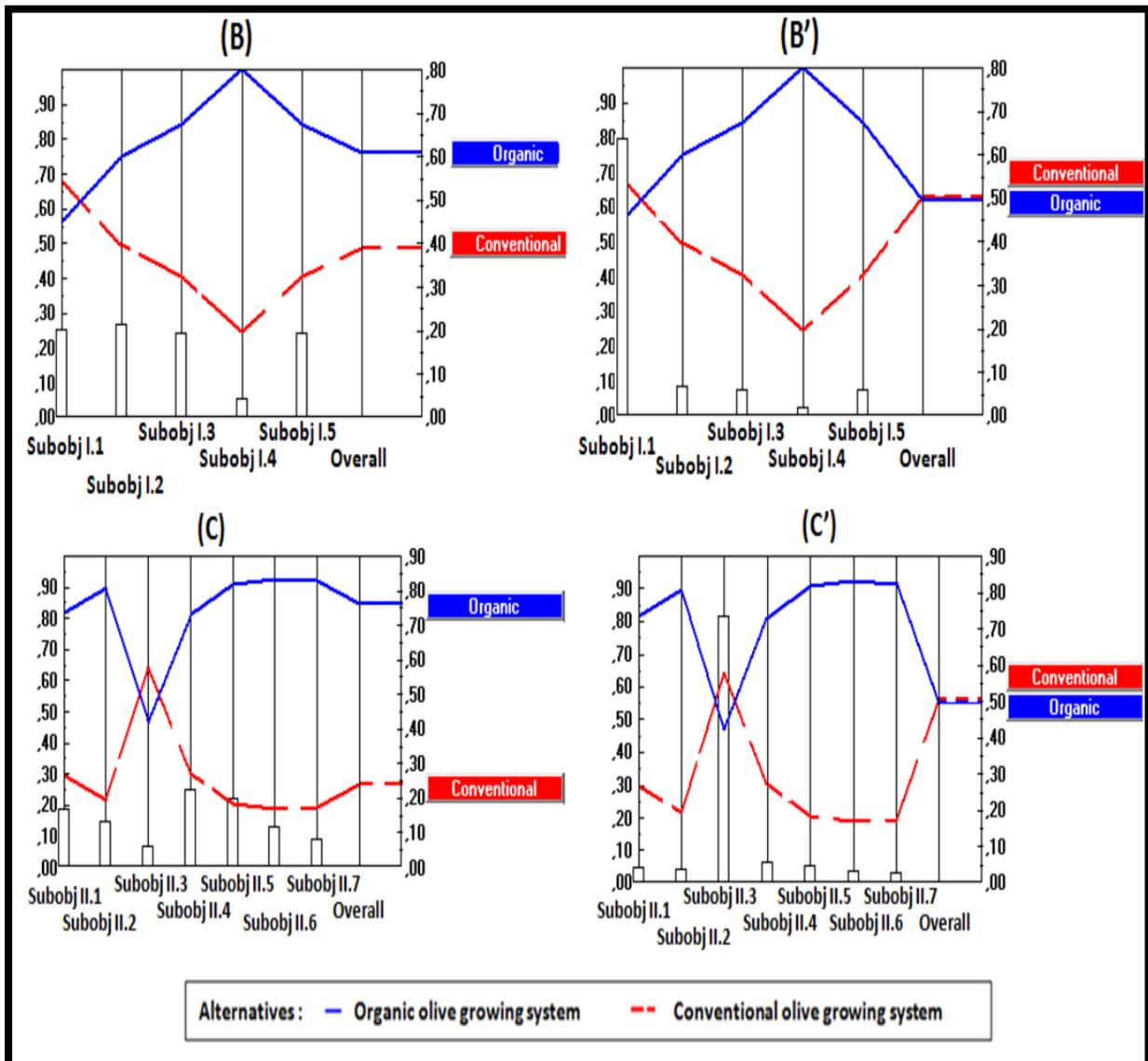


Figura 21. Gráficos de sensibilidad del desempeño en los sub-objetivos económicos y socio-territoriales



Nota: Gráfico (B) - Subobj I.1: Ingresos; Subobj I.2: Estabilidad de los ingresos; Subobj I.3: Autonomía financiera; Subobj I.4: Promoción mediante subvenciones; Subobj I.5: Accesibilidad al mercado. Gráfico (C) - Subobj II.1: Contribución a la creación de empleo; Subobj II.2: Trabajo colectivo; Subobj II.3: Compatibilidad con los valores socioculturales locales; Subobj II.4: Condiciones de trabajo; Subobj II.5: Tasa de supervisión; Subobj II.6: Enfoque de calidad; Subobj II.7: Valor recreativo del entorno. Gráfico (D) - Subobj III.1: Protección de la erosión del suelo; Subobj I.2: Fertilidad del suelo; Subobj I.3: Recursos hídricos; Subobj I.4: Minimización del uso de pesticidas;

6.2.4. Nivel de acuerdo

La Tabla 11 muestra el nivel de convergencia de las opiniones entre los grupos de expertos, que se indica mediante los índices/grados de acuerdo en todos los nodos del modelo (elemento y sub-elementos que dependen de él), tanto para las “prioridades locales de los criterios y sub-criterios” con respecto al elemento del que dependen como para las “prioridades de las alternativas” con respecto al elemento del que dependen.

El índice RGA respecto al desempeño de las alternativas en el "objetivo global" es medio (c.3-4, RGA = 10,32). Sin embargo, existe un bajo acuerdo entre los expertos respecto a las prioridades locales de los criterios económicos, ambientales y socio-territoriales (Tabla 11: c.6-7: índice RGA=4,30, Grado de acuerdo=bajo). Este bajo acuerdo podría explicarse por las diferencias en las tendencias ideológicas de los expertos.

En cuanto al acuerdo de los expertos en las prioridades de las alternativas con respecto a los criterios principales, el aspecto ambiental es el aspecto en el que hay más acuerdo, siendo este medio (Tabla 11: RGA=28,22). El impacto ambiental positivo de las prácticas agrícolas ecológicas es sujeto de acuerdo entre varios investigadores. Sin embargo, sigue existiendo una necesidad de realizar estudios longitudinales a nivel de sistema para abordar estas cuestiones y llenar las lagunas de nuestro conocimiento sobre los impactos de la agricultura ecológica (Hole et al., 2005).

En la dimensión económica es donde hay más diferencias entre las opiniones de los grupos de expertos (Tabla 11: c.3: RGA=7,11, Grado de acuerdo=bajo). La controversia sobre la rentabilidad económica de la agricultura ecológica es evidente. Rigby y Cáceres (2001) y Sutherland (2011) han identificado la escasa recompensa económica como la principal razón aducida por los agricultores para quitar a la producción ecológica. En realidad, esta visión se limita únicamente al corto plazo, ya que el impacto ambiental positivo que se ha indicado anteriormente del olivar ecológico aumentará también la viabilidad económica de la agricultura a medio y a largo plazo. Por ello, la extensión de sistemas sostenibles globalmente debe ser necesaria para replantear el coste de las acciones ambientales.

Tabla 11. Acuerdo en los nodos del modelo AHP

Nodos del modelo AHP	Acuerdo entre expertos*				
	Prioridades locales de los nodos		Prioridades de las alternativas		
Nivel 1 (Goal)	Índice RGA	Grado de Acuerdo	Índice RGA	Grado de Acuerdo	
Nivel 2 (Criterios)					
Nivel 3 (Sub-criterios)	(Número de columna)	1	2	3	4
Desempeño global	4,3	•	10,32	••	
I. Objetivos económicos	5,04	•	7,11	•	
I.1. Ingresos	n/a	n/a	5,08	•	
I.2. Estabilidad de los ingresos	n/a	n/a	4,89	•	
I.3. Autonomía financiera	n/a	n/a	12,04	••	
I.4. Promoción mediante subvenciones	n/a	n/a	22,07	••	
I.5. Accesibilidad al mercado	n/a	n/a	7,37	•	
II. Objetivos socio-territoriales	5,45	•	20,15	••	
II.1. Contribución a la creación de empleo	n/a	n/a	26,03	••	
II.2. Trabajo colectivo	n/a	n/a	207,67	•••	
II.3. Compatibilidad con los valores socioculturales locales	n/a	n/a	16,55	••	
II.4. Condiciones de trabajo	n/a	n/a	264,02	•••	
II.5. Tasa de supervisión	n/a	n/a	42,72	•••	
II.6. Enfoque de calidad	n/a	n/a	61,83	•••	
II.7. Valor recreativo del entorno	n/a	n/a	14,74	••	
III. Objetivos ambientales	9,62	•	28,22	••	
III.1. Protección de la erosión del suelo	n/a	n/a	39,33	•••	
III.2. Fertilidad del suelo	n/a	n/a	257,79	•••	
III.3. Recursos hídricos	n/a	n/a	37,89	•••	
III.4. Minimización del uso de pesticidas	n/a	n/a	31,79	•••	
III.5. Biodiversidad	n/a	n/a	15,82	••	

Nota: Grado de acuerdo: •••=Alto; ••= Medio; •=Bajo. n/a=no aplicable porque no hay sub-nodos que dependan de este nodo. Límites para la segmentación de los Índices RGA: PRGA1/3 = 10,32; PRGA2/3= 28,22.

6.3. Discusión

Desde el punto de vista de la sostenibilidad global, el sistema de producción olivarera ecológico ha demostrado su superioridad. Este resultado está en concordancia con el estudio de Laajimi y Ben Nasr (2009) donde se compararon estos dos sistemas olivareros en la misma zona de estudio y desde un punto de vista multicriterio basado en el método IDEA (Indicadores de

Sostenibilidad de las Explotaciones Agrícolas). Esta priorización también está de acuerdo con investigaciones anteriores que compararon estos sistemas de producción, pero en otras regiones (Stockdale et al., 2001; Pacini et al., 2003, 2004; Rasul y Thapa, 2004 y Parra-López et al., 2008b).

El presente trabajo ha demostrado que los ingresos del sistema ecológico son ligeramente inferiores a los del convencional. Este resultado está en concordancia con los estudios de Berentsen et al. (1998) y Lampkin y Padel (1994). Por el contrario, Sánchez Jiménez (1999) y Parra-López et al. (2008b) obtuvieron una mayor renta para la producción olivarera ecológica respecto a la convencional. Estos resultados contradictorios pueden explicarse al menos por dos razones: i) el contexto temporal de cada estudio, es decir, si se trata del medio-largo plazo o del corto-medio plazo; y ii) las características de la zona de estudio como los condicionantes socioeconómicos y el contexto geopolítico. El aspecto económico, incluida la rentabilidad de la agricultura ecológica, está muy criticado en la literatura (Schaller, 1993). Así, en Túnez, uno de los aspectos a mejorar para la difusión de sistemas agrarios más sostenibles son las políticas de apoyo a estos sistemas. Así, la viabilidad de la agricultura puede lograrse fomentando desde las instituciones públicas, prácticas agrarias más sostenibles y mediante una modulación de las políticas en cuestión. La mejora de los ingresos de los olivicultores ecológicos parece ser una prioridad por la importancia que tiene este sistema para la preservación del medio ambiente. Estos ingresos pueden mejorarse con ayudas directas a la renta o mediante planes de marketing más sofisticados que permiten la exploración de nuevos mercados internacionales. En este contexto, el Comercio Justo como estrategia de marketing de diferenciación asociada a la agricultura ecológica puede ser una buena herramienta; por un lado, para mejorar los ingresos de los productores y, por otro lado, puede contribuir a una mayor organización de los agricultores a través de cooperativas. Ciertamente, este tipo de estrategias de marketing puede contribuir a mejor controlar la cadena de valor y a un mayor aprovechamiento en termino de valor añadido del aceite de oliva (Elfkhi et al., 2013). Por otro lado, los mecanismos de gestión del conocimiento y de intercambio de información pueden promover la toma de decisiones a nivel local (Mabudafhasi, 2002). Los expertos encuestados coincidieron en que el sistema ecológico puede proporcionar rendimientos interesantes a corto y medio plazo siempre que esté bien gestionado. Por lo tanto, la formación de los agricultores es esencial para la difusión de prácticas más sostenibles y la mejora de la productividad de las explotaciones agrícolas. A largo plazo, existe un consenso general entre los científicos sobre que una gestión controlada de la agricultura puede generar sistemas más productivos teniendo en cuenta la degradación del suelo

y el sobreuso del agua de los sistemas convencionales. Todas estas premisas representan una motivación adicional para que los responsables de la toma de decisiones apoyen más a la agricultura ecológica.

Desde la perspectiva de los consumidores, los expertos encuestados están de acuerdo con la literatura que sugiere que los consumidores a menudo no están bien informados sobre los beneficios de los productos ecológicos, especialmente en los mercados locales (Vermeir y Verbeke, 2006; Vecchio, 2013; Pomarici et al., 2016). En este contexto, sería deseable aumentar la demanda de productos ecológicos en el mercado local mediante la concienciación de los consumidores sobre la importancia de los alimentos ecológicos, estableciendo una política de precios teniendo en cuenta el bajo poder adquisitivo de una gran parte de consumidores y potenciando a las empresas y a los productores ecológicos a reforzar su política de comunicación sobre su compromiso ambiental dirigida a los consumidores a través de programas e instrumentos de marketing adecuados. De hecho, desde una perspectiva estratégica, el apoyo a la agricultura ecológica puede ser más eficiente económicamente para el Estado si tenemos en cuenta los altos gastos públicos en salud. Así, muchos estudios confirman una correlación positiva entre la contaminación y el gasto en sanidad (p.ej. Yazdi y Khanalizadeh, 2017), que demuestran que las emisiones de CO₂ tienen efectos positivos estadísticamente significativos en el gasto en sanidad. En efecto, sin una renta suficiente para los agricultores, la agricultura no podrá alcanzar los niveles sostenibles deseables. Por esta razón, subvencionar la agricultura sostenible no es solo un derecho de los agricultores, sino también de la sociedad y de las generaciones futuras. Además, los propios precios pueden reflejar el valor real de los productos. Fri (1991) sostiene que los mercados necesitan las señales de precios adecuadas para funcionar correctamente, por lo que las externalidades deben internalizarse en los mercados privados (Yunlong y Smit, 1994), en este caso externalidades principalmente relacionadas con el medio ambiente.

En relación con la metodología utilizada para la evaluación de la sostenibilidad, AHP ha mostrado una serie de puntos fuertes y facilidades que los convierte en una herramienta potencialmente útil en este contexto. Los principales puntos fuertes del AHP constatados en este estudio son: (i) Su alto poder en permitir de cuantificar información cualitativa, subjetiva e intangible, que puede cuantificarse en un problema de decisión complejo con alta incertidumbre y gran riesgo; (ii) La posibilidad de la consecución de una evaluación global integrada de la sostenibilidad; (iii) Su posibilidad de permitir una fácil implementación y procesamiento de los datos a través de un soporte informático específico (Expert choice); (iv)

La facilidad en la identificación del nivel de acuerdo entre los diferentes agentes implicados en la toma de decisiones, permitiendo una mayor transparencia en la especificación de las preferencias de los diferentes actores; y (v) Su capacidad en proporcionar soluciones prácticas basadas en una elección justificada. Por otro lado, las debilidades más evidentes del AHP mencionadas en la literatura están relacionadas con la independencia y relevancia de los objetivos, la representatividad de los juicios y la naturaleza abierta/cerrada del modelo. Estas debilidades atribuidas al AHP pueden mitigarse si el problema se estructura adecuadamente, como es el caso en este trabajo. Además, el ANP (Analytic Network Process), que es la metodología de extensión del AHP, puede utilizarse también en el caso de existencia de muchos criterios dependientes (Ishizaka y Nemery, 2013). De hecho, el AHP es una herramienta eficaz para la evaluación de la sostenibilidad, pero es exigente desde el punto de vista cognitivo para los responsables de la toma de decisiones, y solo puede abarcar una perspectiva de sostenibilidad débil, ya que se basa en las compensaciones entre los elementos de decisión.

Capítulo 7

Evaluación de la sostenibilidad ambiental de los sistemas de producción olivarera en Túnez mediante el Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología recomendada para evaluar los impactos ambientales de los sistemas de producción agraria (Audsley et al., 1997). Con el fin de proporcionar una base científica a los agricultores y a los responsables de la toma de decisiones, este capítulo presenta un análisis mediante el ACV de la sostenibilidad ambiental de la producción olivarera en Túnez. El análisis comparativo abarca todos los sistemas de producción olivarera de este país (tradicional, intensivo y súper-intensivo). El Capítulo está articulado en tres apartados: en el primero (Material y métodos), se detalla la metodología del ACV aplicada a los sistemas de producción olivarera en Túnez a través de: i) la definición del objetivo y alcance del estudio; ii) la descripción del inventario del CV en las diferentes fases del cultivo para cada sistema olivarero (datos del campo de las prácticas agrícolas y las emisiones y los datos para el cálculo de las categorías de impacto); y iii) la descripción del modelo seguido para la evaluación de los impactos; en el segundo apartado (Resultados), se presentan los resultados relativos a 1) la contribución de cada práctica agrícola en las categorías de impacto ambiental en la fase de plena producción para cada sistema olivarero; y 2) los impactos ambientales de los sistemas de producción olivarera para dos unidades funcionales (UF), es decir, 1 tonelada de aceituna producida y 1 hectárea de superficie olivarera cultivada; el tercer apartado (Discusión de los resultados) presenta una discusión general de los resultados obtenidos en comparación con los estudios anteriores aplicados al cultivo del olivar y como mejorar los impactos ambientales.

7.1. Material y métodos

7.1.1. Definición del objetivo y del alcance

El alcance del estudio se ha limitado a la producción de aceituna, considerando todos los flujos de entrada y salida de materiales y energía hasta que la aceituna es recogida y transportada a la almazara, y los árboles retirados al final de su producción. Los resultados de este estudio se refirieron a dos unidades funcionales: unidad de masa de producto comercial (1 tonelada de aceitunas) y unidad de superficie de olivar (1 hectárea de superficie cultivada). Se han

considerado nueve sistemas representativos de la producción actual de aceitunas en Túnez (Tabla 12): seis sistemas tradicionales, dos sistemas intensivos y un sistema súper-intensivo. Dentro de estos sistemas, se diferenció el tipo de producción (convencional o ecológica), manejo del riego (riego o seco) y manejo de la fertilización (con o sin fertilización). El ciclo de vida del olivo de cada sistema se dividió en seis fases de cultivo en función de la producción de aceitunas (plantación, joven, crecimiento, aumento de la producción 1, aumento de la producción 2 y plena producción) (De Gennaro et al., 2012; IO, 2017a; Larbi et al., 2017; Guarino et al., 2019).

Tabla 12. Sistemas representativos de la producción actual de aceitunas en Túnez

Sistemas de producción en Túnez			Principales características de los sistemas de producción				
<i>Tradicional/Intensivo/ Súper-intensivo</i>	<i>Convencional/ Ecológico</i>	<i>Área total (%)</i>	<i>Riego / Secano</i>	<i>Fertilización/Sin fertilización/Fertirriego</i>	<i>Acrónimo</i>	<i>Densidad (árboles ha-1)</i>	<i>Variedad principal</i>
TRADICIONAL	CONVENCIONAL	81,8	RIEGO	FERTILIZACION	TCIF	17-34	Chemlali
			SECANO	FERTILIZACION	TCRF	17-34	
				SIN FERTILIZACION	TCR	17-34	
	ECOLOGICO	13,6	RIEGO	FERTILIZACION	TOIF	17-34	Chemlali
			SECANO	FERTILIZACION	TORF	17-34	
				SIN FERTILIZACION	TOR	17-34	
INTENSIVO	CONVENCIONAL	4,6	RIEGO	FERTIRRIEGO	ICIF1	204-278	Chemlali
				FERTIRRIEGO	ICIF2	416-555	Arbosana
SUPER-INTENSIVO	CONVENCIONAL		RIEGO	FERTIRRIEGO	SICIF	1250-1666	Arbequina

Se ha evaluado el impacto ambiental de los sistemas de manejo del olivar en Túnez durante su ciclo de vida: 48 años para la unidad funcional de 1 t de aceitunas y 50 años para la unidad funcional de 1 ha de superficie de olivar. Los resultados por t incluyen únicamente las fases de producción (desde la fase de crecimiento hasta la fase de plena producción) y los resultados por ha incluyen todas las fases (desde la fase de plantación hasta la fase de plena producción). El límite del sistema es la producción agrícola "desde la cuna hasta la puerta de la finca".

Se han considerado las siguientes cargas ambientales para el cultivo del olivar en términos de flujos de energía y materiales: i) Maquinaria agrícola, lubricante y combustible consumidos en la instalación del sistema de fertirriego, en el manejo del suelo, en las operaciones de poda y recolección, en la aplicación de fertilizantes y pesticidas y en la retirada de los árboles tras la

recolección final; ii) Energía y agua consumida por el sistema de riego; iii) Producción de fertilizantes y pesticidas, emisiones al aire de compuestos contaminantes procedentes de la aplicación de fertilizantes y pesticidas; iv) Transporte de plantas para el trasplante, fabricación y transporte de materiales auxiliares para la recolección y transporte de aceitunas desde el campo hasta la almazara.

7.1.2. Inventario del ciclo de vida (ICV)

El ICV incluye la recopilación de datos de entrada y salida de las prácticas agrícolas de campo y los procedimientos de cálculo durante el ciclo de vida de cada fase de cultivo de los nueve sistemas estudiados. Los datos fueron representativos de las situaciones más extendidas y actuales de Túnez y se recogieron de diferentes fuentes (Tabla 13).

Las Figuras 22 y 23 muestran el diagrama de flujo de las diferentes prácticas agrarias y fases de cultivo de cada uno de los nueve sistemas de producción de aceitunas, para facilitar el análisis del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación de los resultados. Las principales características de cada fase de cultivo de los sistemas de producción olivarera evaluados se muestran en la Tabla 14, que incluye la duración de cada fase de cultivo.

Figura 22. Diagrama de flujo general de la producción agrícola de aceitunas en los nueve sistemas de cultivo

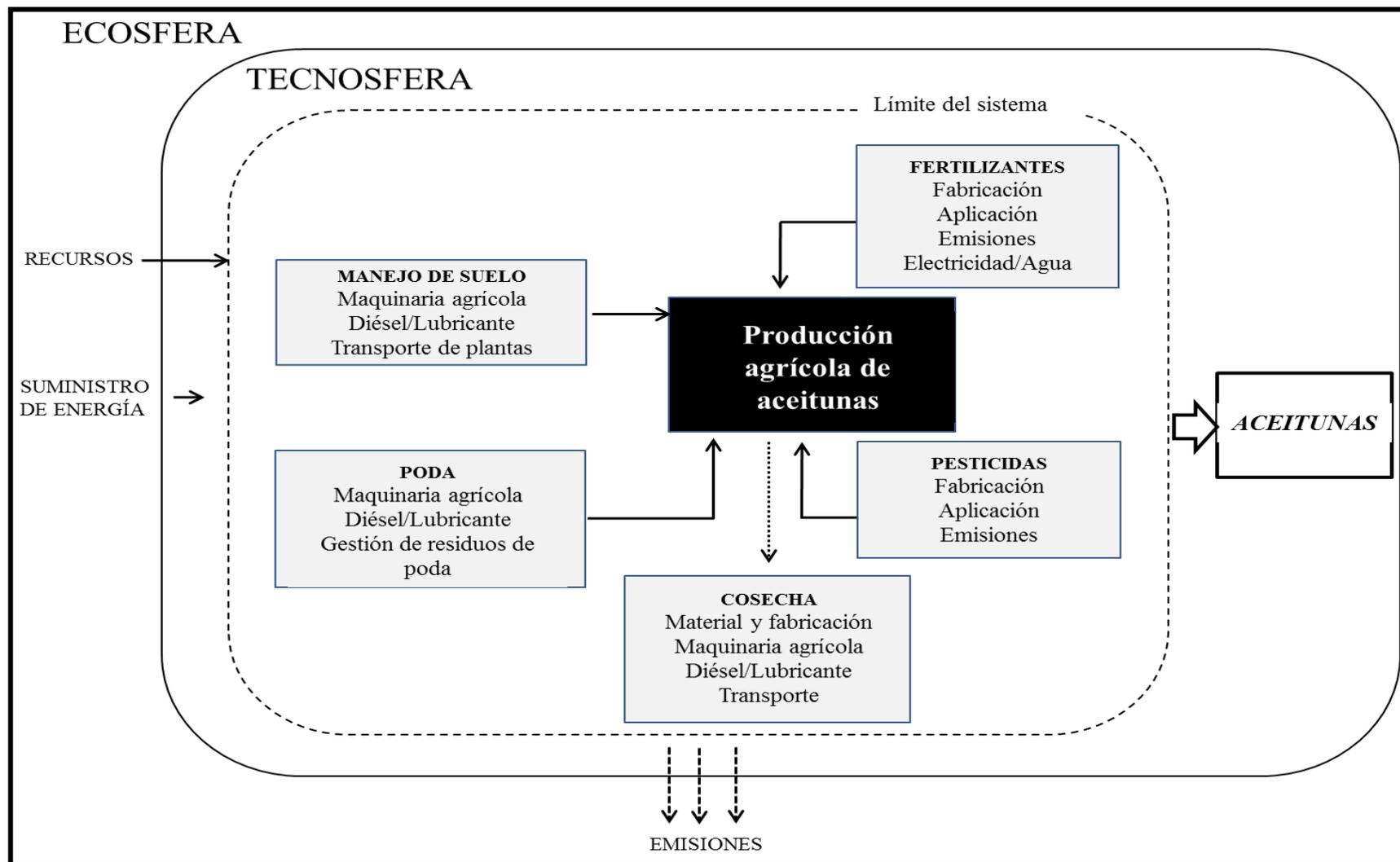


Figura 23. Fases de producción de aceitunas y prácticas agrícolas en el campo incluidas en el análisis

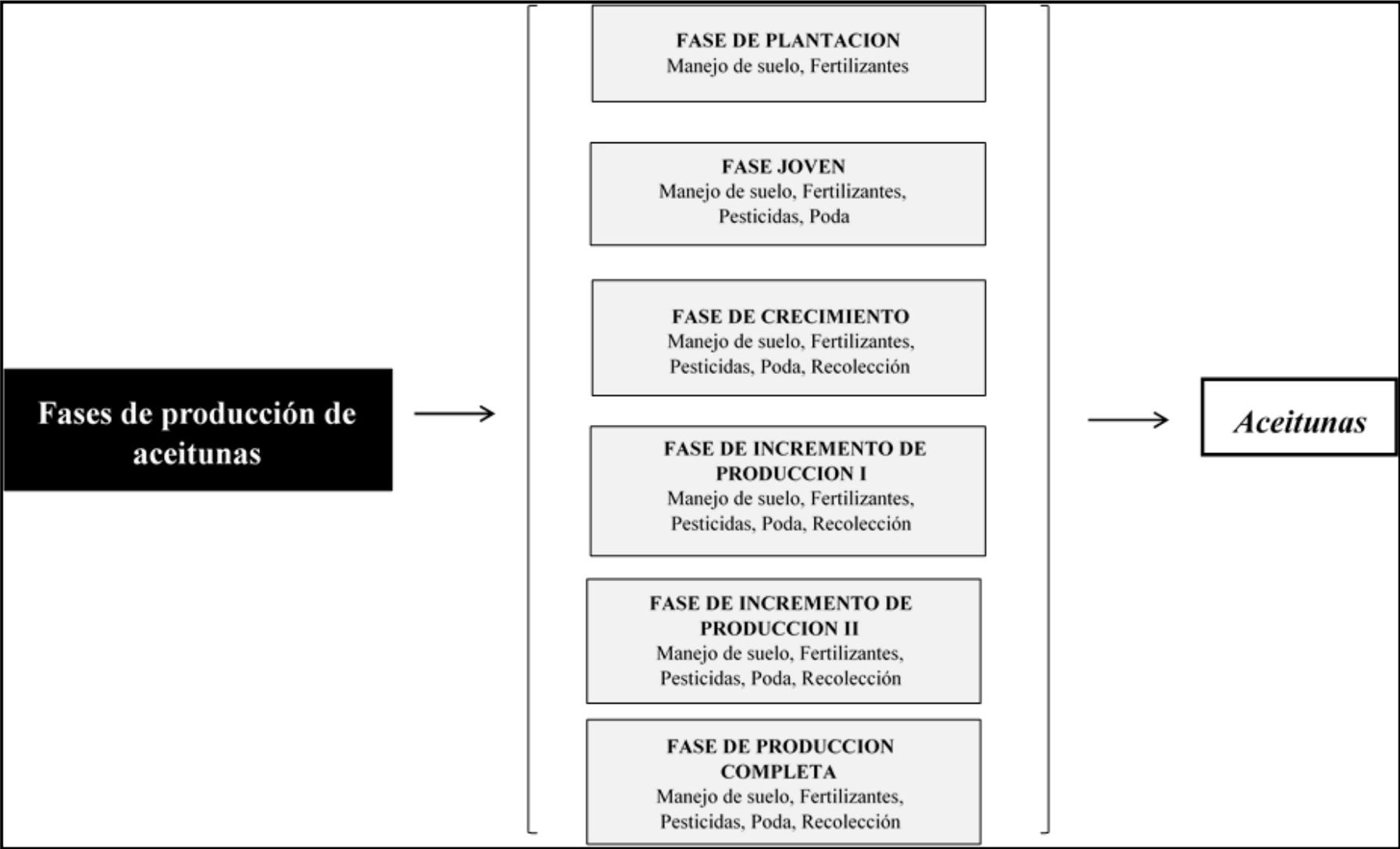


Tabla 13. Datos y fuentes de información relativos a las prácticas agrícolas de campo aplicadas en los sistemas de olivar analizados

Inputs		Fuentes
Productividad		Encuesta de campo*, Larbi et al., 2017, IO (2017a)
Manejo de suelo	Equipos (maquinaria, diésel, lubricante, rendimiento)	Encuesta de campo*, IO (2017b)
	Número de operaciones	Encuesta de campo*, IO (2017b)
	Transporte de las plantas a los sitios de producción	Encuesta de campo*
Poda	Equipos (maquinaria, diésel, lubricante, rendimiento)	Encuesta de campo*
	Tratamiento de los residuos de poda	Encuesta de campo*
	Número de operaciones	Encuesta de campo*, IO (2017b), Masmoudi-Charfi et al., 2016
Fertilizantes	Dosis	Masmoudi-Charfi et al. (2016), IO (2017b); Encuesta de campo*
	Equipo de aplicación (maquinaria, diésel, lubricante, rendimiento)	Encuesta de campo*
	Maquinaria agrícola para la instalación del sistema de fertirriego (diésel, lubricante, rendimiento)	Encuesta de campo*, Masmoudi-Charfi et al. (2012)
	Número de operaciones	Encuesta de campo*
	Emisiones al aire	EEA, 2013, IPCC, 2006
	Consumo de agua	Encuesta de campo*, Masmoudi-Charfi et al. (2012)
	Electricidad	Encuesta de campo*
Pesticidas	Dosis	Encuesta de campo*, IO (2017b)
	Equipo de aplicación (maquinaria, diésel, lubricante, rendimiento)	Encuesta de campo*, IO (2017b)
	Número de operaciones	Encuesta de campo*
	Emisiones al aire	EEA, 2013
Recolección	Equipos (maquinaria, diésel, lubricante, rendimiento)	Encuesta de campo*
	Transporte (material plástico + aceitunas recolectadas + aceitunas del campo a la almazara)	Encuesta de campo*

* Comunicación personal de los agricultores y expertos

Tabla 14. Descripción de las prácticas agrícolas de campo de los sistemas de producción olivarera para cada fase de cultivo

Fases en cada sistema de cultivo	Años	Manejo del suelo	Fertilizantes	Pesticidas	Poda y gestión de residuos	Recolección
TCIF						
Fase de plantación		Uso de cultivador, grada de discos y tractor retroexcavador	Aplicación en el suelo con estiércol	-	-	-
Fase juvenil	4	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	-
Fase de crecimiento	3	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de incremento de la producción 1	4	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de incremento de la producción 2	5	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de plena producción	3 4	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual
TCRF						

Fase de plantación		Uso de cultivador, grada de discos y tractor retroexcavador	Aplicación en el suelo con estiércol	-	-	-
Fase juvenil	4	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	-
Fase de crecimiento	3	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de incremento de la producción 1	9	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de incremento de la producción 2	3	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de plena producción	3 1	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual
TCR						
Fase de plantación		Uso de cultivador, grada de discos y tractor retroexcavador	Aplicación en el suelo con estiércol	-	-	-
Fase juvenil	4	Uso del cultivador	-	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	-
Fase de crecimiento	3	Uso del cultivador	-	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de incremento de	9	Uso del cultivador	-	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual

la producción 1						
Fase de incremento de la producción 2	3	Uso del cultivador	-	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de plena producción	3 1	Uso del cultivador	-	Insecticida (dimetoato)	Manual y quema de residuos	Manual
TOIF						
Fase de plantación		Uso de cultivador, grada de discos y tractor retroexcavador	Aplicación en el suelo con estiércol	-	-	-
Fase juvenil	4	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con compost	-	Manual y quema de residuos	-
Fase de crecimiento	3	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con compost	-	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de incremento de la producción 1	4	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con compost	-	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de incremento de la producción 2	5	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con compost	-	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de plena producción	3 4	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con compost	-	Manual y quema de residuos	Manual

TORF						
Fase de plantación		Uso de cultivador, grada de discos y tractor retroexcavador	Aplicación en el suelo con estiércol	-	-	-
Fase juvenil	4	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	-	Manual y quema de residuos	-
Fase de crecimiento	3	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	-	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de incremento de la producción 1	9	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	-	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de incremento de la producción 2	3	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	-	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de plena producción	31	Uso del cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol	-	Manual y quema de residuos	Manual
TOR						
Fase de plantación		Uso de cultivador, grada de discos y tractor retroexcavador	Aplicación en el suelo con estiércol	-	-	-
Fase juvenil	4	Uso del cultivador	-	-	Manual y quema de residuos	-
Fase de crecimiento	3	Uso del cultivador	-	-	Manual y quema de residuos	Manual

Fase de incremento de la producción 1	9	Uso del cultivador	-	-	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de incremento de la producción 2	3	Uso del cultivador	-	-	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de plena producción	31	Uso del cultivador	-	-	Manual y quema de residuos	Manual
ICIF1						
Fase de plantación		Uso de cultivador, grada de discos y tractor retroexcavador	Aplicación en el suelo con estiércol, sulfato potásico y superfosfato triple	-	-	-
Fase juvenil	2	Uso de cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol + fertirriego	Insecticidas (dimetoato y deltametrina)	Manual y quema de residuos	-
Fase de crecimiento	4	Uso de cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol + fertirriego	Insecticidas (dimetoato y deltametrina)	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de incremento de la producción 1	5	Uso de cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol + fertirriego	Insecticidas (dimetoato y deltametrina)	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de plena producción	39	Uso de cultivador	Aplicación en el suelo con estiércol + fertirriego	Insecticidas (dimetoato y deltametrina)	Manual y quema de residuos	Manual
ICIF2						

Fase de plantación		Uso del cultivador, la grada de discos y el cincel	Aplicación en el suelo con estiércol, sulfato potásico y superfosfato triple	-	-	-
Fase juvenil	2	Uso de la segadora	Tratamiento foliar con N,P,K y microelementos + fertirriego	Herbicida (glifosato) e insecticidas (dimetoato y deltametrina) y fungicida (metil tiofanato)	Manual y quema de residuos	-
Fase de crecimiento	6	Uso de la segadora	Tratamiento foliar con N,P,K y microelementos + fertirriego	Herbicida (glifosato) e insecticidas (dimetoato y deltametrina)	Manual y quema de residuos	Manual
Fase de plena producción	1 7	Uso de la segadora	Tratamiento foliar con N,P,K y microelementos + fertirriego	Herbicida (glifosato) e insecticidas (dimetoato y deltametrina)	Manual y quema de residuos	Manual
SICIF						
Fase de plantación		Uso del cultivador, la grada de discos y el cincel	Aplicación en el suelo con estiércol, sulfato potásico y superfosfato triple	-	-	-
Fase juvenil	2	Uso de la segadora	Tratamiento foliar con N,P,K y microelementos + fertirriego	Herbicida (glifosato) e insecticidas (dimetoato y deltametrina) y fungicida (metil tiofanato)	Manual y quema de residuos	-
Fase de crecimiento	3	Uso de la segadora	Tratamiento foliar con N,P,K y microelementos + fertirriego	Herbicida (glifosato), fungicida (cobre) e insecticidas (dimetoato y deltametrina)	Con podadora de discos y triturado de residuos con trituradoras y acolchado del suelo	Con cosechadora de aceitunas
Fase de plena producción	1 1	Uso de la segadora	Tratamiento foliar con N,P,K y microelementos + fertirriego	Herbicida (glifosato), fungicida (cobre) e insecticidas (dimetoato y deltametrina)	Con podadora de discos y triturado de residuos con trituradoras y acolchado del suelo	Con cosechadora de aceitunas

7.1.2.1. Prácticas agrícolas de los sistemas olivareros

Los principales datos incluidos en todos los sistemas para cada fase de cultivo se resumen en las Tablas 15 a 20.

Las fases de cultivo de los sistemas evaluados se estructuraron en cinco prácticas agrícolas: manejo del suelo, fertilizantes, pesticidas, poda y recolección.

- Manejo del suelo: Incluye el uso de la maquinaria agrícola necesaria para hacer los hoyos para llevar a cabo la plantación del árbol y el control de las malas hierbas (cincel, cultivador, grada de discos y segadora). También se consideró el número de operaciones, el rendimiento (h ha^{-1}), el consumo de diésel y el aceite lubricante consumidos por la maquinaria agrícola empleada y el vehículo de transporte de las plantas de olivo a las fincas.
- Fertilizantes: La fabricación de fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos (N, P_2O_5 y K_2O) y su aplicación al cultivo, así como las emisiones al aire derivadas de los fertilizantes nitrogenados (NH_3 y N_2O), se incluyeron en todas las fases y en todos los sistemas. La fertilización difiere entre los sistemas debido al uso de diferentes productos y a los métodos utilizados para su distribución (al suelo o mediante fertirriego). En los sistemas tradicionales, se ha considerado que los fertilizantes se aplican al suelo con estiércol y compost. En los sistemas intensivo y súper-intensivo, el tipo de fertilizantes y el método de aplicación difieren entre las distintas fases: durante la fase de plantación, los fertilizantes se aplican en el suelo con estiércol, sulfato potásico y superfosfato triple (Masmoudi-Charfi et al., 2016; IO, 2017b). En el resto de fases, los fertilizantes se aplican mediante fertirriego utilizando nitrato amónico, ácido fosfórico, nitratos potásicos y cálcicos, ácido húmico y bio-estimulante, y mediante tratamientos foliares que incluyeron N, P, K y microelementos (hierro, manganeso, zinc, cobre, boro y molibdeno, en los sistemas ICIF2 y SICIF). También se tuvo en cuenta el consumo de agua y electricidad por el sistema de riego (Tablas 15 a 20). Las emisiones de NH_3 y N_2O al aire se calcularon siguiendo las metodologías descritas en IPCC (2006) y EEA (2013). También se incluyó la maquinaria agrícola utilizada para la instalación del sistema de riego, el número de operaciones, el rendimiento (h ha^{-1}) y el diésel y el aceite lubricante consumidos en la fase de plantación de los sistemas intensivo y súper-intensivo.
- Pesticidas: En la fase de plantación y en los sistemas ecológicos no se aplican pesticidas. En los sistemas tradicionales se utiliza dimetoato como insecticida y en los sistemas

intensivo y súper-intensivo, dimetoato y deltametrina (insecticidas). En los sistemas ICIF2 y SICIF también se aplica glifosato (herbicida) y metil-tiofanato y cobre (fungicida). Las dosis de ingredientes activos de los pesticidas se muestran en las Tablas 15 a 20. Las emisiones al aire procedentes del control fitosanitario se han calculado utilizando la metodología descrita en EEA (2013). Los productos fitosanitarios se aplican mediante agua de riego y pulverizador de campo y también se incluyó el equipo de aplicación (maquinaria, diésel, lubricante y rendimiento).

- Poda: En la fase de plena producción del sistema súper-intensivo, la poda se realiza con un equipo de poda de disco y los residuos se trituraron con trituradoras (Tabla 14). Se consideró el número de operaciones, el rendimiento (h ha^{-1}) y el consumo de diésel y aceite lubricante de la maquinaria agrícola. En el resto de sistemas la poda se considera que es manual y los residuos de madera se queman, por lo que la poda en estos sistemas no se incluyó en el ICV.
- Recolección: La recolección se realiza manualmente en los sistemas tradicional e intensivo. Sin embargo, la recolección es mecanizada en el sistema súper-intensivo, utilizando una cosechadora de aceitunas. Se consideró el número de operaciones, el rendimiento y las cantidades de diésel y aceite lubricante consumidos por la cosechadora. También se incluyó el material plástico utilizado en la recolección, como el HDPE en las mallas y los procesos de fabricación (es decir, la extrusión del plástico). Además, se consideró el transporte en remolque y tractor de las mallas y de las aceitunas recogidas y el transporte de las aceitunas del campo a la almazara, así como, el uso de maquinaria agrícola (rendimiento, diésel y aceite lubricante consumido) para retirar los olivos al final de su ciclo de vida.

7.1.2.2. Fases de cultivo

Como ya se ha indicado, el ciclo de vida de cada sistema se dividió en diferentes fases de cultivo: plantación, fase joven, fase de crecimiento, fase de incremento de la producción 1, fase de incremento de la producción 2 y fase de completa producción (Figura 23). Las Tablas 15 a 20 muestran los principales insumos de todos los sistemas en las diferentes fases de cultivo. El período de referencia del ciclo de vida del cultivo del olivo fue 50 años, aproximadamente, lo que corresponde a la vida útil de los sistemas tradicionales y del sistema ICIF1, dos veces del sistema ICIF2 y tres veces del sistema súper-intensivo. Así, cada fase del sistema ICIF2 y del sistema súper-intensivo se repite dos y tres veces, respectivamente. El ciclo de producción total

fue 50 años para los sistemas tradicionales y el sistema ICIF1, 25 y 50 años para el sistema ICIF2 y de 16, 32 y 48 años para el sistema SICIF. Los años de cada fase se muestran en la Tabla 11.

A continuación, se describen las fases de cultivo de los diferentes sistemas y las principales prácticas agrarias asociadas:

- Fase de plantación (Tablas 14 y 15): En esta fase se ha considerado el transporte de las plantas de olivo a las fincas y la preparación del suelo antes de la plantación, incluyendo el manejo del suelo con cultivador y grada de discos en todos los sistemas. Los hoyos son excavados con un cincel en los sistemas ICIF2 y SICIF y con un tractor retroexcavador en el resto de sistemas, y posteriormente, se plantan los árboles. En todos los sistemas se considera la aplicación de abono orgánico con estiércol. Además, se añade sulfato potásico y superfosfato o triple en los sistemas intensivo y súper-intensivo.
- Fase joven (Tablas 14 y 16): Esta fase comprende desde la plantación hasta el cuarto año en los sistemas tradicionales y hasta el segundo año en los sistemas ICIF y SICIF. Durante esta fase los olivos se podan a mano y no se obtiene una producción significativa. A partir de la fase joven: El manejo del suelo incluye el control de las malas hierbas con cultivador en los sistemas tradicionales y el sistema ICIF1 y con desbrozadora en los sistemas ICIF2 y SICIF. En los sistemas ICIF y SICIF, la distribución de los principales fertilizantes químicos se realiza a través del sistema de fertirriego y en los sistemas ICIF2 y súper-intensivo, los fertilizantes se aplican también con tratamientos foliares. La fertilización orgánica (con estiércol o compost) se mezcla con el suelo mediante el laboreo en los sistemas tradicional y el sistema ICIF1. Se considera la utilización de pesticidas en todos los sistemas excepto en los ecológicos y la aplicación de herbicidas y fungicidas en los sistemas ICIF2 y SICIF.
- Fase de crecimiento (Tablas 14 y 17): Comprende desde el quinto al séptimo año en los sistemas tradicionales y desde el tercero al sexto en el sistema ICIF1, desde el tercero al octavo en el sistema ICIF2 y desde el tercero al quinto año en el sistema SICIF. En esta fase, la productividad de ICIF2 y SICIF es superior a la de ICIF1, mientras que la productividad en los sistemas tradicionales es mínima. Desde esta fase hasta el final del ciclo de producción, la poda y la recolección se consideran mecanizadas en el sistema SICIF y manuales en el resto de sistemas.
- Fases de incremento de la producción (Tablas 14, 18 y 19): Estas fases se incluyen en los sistemas tradicionales y en el sistema ICIF1. Durante estas fases, la producción

aumenta y el rendimiento es óptimo. El período de las fases difiere entre los sistemas, en función de las prácticas agrícolas utilizadas para alcanzar el máximo rendimiento (con o sin riego y/o fertilización).

- Fase de plena producción (Tablas 14 y 20): Durante esta fase, la producción de aceitunas puede considerarse constante y en los últimos años el rendimiento empieza a disminuir. Esta fase es más corta en el sistema ICIF2 (17 años) y en SICIF (11 años), debido principalmente a una mayor competencia entre los árboles de cada hilera, lo que provoca importantes problemas de supervivencia. El manejo del cultivo y las dosis de fertilizantes y pesticidas son mayores en esta fase. Al final de la fase de plena producción, se retiran los olivos.

Tabla 15. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase de plantación

Dosis de fertilizantes (kg ha⁻¹)	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
N	22	13	13	22	13	13	88	351	438
P2O5	7	4	4	7	4	4	56	201	229
K2O	8	5	5	8	5	5	64	231	264
Emisiones al aire (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0,81	0,49	0,49	0,81	0,49	0,49	3,24	12,97	16,21
N ₂ O-N	0,22	0,13	0,13	0,22	0,13	0,13	0,88	3,51	4,38
Manejo de suelo (h ha⁻¹)									
	11	11	11	11	11	11	19	19	19
Transporte de plantas (km ton)									
	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,28	2,09	3,15

Tabla 16. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase joven (media anual)

Dosis de fertilizantes (kg ha⁻¹)	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
N	4	4	0	5	4	0	30	50	57
P2O5	1	1	0	1	1	0	16	38	48
K2O	2	2	0	2	2	0	17	18	26
Emisiones al aire (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0,16	0,16	0	0,2	0,16	0	1,11	1,85	2,11
N ₂ O-N	0,04	0,04	0	0,05	0,04	0	0,3	0,5	0,57
Agua (m³ ha⁻¹)	275	0	0	250	0	0	577	1620	1800
Electricidad (kWh ha⁻¹)	102,7	0	0	93,4	0	0	215,5	605,2	672,5
Aplicación de pesticidas (kg ha⁻¹)									
Glifosato	0	0	0	0	0	0	0	1,8	3,6
Dimetoato	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0,2	0,2	0,4
Deltametrina	0	0	0	0	0	0	0,02	0,02	0,02
Tiofanato-metilo	0	0	0	0	0	0	0	2,1	2,1

Tabla 17. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase de crecimiento (media anual)

	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Productividad (kg ha⁻¹)	375	250	175	280	238	175	3525	8000	8345
Dosis de fertilizantes (kg ha⁻¹)									
N	4	4	0	5	4	0	55	82	107
P2O5	1	1	0	1	1	0	24	50	57
K2O	2	2	0	2	2	0	25	45	69
Emisiones al aire (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0,16	0,16	0	0,2	0,16	0	2,04	3,03	3,96
N ₂ O-N	0,04	0,04	0	0,05	0,04	0	0,55	0,82	1,07
Agua (m³ ha⁻¹)	275	0	0	250	0	0	993	2700	3000
Electricidad (kWh ha⁻¹)	102,7	0	0	93,4	0	0	360,5	1008,7	1120,8
Aplicación de pesticidas (kg ha⁻¹)									
Glifosato	0	0	0	0	0	0	0	3,6	3,6
Dimetoato	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0,2	0,4	0,8
Deltametrina	0	0	0	0	0	0	0,02	0,03	0,03
Cobre	0	0	0	0	0	0	0	0	1,25

Tabla 18. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase de incremento de producción 1 (media anual)

	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Productividad (kg ha⁻¹)	625	400	312	450	375	312	5500	-	-
Dosis de fertilizantes (kg ha⁻¹)									
N	9	9	0	5	4	0	109	-	-
P2O5	3	3	0	1	1	0	36	-	-
K2O	3	3	0	2	2	0	45	-	-
Emisiones al aire (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0,32	0,32	0	0,2	0,16	0	4,03	-	-
N ₂ O-N	0,09	0,09	0	0,05	0,04	0	1,09	-	-
Agua (m³ ha⁻¹)	367	0	0	350	0	0	1630	-	-
Electricidad (kWh ha⁻¹)	137,1	0	0	131	0	0	611	-	-
Aplicación de pesticidas (kg ha⁻¹)									
Glifosato	0	0	0	0	0	0	0	-	-
Dimetoato	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0,4	-	-
Deltametrina	0	0	0	0	0	0	0,02	-	-

Tabla 19. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase de incremento de producción 2 (media anual)

	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Productividad (kg ha⁻¹)	1250	625	437	875	500	437	-	-	-
Dosis de fertilizantes (kg ha⁻¹)									
N	18	13	0	11	9	0	-	-	-
P2O5	6	4	0	2	3	0	-	-	-
K2O	7	5	0	3	3	0	-	-	-
Emisiones al aire (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0,65	0,49	0	0,39	0,32	0	-	-	-
N ₂ O-N	0,18	0,13	0	0,11	0,09	0	-	-	-
Agua (m³ ha⁻¹)	550	0	0	500	0	0	-	-	-
Electricidad (kWh ha⁻¹)	205,5	0	0	168,5	0	0	-	-	-
Aplicación de pesticidas (kg ha⁻¹)									
Glifosato	0	0	0	0	0	0	-	-	-
Dimetoato	0,05	0,05	0,05	0	0	0	-	-	-
Deltametrina	0	0	0	0	0	0	-	-	-

Tabla 20. Principales características de los sistemas de producción de aceitunas durante la fase de plena producción (media anual)

	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Productividad (kg ha⁻¹)	2159	900	622	1657	850	622	7000	9500	10600
Dosis de fertilizantes (kg ha⁻¹)									
N	18	13	0	11	9	0	119	119	145
P2O5	6	4	0	2	3	0	36	51	59
K2O	7	5	0	3	3	0	45	77	97
Emisiones al aire (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0,65	0,49	0	0,39	0,32	0	4,4	4,4	5,37
N ₂ O-N	0,18	0,13	0	0,11	0,09	0	1,19	1,19	1,45
Agua (m³ ha⁻¹)	550	0	0	500	0	0	2350	3240	3600
Electricidad (kWh ha⁻¹)	205,5	0	0	168,5	0	0	878	1210,4	1345
Aplicación de pesticidas (kg ha⁻¹)									
Glifosato	0	0	0	0	0	0	0	3,6	7,2
Dimetoato	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0,4	0,6	0,8
Deltametrina	0	0	0	0	0	0	0,03	0,03	0,03
Cobre	0	0	0	0	0	0	0	0	1,25

7.1.3. Análisis del impacto del ciclo de vida (AICV)

La metodología utilizada para evaluar los impactos de la producción de aceitunas es el análisis del impacto del ciclo de vida (AICV). ILCD 2011 Midpoint+ v. 1.08/EU27 2010 (Comisión Europea, 2012) fue el método utilizado para clasificar, caracterizar y normalizar las entradas y salidas del inventario. Para el cálculo de los impactos ambientales se utilizó el software simaPro v. 8.5.2.0 (Pré Consultants, 2017).

Las categorías de impacto más relevantes evaluadas en este estudio son Huella de carbono (HC) en kg CO₂ eq, Acidificación (AA) en molc. H⁺ eq, Eutrofización del agua dulce (EU) en kg P eq y Ecotoxicidad del agua dulce (EC) en CTUe (Comparative Toxic Unit for ecosystems). HC mide el impacto sobre el calentamiento global en un horizonte temporal de 100 años (IPCC, 2007). AA es la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua dulce, (Seppälä et al. 2006 y Posch et al. 2008). EU es el grado en que los nutrientes emitidos llegan al agua dulce (considerando el fósforo como factor limitante) (Struijs et al. 2009). La EC expresa una estimación de la fracción de especies potencialmente afectadas en el tiempo y el volumen por

unidad de masa de una sustancia química emitida (Rosenbaum et al. 2008). Las categorías de impacto seleccionadas para el análisis ambiental fueron elegidas por su relevancia en los procesos agrícolas y siguiendo las Reglas de Categoría de Producto (PCR) para el aceite de oliva del Sistema Internacional de Declaración Ambiental de Producto (EPD) (Environdec, 2020). Finalmente, estas categorías se calcularon a través de las etapas de caracterización y normalización, según la norma ISO 14040 (2006).

7.1.3.1. Caracterización

La caracterización se realiza multiplicando los resultados del inventario, obtenidos en la fase de clasificación, por los factores de caracterización de cada sustancia dentro de cada categoría de impacto, como se presenta en la Ecuación (6):

$$\text{Indicador de categoría} = \text{Factor de caracterización } (S) \times \text{Inventario de emisiones } (S) \quad (6)$$

En la que S describe la sustancia química.

Los factores de caracterización de la ecuación (6) expresan linealmente la contribución de una unidad de masa (1 kg) de una emisión al medio ambiente.

7.1.3.2. Normalización

La normalización añade las ventajas de mostrar los resultados de las categorías de impacto caracterizadas en un contexto más amplio. Se expresa de forma que permite comparar las categorías de impacto entre sí, de forma que, la suma del resultado de cada categoría se divide por un valor de referencia según la ecuación (7) de la siguiente forma:

$$N_k = S_k / R_k \quad (7)$$

Donde k indica la categoría de impacto, N es el indicador normalizado, S es el indicador de categoría de la fase de caracterización y R es el valor de referencia o factor de normalización.

7.2. Resultados

7.2.1. Contribuciones de las prácticas agrícolas en las categorías de impacto

En este apartado se determinan los puntos más críticos en los diferentes tipos del manejo de cultivo del olivar en Túnez. Para ello, se identifican las prácticas agrícolas que provocan un mayor impacto ambiental en los sistemas de producción estudiados.

Como se resume en la Tabla 21, la huella de carbono se debió a las emisiones de N_2O y CO_2 al aire causadas por la fabricación y aplicación de fertilizantes y el trabajo de campo realizado en el manejo del suelo. La acidificación fue causada por las emisiones de NH_3 al aire debido a la producción de fertilizantes y su aplicación al cultivo. Las emisiones de fosfatos al agua debidas a la fabricación y aplicación de fertilizantes y al manejo del suelo fueron importantes contaminantes en la categoría de eutrofización. Por último, la ecotoxicidad estuvo dominada por las emisiones de cobre al agua procedentes de la producción y aplicación de fertilizantes.

Tabla 21. Flujo más relevante y prácticas agrícolas de campo de los sistemas de cultivo

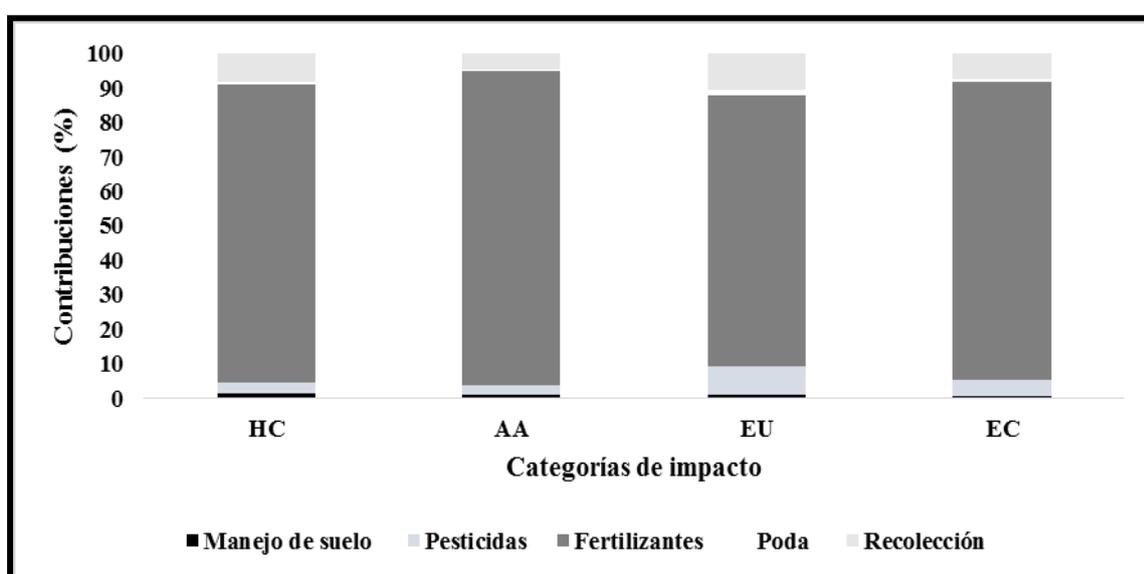
Categoría de impacto	Flujo elemental	Compartiment o	Principales prácticas agrícolas
Huella de carbono	Dióxido de carbono, CO_2 , fósil	Aire	Fertilizantes
	Monóxido de di nitrógeno, N_2O		Manejo del suelo
Acidificación	Amoníaco, NH_3	Aire	Fertilizantes
Eutrofización del agua dulce	Fosfato	Agua	Fertilizantes
			Manejo del suelo
Ecotoxicidad del agua dulce	Cobre, Cu	Agua	Fertilizantes

Las Figuras 24 a 32 muestran las contribuciones de las prácticas agrícolas a las categorías de impacto seleccionadas en la fase de plena producción de los sistemas olivareros evaluados. En general, los fertilizantes, el manejo del suelo y la recolección fueron las prácticas agrícolas de campo con mayor contribución a las categorías de impacto estudiadas. Los pesticidas y la poda tuvieron una carga medioambiental baja o prácticamente nula.

7.2.1.1. Sistemas innovadores (intensivo y súper-intensivo)

En los sistemas intensivo y súper-intensivo (ICIF1, ICIF2 y SICIF), los fertilizantes tuvieron mayores contribuciones en todas las categorías de impacto (Figuras 24 a 26). En el sistema súper-intensivo (SICIF), la fertilización y la recolección fueron las prácticas agrícolas con alto impacto ambiental, respectivamente: 86,43% y 8,15 % en la HC; 90,82 % y 4,61% en la AA; 78,50 % y 10, 70 % en la EU; 86,21% y 7,43 en la EC (Figura 24).

Figura 24. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema SICIF. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad



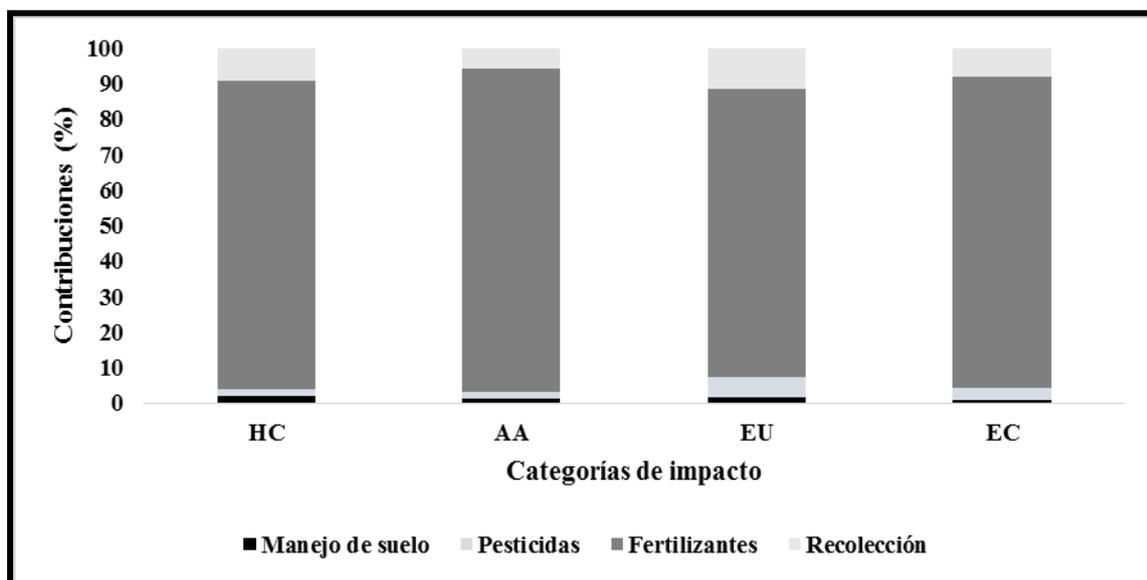
En el sistema intensivo ICIF2, la fertilización y la recolección tuvieron también altas contribuciones: 87,04 % y 9,05 % en la HC; 91,05 % y 5,71% en la AA; 81,4 % y 11,31 % en la EU; 87,88 % y 8,05 % en la EC, respectivamente (Figura 25). En concreto, la acidificación (AA) fue la categoría más influenciada por los fertilizantes en los sistemas intensivo ICIF2 y súper-intensivo, con valores máximos de 92% y 91%, respectivamente (Figuras 24 y 25).

La recolección mostró altas contribuciones en la categoría de eutrofización con un 11% en los sistemas intensivo (ICIF2) y súper-intensivo (SICIF). Los pesticidas mostraron las contribuciones ambientales más bajas en los sistemas convencionales, con un impacto mayor en la categoría eutrofización en los sistemas ICIF2 (6%) y SICIF (8%) (Figuras 24 y 25).

El manejo del suelo presentó también menores impactos ambientales en los sistemas innovadores de alta densidad (SICIF e ICIF2). En estos sistemas, el manejo del suelo y el control de las malas hierbas se hacen principalmente por control químico y el nivel de mecanización es menor.

Las contribuciones en la poda fueron mínimas en el sistema súper-intensivo (hasta un 0,94 % en la categoría HC; 0,68 % en la AA; 1,35 % en la EU y 1,02 en la EC) (Figura 24).

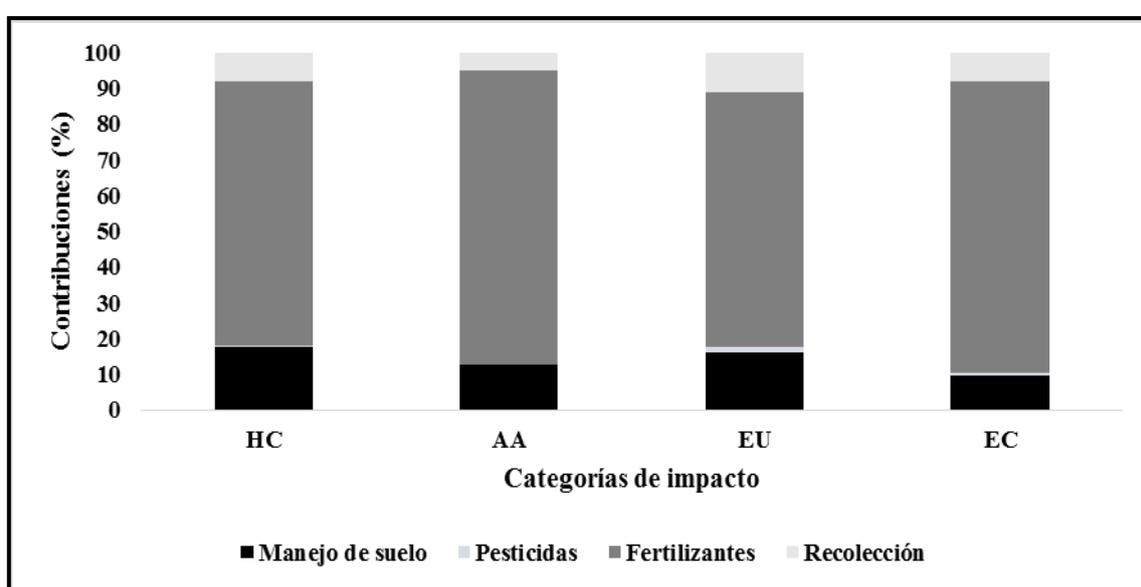
Figura 25. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema ICIF2. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad



En el sistema intensivo ICIF1, los fertilizantes, el manejo de suelo y la recolección fueron las prácticas que causaron altos impactos ambientales. Las contribuciones de estas prácticas en las categorías de impactos fueron, respectivamente: 73,90 %, 17,52 % y 8,18% en la HC; 82,16%, 12,44% y 5,05% en la AA, 71,30%, 16,01% y 11,16% en la EU, 81,65%, 9,65 y 7,9% en la EC (Figura 26). Además de la fertilización, el manejo del suelo fue un contribuyente significativo en todas las categorías en este sistema intensivo (hasta un 18% en la categoría de huella de carbono y un 16% en la categoría de la eutrofización) (Figura 26). El alto impacto del manejo del suelo en el sistema ICIF1 se debió principalmente a un alto número de las operaciones mecanizadas del manejo de suelo. De hecho, el control de las malas hierbas en el sistema ICIF1 es totalmente mecanizado (con tractor y equipo de laboreo) mientras que en los sistemas ICIF2

y SICIF se hace principalmente mediante control químico. La baja densidad de plantación en el sistema ICIF1 facilita el paso de la maquinaria agrícola en comparación con los otros sistemas de alta densidad (ICIF2 y SICIF). El uso intensivo de la maquinaria (mayor consumo de diésel y lubricante) generó altas contribuciones del manejo de suelo en las categorías estudiadas sobre todo en la huella de carbono (Figura 26).

Figura 26. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema ICIF1. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad



7.2.1.2. Sistemas tradicionales (ecológico y convencional)

En los sistemas tradicionales de secano y sin fertilización (TCR y TOR), el manejo del suelo y la recolección fueron las prácticas con mayores contribuciones y sus valores fueron similares en ambos sistemas (Figuras 27 y 28).

En el sistema convencional TCR, las contribuciones del manejo del suelo, la recolección y los pesticidas en las categorías de impacto fueron, respectivamente: 66,53%, 32,93% y 0,54% en la HC; 71,70%, 27,59% y 0,71% en la AA; 58,32%, 39,82% y 1,86% en la EU; 55,58%, 42,82% y 1,54% en la EC (Figura 27).

En el sistema ecológico TOR, el manejo del suelo y la recolección tuvieron las siguientes contribuciones en las categorías de impactos ambientales, respectivamente: 66,89% y 33,11%

en la HC; 72,21% y 27,79% en la AA; 59,42% y 40,58% en la EU; 56,45% y 43,55% en la EC (Figura 28).

Figura 27. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TCR. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad

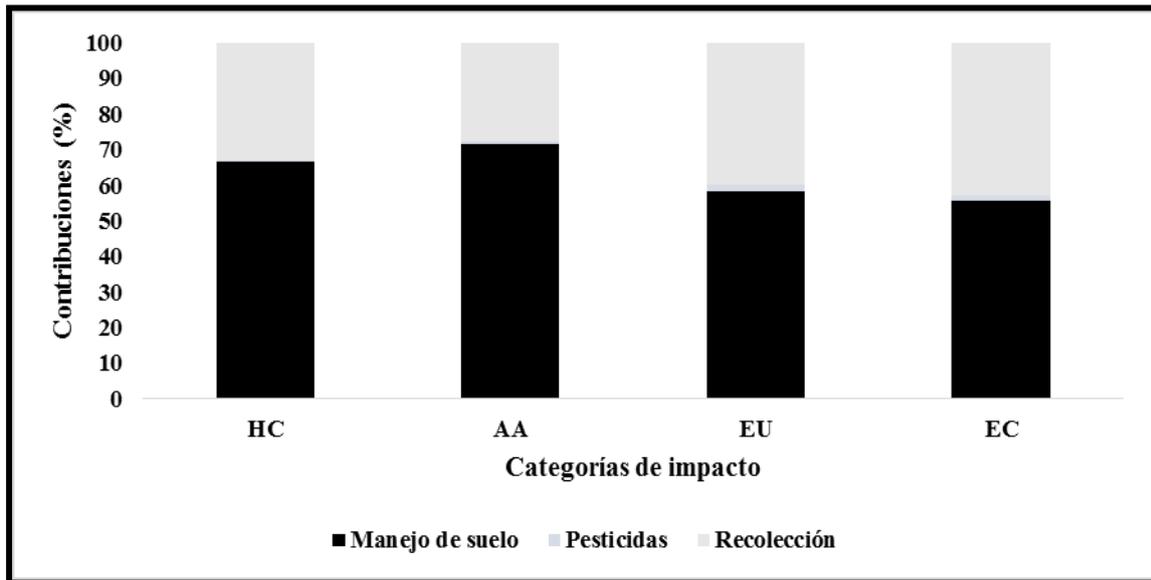
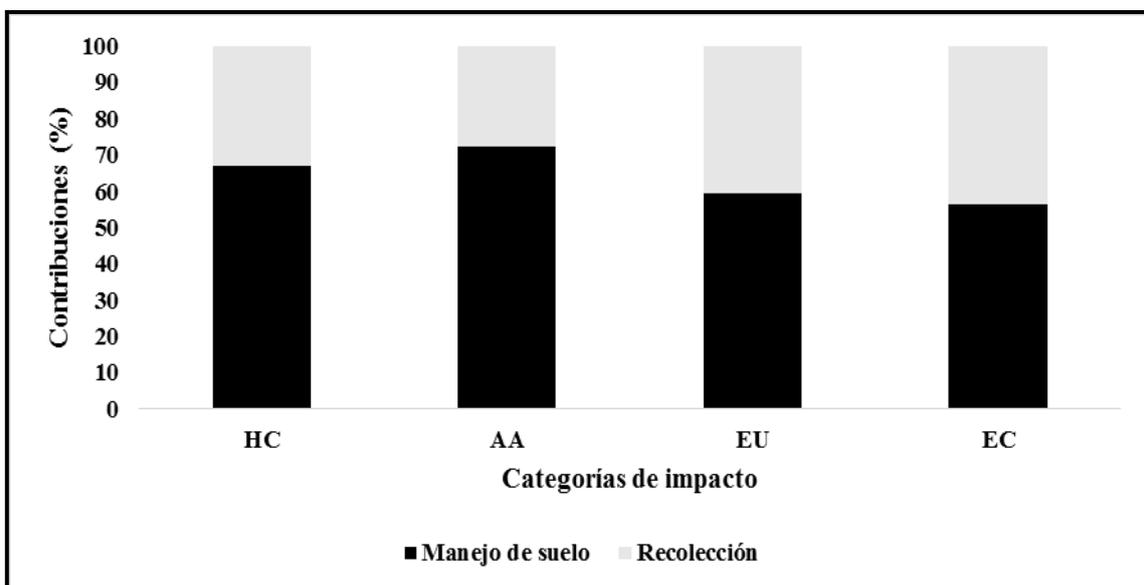


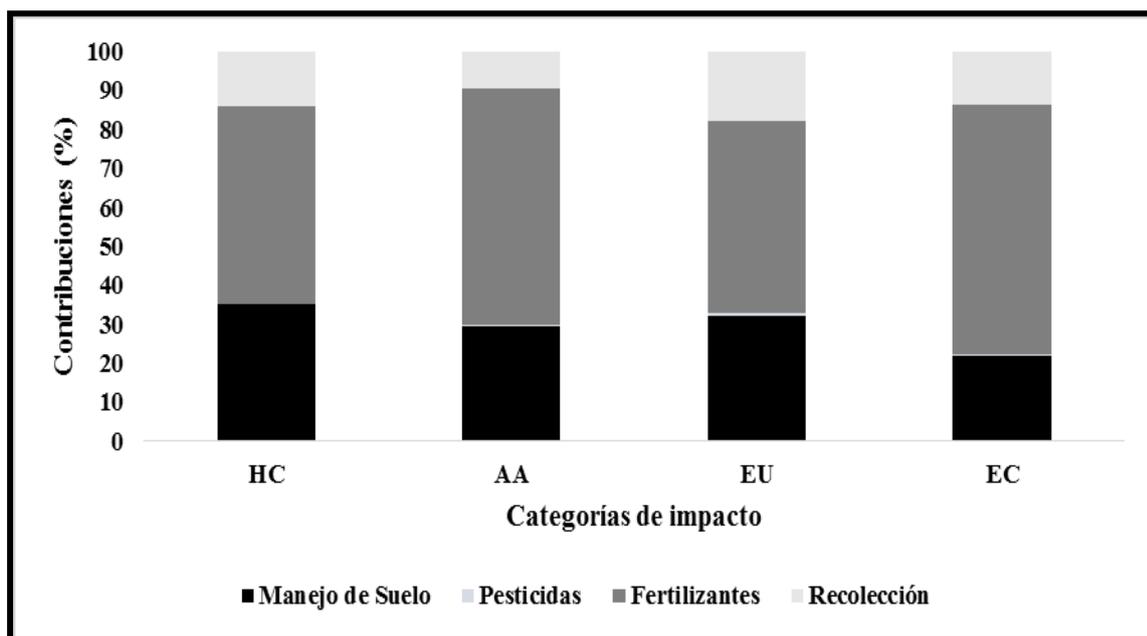
Figura 28. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TOR. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad



En los sistemas tradicionales en regadío y con fertilización (TCIF y TOIF), la práctica agrícola fertilizantes mostró altas contribuciones en la mayoría de las categorías de impacto (Figuras 29 y 30).

En el sistema TCIF, las contribuciones de los fertilizantes y el manejo del suelo fueron altas: 50,76% y 35% en la HC, respectivamente; 60,85% y 29,46% en la AA; 49,31% y 32% en la EU; 64% y 22% en la EC (Figura 29). En los sistemas tradicionales convencionales, los pesticidas tienen un impacto ambiental muy insignificante debido a la baja o nula aplicación de estos insumos químicos en el olivar tradicional en Túnez. De hecho, la mayoría de los tratamientos fitosanitarios se hacen con una frecuencia muy baja (una vez cada cuatro o cinco años) mediante el control de las direcciones de defensa de cultivos de las Comisarias Regional de Desarrollo Agrícola (CRDA) del Ministerio de Agricultura de Túnez.

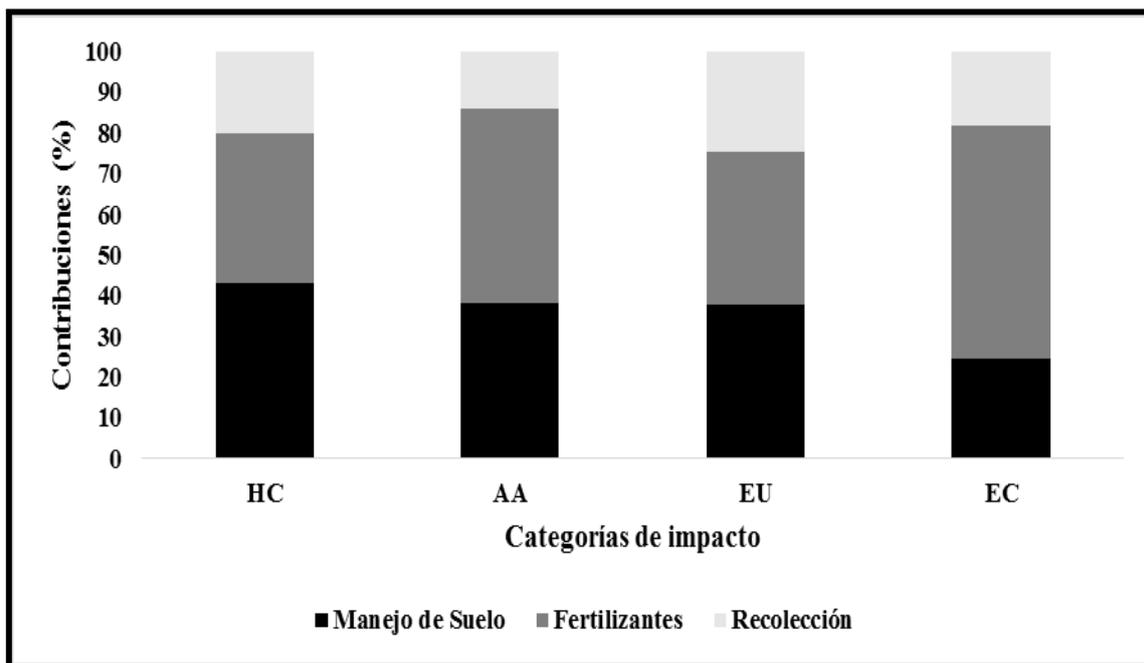
Figura 29. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TCIF. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad



En el sistema tradicional ecológico con riego y con fertilización (TOIF), los fertilizantes y el manejo del suelo mostraron las contribuciones más altas en todas las categorías de impacto. En las categorías de HC y EU, el manejo del suelo fue la práctica más contribuyente: 43,2 % y

38%, respectivamente. En las categorías de AA y EC, la fertilización tuvo más importancia: 48% y 57,48%, respectivamente (Figura 30).

Figura 30. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TOIF. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad



En los sistemas tradicionales de secano y con fertilización (TCRF y TORF), los fertilizantes y el manejo del suelo mostraron altas contribuciones. En el sistema convencional (TCRF), los fertilizantes fueron las prácticas con altas contribuciones en las categorías AA y EC: 53% y 40,21%, respectivamente y el manejo del suelo presentó las contribuciones más altas en HC y EU: 43% y 42%, respectivamente (Figura 31).

En el sistema ecológico de secano con fertilización (TORF), el manejo del suelo contribuyó más en las categorías HC (48,23%), la EU (46,32%) y la EC (41%), y los fertilizantes mostraron mayor contribución en la categoría AA (44%) (Figura 32).

La recolección mostró altas contribuciones en las categorías EU y EC en todos los sistemas, con valores máximos de 40% y 43%, respectivamente, en los sistemas TCR y TOR (Figuras 27 y 28).

Figura 31. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TCRF. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad

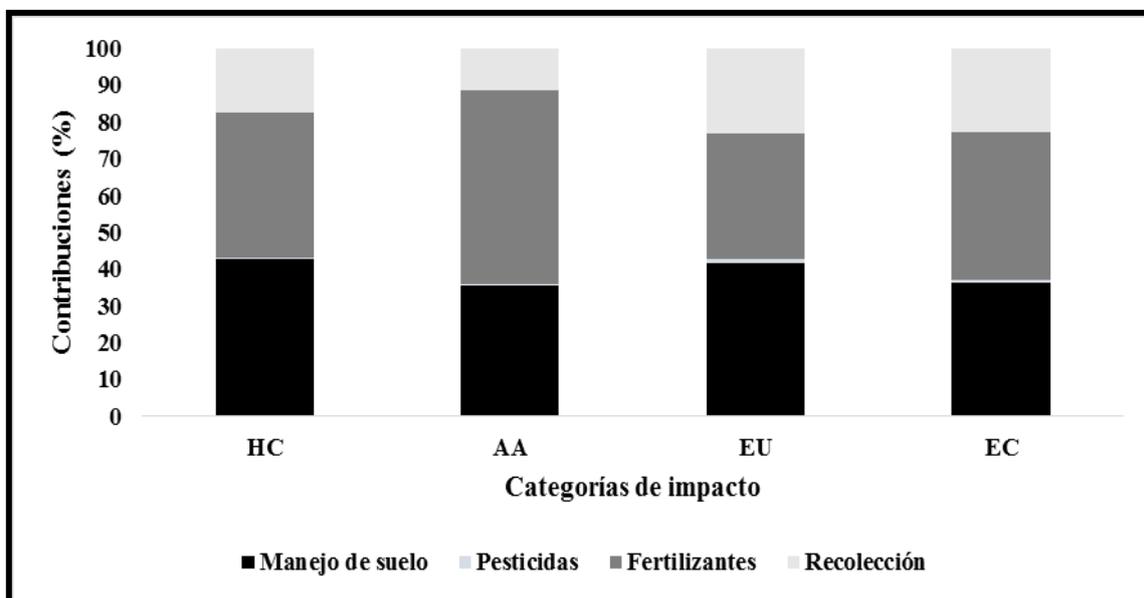
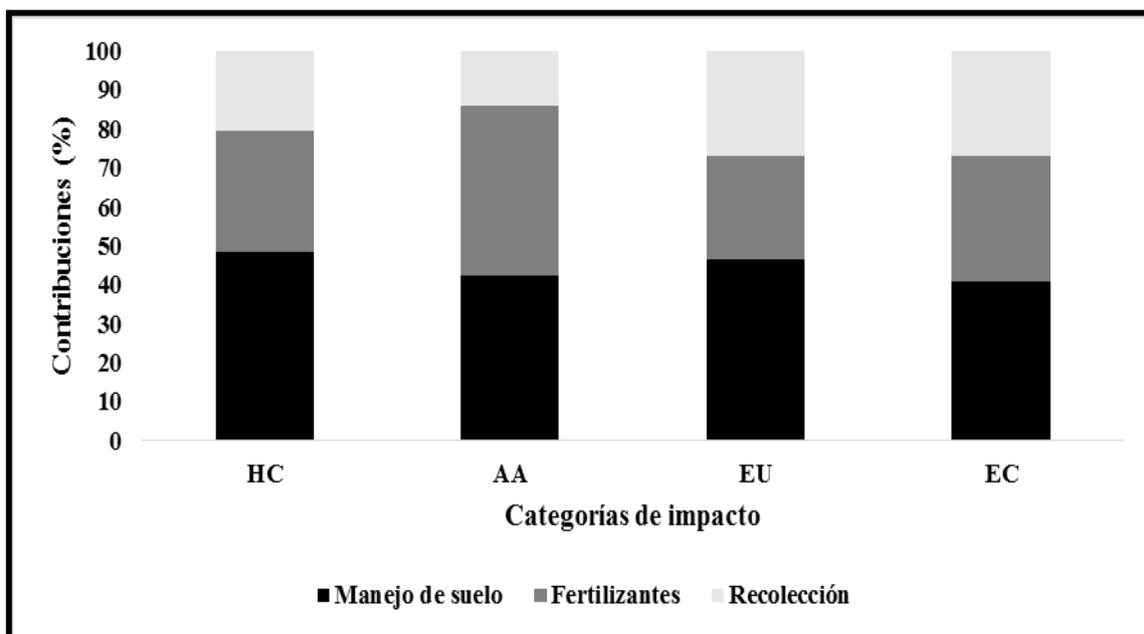


Figura 32. Contribuciones (%) de las prácticas agrícolas en la fase completa del sistema TORF. HC = Huella de Carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad



7.2.1.3. Síntesis de resultados

El manejo del suelo, la fertilización y la recolección fueron las prácticas agrícolas que más contribuyeron en la mayoría de las categorías de impacto evaluadas.

Los fertilizantes dieron lugar a altos impactos ambientales en la mayoría de los sistemas con fertilización, tanto en sistemas innovadores como tradicionales (SICIF, ICIF2, ICIF1, TCIF, TOIF y TCRF).

El manejo del suelo fue una fuente importante de cargas ambientales en todos los sistemas tradicionales y en el sistema intensivo ICIF1, sobre todo en los sistemas tradicionales de secano (TCR, TOR y TORF). El equipo y la maquinaria agrícola necesarios para el control de malas hierbas fueron los principales causantes del impacto obtenido en el manejo del suelo: HC (74% de emisiones de CO₂ al aire) y EU (83% de emisiones de fosfato al agua).

La recolección mostró altas contribuciones en las categorías EU y EC en la mayoría de los sistemas.

Los pesticidas y la poda resultaron en cargas ambientales bajas. Sin embargo, la maquinaria agrícola y el consumo de diésel para la poda causaron altos impactos en la categoría EU en el sistema SICIF.

La metodología de ACV ha demostrado su utilidad en la detección de los puntos ambientales críticos en un proceso determinado de producción agrícola como es el proceso de producción olivarera, permitiendo dirigir y centrar la toma de decisiones hacia el diseño de estrategias para mejorar estas prácticas y mitigar sus impactos ambientales.

7.2.2. Impacto ambiental de los sistemas de producción olivarera

En este apartado se muestra el impacto ambiental de los sistemas de manejo del cultivo de olivar evaluados en Túnez durante todo su ciclo de vida.

7.2.2.1. Resultados por tonelada

La Tabla 22 presenta el impacto ambiental de diferentes manejos del cultivo del olivar por tonelada (t). En general, los sistemas innovadores (intensivo y súper-intensivo) mostraron un menor impacto por t en comparación con los sistemas tradicionales. Los sistemas ICIF2 y SICIF mostraron resultados similares y valores más bajos para todas las categorías (por ejemplo, hasta

un 59% en HC, un 54% en AA, un 52% en EU y un 29% en EC, en comparación con el sistema TCRF). Esto fue debido a una mayor productividad de los sistemas innovadores con respecto al resto de sistemas (Tablas 15 a 20).

En los sistemas de cultivos tradicionales convencionales (TCIF, TCRF y TCR), las cargas más altas para todas las categorías se obtuvieron en el sistema TCRF (Tabla 19). La EC fue la categoría con un mayor impacto ($1,9E+05$ CTUe t^{-1} en TCRF) debido a una alta dosis de fertilizantes y, además, como consecuencia del consumo de agua y electricidad en el caso del sistema TCIF (Tablas 15 a 20).

En los sistemas de cultivos ecológicos tradicionales (TOIF, TORF y TOR), el sistema TOIF obtuvo menores cargas ambientales en las categorías de impacto HC y EU debido a su mayor productividad. En el resto de categorías (AA y EC), TOR fue el sistema ecológico con mejores resultados debido a la ausencia del riego y la fertilización.

Respecto a los sistemas convencionales y ecológicos (TCIF y TOIF, TCRF y TORF, TCR y TOR), los sistemas ecológicos presentaron un menor impacto ambiental en la mayoría de las categorías (Tabla 22) a pesar de tener una productividad inferior o similar a la de los sistemas convencionales (Tablas 15 a 20). Este bajo impacto se debió a la ausencia de fertilizantes minerales y pesticidas.

Tabla 22. Comparación del impacto ambiental por tonelada de las principales categorías de impacto en nueve sistemas de producción de aceituna en Túnez durante un periodo de referencia de 48 años (valores caracterizados y normalizados). HC = Huella de carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad

Impacto por t UF	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
<i>Caracterización</i>									
HC (kg CO ₂ eq)	2,02E+04	3,07E+04	2,34E+04	1,95E+04	2,86E+04	2,32E+04	1,73E+04	1,23E+04	1,24E+04
AA (molc H ⁺ eq)	2,09E+02	3,23E+02	1,92E+02	1,93E+02	2,84E+02	1,91E+02	2,15E+02	1,52E+02	1,54E+02
EU (kg P eq)	4,34E+00	6,16E+00	5,02E+00	4,22E+00	5,74E+00	4,91E+00	3,78E+00	3,01E+00	3,06E+00
EC (CTUe)	1,67E+05	1,86E+05	1,37E+05	1,70E+05	1,69E+05	1,34E+05	1,63E+05	1,32E+05	1,31E+05
<i>Normalización</i>									
HC	2,22	3,38	2,57	2,14	3,14	2,55	1,91	1,35	1,37
AA	4,41	6,82	4,05	4,07	6,00	4,02	4,54	3,20	3,26
EU	2,93	4,17	3,39	2,85	3,88	3,32	2,55	2,04	2,07
EC	19,07	21,21	15,58	19,4	19,28	15,28	18,6	15,08	14,97

7.2.2.2. Resultados por hectárea

Los sistemas tradicionales mostraron un menor impacto ambiental por hectárea (ha) con respecto a los sistemas de alta densidad (intensivos y súper-intensivo) (Tabla 23). El sistema súper-intensivo (SICIF) presentó altos impactos (hasta el 92% en HC, el 95% en AA, el 93% en EU y el 95% en EC, más que en los sistemas TCR y TOR), debido a una mayor aplicación de fertilizantes y pesticidas y un mayor uso de maquinaria agrícola y diésel en el manejo del suelo, la poda y la recolección, en comparación con el resto de sistemas (Tablas 15 a 20). Las bajas cargas mostradas por los sistemas sin fertilización, agua y energía consumida (TCR) en la mayoría de las categorías y, también, sin pesticidas (TOR) (Tabla 23), fueron causadas por la ausencia de estos insumos (Tablas 15 a 20).

La productividad en los sistemas con riego fue mayor que en los sistemas de secano. Sin embargo, los sistemas con riego consumieron agua y electricidad y una elevada cantidad de fertilizantes en la mayoría de las fases con respecto a los sistemas de secano (Tablas 15 a 20). Así, los sistemas con riego presentaron menores impactos por t y mayores impactos por ha, en comparación con los de secano; hasta un 35% menos en TCIF que en TCRF para las categorías HC y AA y hasta un 32% menos en TOIF que en TORF para CC y AA (Tabla 22) y hasta un 50% más en TCIF que en TCRF y un 43% más en TOIF que en TORF para la categoría EC (Tabla 23).

En los sistemas de cultivos convencionales tradicionales (TCIF, TCRF y TCR), las cargas más elevadas para todas las categorías se obtuvieron en TCIF por ha (hasta el 63 % en HC, el 70% en AA, el 62% en EU, el 73% en EC, más que en el sistema TCR) (Tabla 23) debido a una alta cantidad de insumos (fertilizantes y maquinaria agrícola), agua y electricidad.

En los sistemas ecológicos (TOIF, TORF y TOR), TOR mostró los impactos más bajos para todas las categorías y para ambas unidades funcionales, excepto para la EU en kg P eq t⁻¹ (Tablas 22 y 23), hasta un 21% y un 64% menos en el sistema TOR para la categoría EC.

En los sistemas tradicionales (ecológico y convencional), los sistemas ecológicos obtuvieron también menores impactos ambientales por ha. Los sistemas tradicionales de secano sin fertilización (TOR y TCR) presentaron valores similares en todas las categorías de impacto con menores impactos en el sistema ecológico (TOR), debido principalmente a la ausencia total del uso de pesticidas. La gran similitud entre estos dos sistemas es debida al poco uso de insumos químicos en el sistema convencional de secano, lo que facilita su conversión al sistema ecológico.

Tabla 23. Comparación del impacto ambiental por hectárea de las principales categorías de impacto en nueve sistemas de producción de aceituna en Túnez durante un periodo de referencia de 50 años (valores caracterizados y normalizados). HC = Huella de carbono, AA = Acidificación, EU = Eutrofización, EC = Ecotoxicidad

Impactos por ha UF	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
<i>Caracterización</i>									
HC (kg CO ₂ eq)	3,30E+04	2,24E+04	1,23E+04	2,30E+04	1,95E+04	1,22E+04	1,17E+05	1,29E+05	1,57E+05
AA (molc H ⁺ eq)	3,46E+02	2,38E+02	1,03E+02	2,32E+02	1,97E+02	1,03E+02	1,45E+03	1,61E+03	1,97E+03
EU (kg P eq)	7,13E+00	4,55E+00	2,68E+00	5,09E+00	3,98E+00	2,63E+00	2,54E+01	3,14E+01	3,82E+01
EC (CTUe)	2,76E+05	1,38E+05	7,40E+04	2,06E+05	1,18E+05	7,27E+04	1,10E+06	1,34E+06	1,57E+06
<i>Normalización</i>									
HC	3,63	2,47	1,35	2,53	2,15	1,35	12,82	14,14	17,23
AA	7,30	5,02	2,18	4,89	4,15	2,16	30,57	33,93	41,62
EU	4,82	3,07	1,81	3,44	2,69	1,78	17,20	21,25	25,80
EC	31,46	15,74	8,43	23,53	13,47	8,29	125,12	153,12	179,3

7.3. Discusión de los resultados

En este apartado se discuten los principales resultados del ACV y se comparan con los obtenidos en otros estudios del sector oleícola.

7.3.1. Impacto ambiental de los sistemas de cultivo del olivo por unidad funcional

La selección de las dos unidades funcionales (unidad de masa de producto comercial y unidad de superficie de olivar cultivado) ha permitido comparar los diferentes sistemas de cultivo de aceituna en varias fases de cultivo, con diferentes manejos de cultivo, grado de innovación y productividad. La aplicación de la metodología del ACV mostró que los impactos ambientales de los diferentes sistemas de cultivo del olivar pueden depender de la selección de la unidad funcional. Meier et al. (2015) y Espadas-Aldana et al. (2019), entre otros, indicaron que los estudios de ACV en agricultura se refieren generalmente a una unidad funcional (tonelada o hectárea). Sin embargo, el uso de ambas unidades ha mostrado beneficios para una mejor interpretación de los resultados, siendo recomendado por la comunidad del Ciclo de Vida (Tricase et al., 2018). Según Bernardi et al. (2018), la interpretación de los resultados en estudios comparativos es más adecuada utilizando la combinación de ambas UFs (masa de producción y superficie cultivada).

7.3.1.1. Sistemas intensivo y súper-intensivo

Los sistemas más innovadores (intensivo y súper-intensivo) mostraron mejores resultados por tonelada que el resto de sistemas. En particular, el sistema intensivo (ICIF2) y el sistema súper-intensivo (SICIF) presentaron menos cargas ambientales para todas las categorías y sistemas de cultivo (Tabla 22), debido a su elevada productividad. El objetivo principal de los sistemas agrícolas es la producción de alimentos (Audsley et al. 1997), por lo tanto, desde el punto de vista productivo, los sistemas de producción de aceitunas más innovadores en Túnez tuvieron un menor impacto ambiental (Tabla 22). Sin embargo, la superficie de los sistemas intensivos y súper-intensivos cultivados en Túnez ocupa sólo una pequeña parte de la superficie total (4,6%), debido principalmente a la gran inversión inicial de estos sistemas innovadores, así como a los limitados recursos para cultivar de forma óptima este cultivo (Jackson et al., 2015). El impacto ambiental en los sistemas innovadores fue más alto en comparación con el resto de sistemas por hectárea (Tabla 23), debido a un mayor nivel de mecanización del manejo del

suelo, de las operaciones de poda y recolección y de los principales insumos químicos, especialmente en el sistema SICIF (Tablas 15 a 20).

El sistema ICIF2 presentó menores impactos en todas las categorías, por tonelada y por hectárea, que el sistema SICIF (Tablas 22 y 23), debido a un menor uso de electricidad, agua e insumos químicos respecto al sistema SICIF y a productividad similar (Tablas 15 a 20). Estos resultados coinciden con De Gennaro et al. (2012), que concluyeron que, desde el punto de vista ambiental y económico, los sistemas intensivos mostraron mejores resultados que los súper-intensivos para todas las categorías de impacto por hectárea y por tonelada, durante un periodo de referencia de 48 años del cultivo del olivo. Nuestros resultados sugieren apoyar una gestión intensiva sostenible que podrían generar un menor impacto ambiental. Actualmente, la adopción de una gestión intensiva más sostenible es requerida para apoyar cualquier intensificación (Tittonell, 2014).

7.3.1.2. Sistemas tradicionales

En general, los sistemas tradicionales presentaron un menor impacto ambiental por hectárea que los sistemas intensivos (Tabla 23), debido al bajo consumo de productos químicos, consumo de energía y de agua y a las escasas operaciones de manejo del cultivo, pero su productividad (y su rentabilidad) también es mucho menor (Tablas 15 a 20). Los sistemas tradicionales de Túnez se caracterizan por tener una baja densidad (de 20 a 25 árboles por hectárea) y, por tanto, una baja productividad. En este contexto, la optimización de la productividad de los sistemas olivareros tradicionales tunecinos (que representan el 95,4% de la superficie olivarera) debería ser una prioridad. De hecho, este objetivo a largo plazo mejoraría el rendimiento de la aceituna y la competitividad del sector oleícola tunecino en comparación con otras zonas oleícolas del mundo. Según Larbi et al. (2017), la baja productividad que caracteriza a los sistemas olivareros tradicionales tunecinos parece ser probablemente la causa del cuarto rango que ocupa Túnez en términos de producción de aceite de oliva a nivel mundial (COI, 2020). Actualmente, el gobierno tunecino está diseñando estrategias para aumentar la densidad de plantación en los sistemas tradicionales (Jackson et al., 2015) y aumentar su productividad.

7.3.1.3. Sistemas ecológicos

Los sistemas de cultivo ecológico mostraron menores impactos ambientales con respecto a los sistemas tradicionales y convencionales en todas las categorías analizadas para ambas unidades funcionales (Tablas 22 y 23), debido a las menores cantidades de fertilizantes y a la no utilización de pesticidas. Pero, en general, la productividad en los sistemas ecológicos también fue menor en comparación con los sistemas convencionales (Tablas 17 a 20). Resultados similares fueron obtenidos por Notarnicola et al. (2014) y Romero-Gómez et al. (2017), que concluyen que el olivar ecológico debería mejorar su productividad para ser más sostenible. Fernández-Hernández et al. (2014) proponen aumentar la productividad y el contenido de aceite en aceitunas ecológicas, optimizando el uso del compost. Mohamad et al. (2014), concluyen que una buena opción para aumentar los rendimientos y reducir el impacto ambiental en el olivar ecológico, podría ser una fertilización orgánica utilizando la combinación de fertilizantes foliares biológicos y estiércol.

7.3.1.4. Sistemas convencionales y tradicionales

En general, los sistemas convencionales y tradicionales presentaron los impactos más elevados para todas las categorías de impacto en ambas unidades funcionales (Tablas 22 y 23) en comparación con los sistemas ecológicos, debido principalmente al uso de fertilizantes y pesticidas químicos y a un mayor número de operaciones para el manejo del suelo. Mohamad et al. (2014), Guarino et al. (2019) y otros estudios de ACV que comparan el manejo ecológico y convencional en el cultivo del olivar en diferentes países, obtuvieron resultados similares. Romero-Gómez et al. (2017) concluyen que el manejo integrado y tradicional es el mejor sistema de producción de aceitunas desde una perspectiva ambiental y productiva, en comparación con el manejo ecológico y convencional. Esto se debe a una alta productividad, menor nivel de mecanización de las operaciones de poda, recolección y manejo del suelo en comparación con el resto de sistemas. De Luca et al. (2018b) concluyeron que, reduciendo el uso de productos químicos y maquinaria agrícola en los sistemas de agricultura convencional y ecológica, se produce un menor impacto ambiental por hectárea y durante un periodo de referencia de 50 años.

Por otra parte, la producción integrada consiste en la aplicación de técnicas agrícolas más racionales, rentables, sostenibles y para obtener productos saludables (Hinojosa-Rodríguez et al., 2013). Parra-López et al. (2006) demostraron que la calidad de los productos oleícolas

obtenidos con el manejo integrado era superior a la obtenida con la producción convencional. Por tanto, la producción olivarera integrada, que no ha sido específicamente analizada en este trabajo, podría ser una alternativa a estudiar para los sistemas tradicionales y altamente intensivos, y reducir los problemas derivados del uso de productos químicos en el manejo convencional en Túnez. Una guía de buenas prácticas debería ser una prioridad para los agricultores tunecinos.

7.3.1.5. Sistemas de regadío

Los sistemas en regadío generaron impactos elevados en todas las categorías por hectárea (Tabla 23), debido al uso de agua y al consumo de electricidad. Por otro lado, la productividad de estos sistemas fue mayor que la de los sistemas de secano y, por tanto, los impactos en todas las categorías fueron menores por tonelada (Tabla 22).

En los sistemas intensivo y súper-intensivo, el agua y la energía consumida, así como la elevada cantidad de fertilizantes aplicados por fertirriego fueron superiores a la del resto de sistemas y su productividad también fue la más alta (Tablas 15 a 20). Por tanto, desde un punto de vista productivo, los sistemas en regadío presentaron los mejores resultados, coincidiendo con los resultados de Romero-Gámez et al. (2017).

7.3.2. Impacto ambiental de las prácticas agrícolas de los sistemas de cultivo

Los estudios de Mohamad et al. (2014), De Luca et al. (2018b), Guarino et al. (2019), entre otros, han mencionado que el proceso de producción de aceitunas fue el proceso responsable de la mayoría de los impactos ambientales en la cadena de producción de aceite de oliva, especialmente, por la aplicación de fertilizantes y el manejo del suelo, lo que coincide con nuestro estudio.

7.3.2.1. Fertilizantes

Entre todas las prácticas agrícolas en las diferentes fases de producción de los sistemas de olivar con fertilización, los fertilizantes mostraron altas contribuciones en la mayoría de las categorías. En la fase de plena producción, la acidificación (AA) y la ecotoxicidad (EC) fueron las categorías con las mayores contribuciones (Figuras 24 a 32), especialmente en los sistemas intensivos y súper-intensivo (Figuras 24, 25 y 26), causadas por las altas dosis de fertilizantes

y las emisiones al aire de los fertilizantes nitrogenados, así como el consumo de electricidad por el sistema de fertirriego (Tablas 15 a 20). Estos impactos en las categorías AA y EC se debieron principalmente a las emisiones de NH₃ al aire y de Cu al agua, respectivamente (Tabla 21), con valores de hasta un 89% de amoníaco y un 65% de cobre, en el sistema ICIF2. Resultados similares se encuentran en Salomone y Ioppolo (2012), Mohamad et al. (2014), Romero-Gómez et al. (2017), De Luca et al. (2018b), entre otros, donde las categorías AA y EC presentaron altos impactos debido a la fertilización de los cultivos y/o a la energía consumida para el riego o fertirriego.

La huella de carbono (HC) y la eutrofización (EU) también fueron categorías con altos impactos en los sistemas ICIF y SICIF producidos por la práctica agrícola fertilizantes, principalmente causados por las emisiones de N₂O y CO₂ al aire y las emisiones de fosfatos al agua, respectivamente (Tabla 21). Por tanto, los sistemas innovadores en Túnez podrían ser diseñados para mitigar los impactos ambientales causados por el sistema de fertirriego mediante la optimización del uso de fertilizantes y la reducción del consumo de electricidad, por ejemplo, utilizando energías renovables (Torrellas et al., 2012).

7.3.2.2. Manejo del suelo

El equipo y la maquinaria agrícola necesarios para el control de las malas hierbas fueron los principales responsables de la alta contribución al impacto ambiental por el manejo del suelo en los sistemas tradicionales y en las categorías HC (74% de emisiones de CO₂ al aire) y EU (83% de emisiones de fosfatos al agua) (Figuras 27 y 32). En varios estudios de ACV sobre sistemas de cultivo de olivar, el control de las malas hierbas fue el principal contribuyente a los impactos ambientales, especialmente a las emisiones de CO₂ (Salomone e Ioppolo (2012); Iraldo et al. (2014); El Hanandeh y Gharaibeh (2016); De Luca et al. (2018b), entre otros). Reducir el nivel de mecanización en las operaciones de eliminación de las malas hierbas podría ser una solución para mitigar los impactos ambientales de los sistemas tradicionales. De Luca et al. (2018b) sugirieron analizar en futuras investigaciones el impacto del uso de herbicidas alternativos y otras técnicas de control mecánico de las malas hierbas en estos sistemas.

7.3.2.3. Recolección

La recolección mostró altas contribuciones en las categorías EU y EC en la mayoría de los sistemas de cultivo (Figuras 24 a 32), causadas por el transporte de las mallas utilizadas para la recolección de las aceitunas y el transporte de las aceitunas desde la finca hasta la almazara, así como el uso de maquinaria para retirar los olivos al final de la fase de plena producción.

7.3.2.4. Pesticidas y poda

Los pesticidas y la poda mostraron bajos impactos ambientales, con mayores contribuciones en la categoría EU. La maquinaria agrícola y el consumo de diésel en los trabajos de poda fueron los responsables del impacto en esta categoría. En estos casos, minimizar el uso de diésel (utilizando, por ejemplo, biodiésel), podría reducir los impactos ambientales (Rinaldi et al., 2014; Romero-Gómez et al., 2017).

Capítulo 8

Análisis de la sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera en Túnez mediante un enfoque integrado de evaluación del ciclo de vida y de decisión multicriterio

Este Capítulo presenta un marco integrado del Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV) para la producción olivarera en Túnez con el fin de evaluar y mejorar el desempeño multifuncional y la sostenibilidad de los sistemas de cultivo del olivo. Para ello, se aplica el Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA) con el fin de realizar una integración de las categorías de impacto ambiental, económico y social (previamente evaluadas por ACV, CCV y ACV-Social, respectivamente), y para calcular una Puntuación de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSS) de los sistemas estudiados. Este marco integrado de ASCV permite una evaluación holística, que incluye múltiples sistemas de producción olivarera y dimensiones de sostenibilidad, categorías de impacto relevantes para las percepciones específicas del contexto y la participación de las partes interesadas en todo el proceso.

Según nuestro conocimiento, este es el primer estudio de ASCV que incluye los sistemas de cultivo de olivo más relevantes en Túnez (tradicional, ecológico e innovador), analizados desde la plantación hasta el final de la vida útil (durante un periodo de 50 años), incluyendo 9 categorías de impacto que cubren las 3 dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, económica y social), y 2 unidades funcionales (superficie cultivada y cantidad de aceitunas producida). Este trabajo aporta algunas ideas para el diseño de políticas para la mejora de la sostenibilidad de los sistemas de cultivo del olivo en Túnez, muchas de las cuales podrían utilizarse para otros países de la cuenca mediterránea.

Este estudio se centra en las regiones de Sfax y Sidi Bouzid, las mayores zonas productoras de aceite de oliva de Túnez (32%), que representan el 34% de la superficie olivarera del país (DGPA, 2019; AgriDATA, 2020).

Este Capítulo se ha estructurado en tres apartados: en el primero (Material y métodos) se presenta el marco metodológico del ASCV en dos partes (la evaluación del CV a través de las tres herramientas del CV: ACV, CCV y ACV-Social y la integración del MCDA mediante el AHP); en el segundo (Resultados) se exponen los resultados del ACV, CCV y ACV-Social así como las puntuaciones de la sostenibilidad (LCSS) correspondientes a cada sistema de

producción olivarera mediante la integración de las tres dimensiones de la sostenibilidad por el método AHP; en el tercero (Discusión) se discuten los resultados obtenidos.

8.1. Material y métodos

8.1.1. Marco metodológico

El marco metodológico integrado del ASCV desarrollado para evaluar la sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera se muestra en la Figura 33. Éste consta de dos grandes partes (evaluación del CV e integración del MCDA), que se desarrollan a continuación.

8.1.1.1. Evaluación del ciclo de vida

En primer lugar, se han calculado las categorías de impacto ambiental, económico y social de los sistemas del cultivo del olivo (Figura 33, parte de evaluación del CV). Las principales características de los nueve sistemas de producción olivarera analizados se presentan en la Tabla 24. Se trata de tres sistemas ecológicos tradicionales (dos de secano y uno de regadío), tres sistemas convencionales tradicionales (dos de secano y uno de regadío) y tres sistemas innovadores (dos intensivos y uno súper-intensivo). Se incluyeron todas las fases del CV de estos sistemas (desde la plantación hasta la eliminación de los árboles al final de su vida). En el Capítulo anterior, se presenta información detallada sobre estas fases y las prácticas agrícolas asociadas.

El proceso de selección de las categorías de impacto se llevó a cabo en dos fases. La primera fase consistió en una amplia revisión de los temas críticos relacionados con el desarrollo y la sostenibilidad del sector del olivar y aceite de oliva, tal y como se señala en el Plan de Desarrollo Agrícola de Túnez (2016/2020) (MAT, 2016) y otros informes relacionados (FAO, 2017). En la segunda etapa, se realizó una consulta preliminar a los investigadores del sector oleícola para delimitar los temas clave relacionados con la evaluación comparativa de la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera en Túnez. Dentro de cada dimensión, se seleccionaron tres categorías de impacto para armonizar la integración de las diferentes herramientas del ciclo de vida.

Se analizaron nueve categorías de impacto que cubren las tres dimensiones de la sostenibilidad: ambiental, económica y social. Estas categorías de impacto son: i) Categorías de impacto

ambiental: Huella de Carbono (HC), Uso de la Tierra (LU) y Agotamiento de los Recursos Hídricos (WD), ii) Categorías de impacto económico: Valor Actual Neto (NPV), Tasa Interna de Retorno (IRR) y Costes del Ciclo de Vida (CLC), iii) Categorías de impacto social: Toxicidad Humana (HT), Creación de Empleo (JC) y Tradiciones Agronómicas (AT). Otros temas deberían considerarse en un contexto más amplio, como la justicia y la equidad salarial, pero aquí nos centramos en los impactos derivados del proceso de producción de aceitunas y directamente implicados en la evaluación comparativa de la sostenibilidad.

Las fuentes de datos para el análisis de cada dimensión de la sostenibilidad se resumen en la Tabla 25. La mayoría de los datos sobre la productividad, los insumos y los costes, el empleo, la eficiencia de la mano de obra y las prácticas agrícolas se recopilaron a partir de la revisión de la literatura, el mercado regional y las entrevistas detalladas cara a cara con los agricultores (250 cuestionarios) en las zonas productoras de aceitunas más importantes (Sfax y Sidi Bouzid). En cada dimensión de la sostenibilidad, las categorías de impacto se estimaron dentro de un marco específico de ciclo de vida (ACV, CCV y ACV-Social) y los resultados se expresan con respecto a dos UF: 1 tonelada de aceitunas y 1 ha de superficie cultivada de olivos. Esto se desarrolla a continuación.

Figura 33. Marco metodológico para la evaluación de la sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera en Túnez

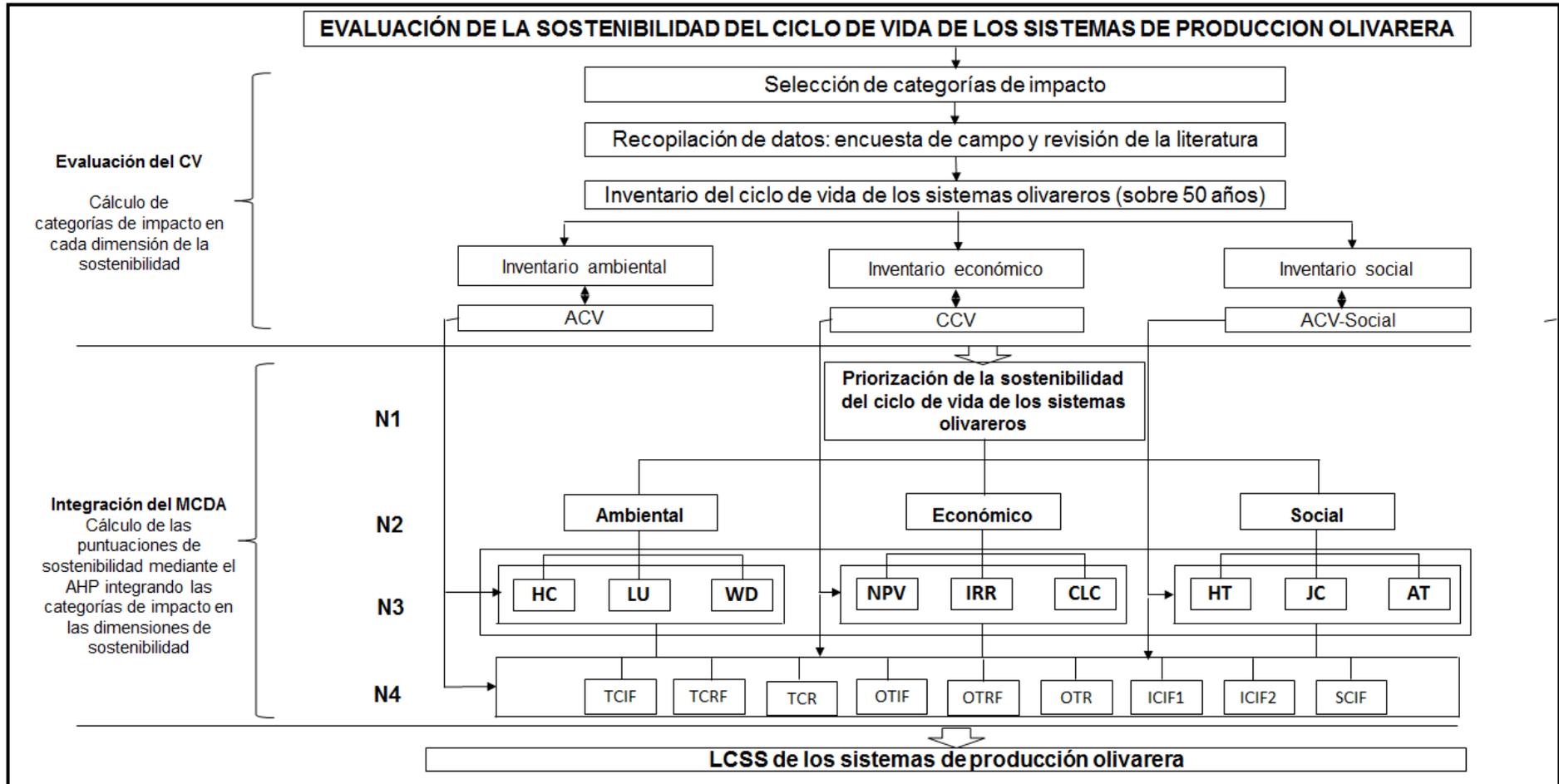


Tabla 24. Principales características de los sistemas de producción olivarera

Sistema de producción	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Método de cultivo	Tradicional	Tradicional	Tradicional	Tradicional	Tradicional	Tradicional	Intensivo	Intensivo	Súper-intensivo
Ecológico/Convencional	Convencional	Convencional	Convencional	Ecológico	Ecológico	Ecológico	Convencional	Convencional	Convencional
Cultivar principal	Chemlali	Chemlali	Chemlali	Chemlali	Chemlali	Chemlali	Chemlali	Arbosana	Arbequina
Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)	17-34	17-34	17-34	17-34	17-34	17-34	204-278	416-555	1,250-1,666
Riego/Seco	Riego	Seco	Seco	Riego	Seco	Seco	Riego	Riego	Riego
Fertilización/Sin fertilización	Fertilización	Fertilización	Sin fertilización	Fertilización	Fertilización	Sin fertilización	Fertilización	Fertilización	Fertilización
Control de malas hierbas	Mecanizado	Mecanizado	Mecanizado	Mecanizado	Mecanizado	Mecanizado	Mecanizado	Químico	Químico
Recolección	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Mecanizado
Pesticidas	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Mecanizado
Control fitosanitario	Químico	Químico	Químico	Sin control	Sin control	Sin control	Químico	Químico	Químico
Vida económica (años)	50	50	50	50	50	50	50	25	16
Fase joven (años)	4	4	4	4	4	4	2	2	2
Fase de crecimiento (años)	3	3	3	3	3	3	4	6	3
Fase de aumento de producción 1 (años)	4	9	9	4	9	9	5	–	–
Fase de aumento de producción 2 (años)	5	3	3	5	3	3	–	–	–
Fase de plena producción (años)	34	31	31	34	31	31	39	17	11
Numero de ciclos productivos	1	1	1	1	1	1	1	2	3
Productividad (media anual sobre 50 años)	1,666	683	479	1,267	639	479	6,292	8,380	8,498

Tabla 25. Fuentes de datos para el inventario del ciclo de vida

Dimensión	Parámetro	Fuentes de datos
Ambiental	Productividad	Encuesta de campo*; Larbi et al. (2017); IO (2017a)
	Equipos (maquinaria, diésel, lubricante, Duración)	Encuesta de campo*; Masmoudi-Charfi et al. (2012); IO (2017b)
	Número de operaciones	Encuesta de campo*; IO (2017b); Masmoudi-Charfi et al. (2016)
	Consumo de agua	Encuesta de campo*; Masmoudi-Charfi et al. (2012)
	Electricidad	Encuesta de campo*
	Dosis (fertilizantes, pesticidas)	Encuesta de campo*; IO (2017b); Masmoudi-Charfi et al. (2016)
	Transporte	Encuesta de campo*
	Tratamiento de residuos de poda	Encuesta de campo*
	Emisiones al aire	IPCC (2006); EEA (2013)
Económico	Precio de aceitunas	Encuesta de campo*; IO (2019); Onagri (2019)
	Precio de inputs/costes de operaciones	Encuesta de campo*; APIA (2019); Mercado local
	Subvenciones	Zribi (2017); Onagri (2019); Encuesta de campo
	Intereses y tasas de descuento	BCT (2020); Daly-Hassen et al. (2019)
	Seguros, gastos de mantenimiento	Encuesta de campo*; MAT (2017)
	Costes de reparación	Encuesta de campo*; ASABE (2015)
	Salario de los empleados	Encuesta de campo*
Social	Número de empleados	Encuesta de campo*; MAT (2017)
	Eficiencia laboral	Encuesta de campo*; Karray et al. (2000); Masmoudi-Charfi et al. (2016)
	Duración de las operaciones	Encuesta de campo*; IO (2017a, b)

* Encuesta cara a cara a agricultores y expertos

8.1.1.1.1. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

Se aplicó el ACV (ISO 14040, 2006) para evaluar la sostenibilidad ambiental de los nueve sistemas olivareros. En este estudio, la producción olivarera fue el límite del sistema "desde la cuna hasta la puerta de la finca", considerando todas las fases del crecimiento del olivo, desde la plantación hasta la eliminación de los árboles al final de su vida útil, durante un periodo de 50 años. Los procesos y flujos incluidos en las fases de cultivo se estructuraron en las siguientes prácticas agrícolas de campo: recolección, poda, pesticidas, fertilizantes y manejo del suelo. Para cada fase de cultivo en cada sistema olivarero, los principales datos cuantitativos se resumen en el Capítulo 7. La Tabla 26 muestra las cantidades medias de los principales insumos a lo largo de todo el ciclo de vida del cultivo.

La base de datos Ecoinvent v.3.6 (Ecoinvent, 2019) fue la fuente de datos para la maquinaria agrícola y el diésel, el mix de producción de electricidad, los materiales auxiliares para la recolección y el transporte, los fertilizantes y la fabricación de pesticidas. Para evaluar los impactos de la producción olivarera, la metodología adoptada fue el Análisis de Impacto del Ciclo de Vida (enfoque de punto medio). Se utilizó el ILCD 2011 Midpoint+ v. 1.08/EU27 2010, con igual ponderación (Comisión Europea, 2012) para clasificar, caracterizar y normalizar las entradas y salidas del inventario. El procedimiento de cálculo se realizó con el software simaPro (v.9.1.0.11, Pré Consultants, 2021).

Se seleccionaron tres categorías de impacto ambiental: Huella de Carbono (HC), Agotamiento de los Recursos Hídricos (WD) y Uso de la Tierra (LU). La Huella de Carbono (Kg CO₂ eq) mide el impacto sobre el calentamiento global en un horizonte temporal de 100 años. El Agotamiento de los Recursos Hídricos (escasez de agua dulce, m³ eq de agua) está relacionado con la cantidad de agua utilizada ajustada a la escasez. El Uso de la Tierra (Kg C/m²/a) se estima en función de la variación de la materia orgánica en el suelo. Estas categorías de impacto se eligieron siguiendo el sistema internacional de Declaración Ambiental de Producto (EPD) (Environdec, 2020), en particular las Normas de Categoría de Producto (PCR) para el aceite de oliva y por su importancia en el contexto tunecino. El agotamiento de los recursos hídricos es un problema crítico en Túnez debido a la creciente escasez de agua y a la elevada explotación de los recursos hídricos, lo que aumenta el coste de las inversiones adicionales (OCDE, 2014).

Tabla 26. Cantidades medias de los principales inputs durante el ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera

Practica/fase	Parámetro	Unidad	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Fase de plantación Fertilización	N	Kg ha ⁻¹	22	13	13	22	13	13	88	351	438
	P ₂ O ₅	Kg ha ⁻¹	7	4	4	7	4	4	56	201	229
	K ₂ O	Kg ha ⁻¹	8	5	5	8	5	5	64	231	264
Consumo de la maquinaria	Diésel	l ha ⁻¹	51	50	50	51	50	50	137	384	390
	Aceite lubricante	l ha ⁻¹	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	2,0	3,5	3,6
Media anual sobre 50 años											
Fertilización	N	Kg ha ⁻¹	15	11	0	10	7	0	109	112	145
	P ₂ O ₅	Kg ha ⁻¹	5	3	0	2	2	0	34	54	67
	K ₂ O	Kg ha ⁻¹	6	4	0	3	3	0	42	69	94
Control de pesticidas	Dimetoato	Kg ha ⁻¹	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0,38	0,52	0,75
	Delta-metrina	Kg ha ⁻¹	0	0	0	0	0	0	0,03	0,03	0,03
	Glifosato	Kg ha ⁻¹	0	0	0	0	0	0	0	3,50	6,00
	Cobre	Kg ha ⁻¹	0	0	0	0	0	0	0	0	1,09
Riego	Agua	m ³ ha ⁻¹	497	0	0	453	0	0	2,099	2,981	3,263
	Electricidad	KWh ha ⁻¹	186	0	0	155	0	0	696	1,114	1,219
Consumo de la maquinaria	Diésel	l ha ⁻¹	33	28	21	29	26	21	53	51	134
	Aceite lubricante	l ha ⁻¹	0,48	0,39	0,28	0,41	0,36	0,28	0,90	0,90	2,00

8.1.1.1.2. Cálculo de los Costes del Ciclo de Vida (CCV)

El impacto económico de los sistemas de cultivo del olivo se evaluó utilizando el CCV (Ciroth et al., 2016). Esta metodología se basa en el análisis del flujo de caja (ISO, 2008) descontando los costes y beneficios futuros en un año de referencia específico a lo largo del ciclo de vida de un proyecto, producto o medida (Kubba, 2017).

Los flujos económicos se estructuraron a lo largo del ciclo de vida de la producción olivarera dentro de un modelo input-output para analizar el resultado económico de los sistemas olivareros. La Tabla 27 muestra los principales costes medios de cada sistema de producción oleícola a lo largo del periodo de referencia (50 años). Todos los datos sobre los precios medios de los insumos (diésel y aceite lubricante, fertilizantes, pesticidas, riego), la maquinaria agrícola y los precios de la aceituna, fueron recopilados directamente de los agricultores, del mercado local y de las bases de datos de precios de la aceituna (IO, 2019; Onagri, 2019) en la campaña 2018/2019 (Tabla 25). La información sobre las ayudas gubernamentales y las subvenciones públicas se recogió de los agricultores y de la ley de inversiones agrícolas en Túnez, especialmente las asignadas al sector olivarero (Zribi, 2017).

Siguiendo la metodología del CCV, el primer paso consiste en establecer los costes de plantación (inversión inicial) y los flujos de costes e ingresos a lo largo de todo el periodo de referencia para cada sistema de producción de aceitunas. Los costes incluyeron tanto los costes variables como los fijos, como los costes de la maquinaria (combustible y aceite lubricante, costes de reparación y mantenimiento, depreciaciones, impuestos, intereses, alquileres, seguros), los precios de la cantidad aplicada de fertilizantes y pesticidas, las certificaciones, los costes de riego, los salarios de los trabajadores ocasionales y permanentes, los intereses sobre el capital invertido, el coste de oportunidad de la tierra y los costes de eliminación al final de la vida útil. De acuerdo con el salario local vigente, el empleo de mano de obra familiar se homologó al de mano de obra eventual en términos de coste de oportunidad. Se excluyeron los ajustes por inflación, ya que se asumieron precios constantes durante el ciclo de vida (Hussain et al., 2005; De Luca et al., 2018b). Los ingresos se estiman multiplicando el precio unitario medio de las aceitunas por la cantidad producida. Todos los flujos (costes e ingresos) se descontaron para el ciclo de vida (50 años). En Túnez, se recomienda una tasa de descuento del 8% cuando se considera el capital natural y el cambio climático (Daly-Hassen et al., 2019), ya que la disponibilidad futura de algunos recursos podría ser limitada (Stern, 2006; TEEB, 2010).

Se evaluaron tres categorías de impacto económico: Valor Actual Neto (NPV), Tasa Interna de Retorno (IRR) y Costes del Ciclo de Vida (CLC). Los costes de implantación y producción son factores clave para la realización y la viabilidad del proyecto de olivicultura en Túnez. De hecho, la amplia presencia de los sistemas tradicionales de cultivo del olivo en Túnez se debe tanto a los menores costes de implementación como de producción en comparación con los sistemas más innovadores (Jackson et al., 2015). Para ello, se seleccionó el CLC como categoría de impacto relevante. El NPV es el valor actual de los flujos de beneficios netos de los escenarios estudiados. La IRR se define como la tasa de descuento que hace que el NPV del proyecto sea igual a cero. Estas categorías de impacto económico se recomiendan encarecidamente en los estudios de CCV porque permiten comparar de forma inteligible las alternativas a partir de un mismo criterio económico o dinero de referencia (Kubba, 2017).

Tabla 27. Principales costes medios durante el ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera

	Parámetro	Unidad*	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Fase de plantación											
Plantas	Plantas	TND ha ⁻¹	138	138	138	138	138	138	1.326	2.916	8.748
Fertilización	Fertilizantes	TND ha ⁻¹	50	30	30	50	30	30	356	1.300	1.500
Soporte	Equipos	TND ha ⁻¹	25	25	25	25	25	25	240	486	1.458
Costes de maquinaria	Diésel	TND ha ⁻¹	0	0	0	27	25	25	47	96	105
	Aceite lubricante	TND ha ⁻¹	0	0	0	2,5	2,3	2,3	3,0	6,0	6,5
	Alquiler	TND ha ⁻¹	303	297	297	215	215	215	455	540	540
Empleo	Mano de obra	TND ha ⁻¹	73	28	28	85	41	41	323	492	651
Media anual sobre 50 años											
Fertilización	Fertilizantes	TND ha ⁻¹	34	25	0	21	17	0	393	923	1.290
Pest control**	Pesticidas	TND ha ⁻¹	0	0	0	0	0	0	112	278	487
Riego	Irrigación	TND ha ⁻¹	50	0	0	45	0	0	209	272	326
maquinaria /Equipos	Diésel	TND ha ⁻¹	0	0	0	37	34	28	56	58	176
	Aceite lubricante	TND ha ⁻¹	0	0	0	2,7	2,6	2,0	4,4	4,5	14,0
	Alquiler	TND ha ⁻¹	177	127	94	44	25	20	270	36	64
	Reparaciones	TND ha ⁻¹	25	0	0	41	28	23	84	99	282
Empleo	Permanente	TND ha ⁻¹	0	0	0	70	57	38	570	641	822
	Casual	TND ha ⁻¹	510	264	197	392	246	197	1393	1709	376

*TND: Dinar tunecino, ** La protección fitosanitaria es pagada por el Ministerio de Agricultura tunecino (protección de los cultivos) en los sistemas convencionales tradicionales (TCIF, TCRF y TCR)

8.1.1.1.3. Análisis Social del Ciclo de Vida (ACV-Social)

Actualmente, no existe una metodología estandarizada del ciclo de vida para medir y evaluar los impactos sociales debido a la complejidad de las cuestiones sociales. A pesar del creciente interés en este campo, especialmente tras la publicación de las Directrices del UNEP/SETAC (UNEP-SETAC, 2009), se pueden encontrar en la literatura diversos enfoques y métodos específicos para cada contexto, pero no existe un marco comúnmente aceptado ni un consenso sobre qué categorías de impacto deben incluirse o cómo cuantificar algunas de ellas (Huertas-Valdivia et al., 2020).

Para realizar un ACV-Social simplificado, se siguieron los pasos estándar del ACV ambiental (ISO 14040) (Arcese et al., 2013). Las categorías de impacto social se eligieron de acuerdo con las directrices del UNEP/SETAC (UNEP-SETAC, 2009) e incluyeron las siguientes partes interesadas afectadas: trabajadores (horas de trabajo), la comunidad local (patrimonio cultural y empleo local) y las personas afectadas debido al uso de productos químicos en el proceso de producción de aceitunas (salud humana). Así, se analizaron tres categorías de impacto relacionadas con la salud humana, el empleo y el patrimonio cultural agronómico (dos cuantitativas y una semicualitativa), respectivamente: Toxicidad Humana (HT), Creación de Empleo (JC) y Tradiciones Agronómicas (AT). El uso de insumos agroquímicos puede tener un impacto potencial en la salud humana (Sellare et al., 2020). Para simplificar el procedimiento de cálculo, el impacto de las prácticas olivareras en la salud humana se evaluó mediante la estimación de la Toxicidad Humana, especialmente los efectos cancerígenos (Unidad de Toxicidad Humana Comparativa "CTUh", que estima el aumento de la morbilidad en la población humana total, casos por kilogramo de producto químico emitido). Este impacto se midió con el software *simaPro v.9.1.0.11* (Pré Consultants, 2021) siguiendo la metodología de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV). Dada la falta de datos específicos del sector sobre las estadísticas reales de mortalidad/enfermedad y los riesgos causados por el uso de productos químicos en la producción de aceitunas, la "toxicidad humana" podría ser útil para estimar el impacto en la salud humana. Según Garrido (2017) y siguiendo las directrices del UNEP/SETAC, los indicadores incluidos en los estudios ACV-Social pueden ser seleccionados/utilizados dependiendo del contexto de la investigación y de la disponibilidad de datos.

La Creación de Empleo pretende evaluar una cuestión importante, relativa a la contribución potencial de los sistemas de producción olivarera a las oportunidades de empleo. El desempleo es uno de los principales problemas de inestabilidad social en Túnez (ETF, 2014). La

producción olivarera sostenible puede mejorar los medios de vida en las zonas rurales creando oportunidades de empleo para la población local. La creación de empleo podría ser beneficiosa tanto para la comunidad local como para los agricultores, ya que estos últimos pueden recibir una subvención por su contribución al desarrollo del potencial de empleo según la ley tunecina de inversiones agrícolas (Zribi, 2017). Para estimar la categoría JC, se estableció un inventario de horas de trabajo a lo largo del ciclo de vida (Tabla 28).

“Las Tradiciones Agronómicas” es un aspecto importante relacionado con el "patrimonio cultural y la identidad" en la olivicultura, especialmente en Túnez. Los recursos genéticos locales, como el cultivar "chemlali", están excluidos de las plantaciones de alta densidad, especialmente en los sistemas ICIF2 y SICIF (Tabla 24). Estos sistemas se basan en el cultivo de cultivares españoles y griegos, debido a su adaptabilidad a la gestión de alta densidad. La adaptación a largo plazo de estos cultivares a las condiciones locales (salinidad, sequía, etc.) es objeto de evaluación e investigación. Los cultivares locales contribuyen a preservar el patrimonio agronómico, paisajístico y cultural de una región. Se consideraron seis criterios para clasificar el impacto del ciclo de vida de los cultivares de olivo en el contexto tunecino: rendimiento de la aceituna y del aceite, calidad del aceite, resistencia a la sequía y a la salinidad y vida útil. Se aplicó la metodología AHP (Saaty, 1980) para asignar un valor de prioridad a cada cultivar y, por lo tanto, al sistema de producción correspondiente para la categoría AT. El AHP se explica con más detalle en el Capítulo 6 y en la siguiente sección. Siguiendo la escala de comparación numérica de Saaty (1980) (Tabla 29), se consultó a 10 expertos para realizar comparaciones por pares de los criterios seleccionados con respecto a su satisfacción del objetivo principal (desempeño agronómico) y luego de los cultivares de olivo ("chemlali", "arbosana" y "arbequina"). Se atribuyó un peso normalizado a cada cultivar con respecto al cumplimiento de los siguientes criterios de evaluación: rendimiento de aceituna y aceite, calidad del aceite, resistencia a la sequía y a la salinidad y vida útil. A continuación, se asignó una puntuación agregada al sistema olivarero correspondiente. El perfil de los expertos fue el siguiente: 5 investigadores en olivicultura y calidad del aceite de oliva (Instituto del Olivo de Túnez) y 5 productores de aceitunas y aceite de oliva.

Tabla 28. Promedio de horas de trabajo en los sistemas de producción olivarera

Práctica/Fase	Parámetro	Unidad	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Fase de plantación											
Manejo del suelo	Empleo	h ha ⁻¹	11	11	11	11	11	11	19	19	19
Fertilización	Empleo	h ha ⁻¹	8	7	7	8	7	7	22	20	25
Plantación	Empleo	h ha ⁻¹	2	2	2	2	2	2	20	52	68
Suporte	Empleo	h ha ⁻¹	2	2	2	2	2	2	20	40	60
Sistema de riego	Empleo	h ha ⁻¹	17	0	0	17	0	0	60	71	93
Media anual sobre 50 años											
Creación del empleo	Permanente	h ha ⁻¹	0	0	0	26	19	13	288	309	346
	Casual	h ha ⁻¹	200	101	73	147	89	70	527	637	140

Tabla 29. Escala de comparación en la metodología AHP (Saaty, 1980)

Intensidad	Importancia	Descripción
1	Igual	Ambos indicadores son igualmente importantes
3	Moderado	Un indicador es ligeramente más importante que otro
5	Fuerte	Un indicador es significativamente más importante que otro
7	Muy fuerte	Un indicador es mucho más importante que otro
9	Extremo	El máximo nivel posible de importancia de un indicador con respecto a otro

8.1.2. Integración mediante el análisis de decisión multicriterio

Una vez realizadas las evaluaciones ambientales (ACV), económicas (CCV) y sociales (ACV-Social), las categorías de impacto se han integrado a nivel global mediante MCDA para calcular una Puntuación de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSS) para cada sistema de cultivo de olivo (Figura 33, parte de integración del MCDA).

En particular, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) (Saaty, 1980) ha sido el método MCDA utilizado. La metodología AHP está descrita con detalle por Brunelli (2015) y en el Capítulo 6 de esta tesis. El AHP es una metodología MCDA que permite a los actores de tomar decisiones más precisas cuando intervienen múltiples criterios, incluso criterios conflictivos (Figueira et al., 2005). Se eligió el AHP por 1) su capacidad para estructurar y resolver un marco de decisión de forma sencilla y flexible, 2) su idoneidad para combinar indicadores cuantitativos y cualitativos, y 3) el hecho de que proporciona un conjunto de puntuaciones relativas sin afirmaciones absolutas, así como para evitar inconsistencias y mantener así una evaluación objetiva. En este estudio, la aplicación del AHP se basó en un enfoque participativo. Según Rey-Valette et al. (2008) y Mathé (2014), la participación de las partes interesadas es un enfoque adecuado para ayudar a realizar la evaluación en cuestiones relacionadas con el desarrollo sostenible. En virtud de su relevancia para la toma de decisiones, la ponderación y la normalización se consideran beneficiosas para los profesionales del ciclo de vida (Fernández-Tirado et al., 2021), lo que permite resolver las compensaciones entre los resultados (Pizzol et al., 2017). A continuación, se desarrolla la implementación de AHP para ASCV, desde la definición del modelo hasta el análisis de sensibilidad.

a) Definición del modelo

El modelo AHP propuesto para la integración de la anterior evaluación del CV consiste en una jerarquía de cuatro niveles (Figura 33): N1 - Objetivo: Priorización de la sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas de producción olivarera; N2 - Dimensiones de sostenibilidad: Ambiental, económica y social; N3 - Categorías de impacto; N4: Sistemas de producción olivarera.

b) Priorización de las categorías de impacto y de las dimensiones de sostenibilidad

Una vez desarrollado el modelo AHP para el ASCV, es necesario priorizar sus diferentes elementos, es decir, la importancia relativa de (i) las dimensiones de sostenibilidad (ambiental, económica y social) (N2) con respecto al objetivo (N1); (ii) las categorías de impacto (N3) con respecto a las dimensiones de sostenibilidad (N2), y (iii) los sistemas de producción olivarera

(N4) con respecto a las categorías de impacto (N3). Estas últimas prioridades de los sistemas de producción olivarera son las categorías de impacto calculadas en la anterior evaluación del CV.

Para evaluar el resto de prioridades se consultó a un grupo de 28 partes interesadas. Como la elección de las partes interesadas es crucial para tomar una mejor decisión, los expertos consultados se seleccionaron en función de su experiencia en el tema estudiado y/o en la toma de decisiones relativa. Así pues, en el proceso de toma de decisiones participaron tres tipologías principales de partes interesadas/expertos: 8 investigadores del Instituto del Olivar de Túnez, 10 productores de aceitunas y 10 responsables de la toma de decisiones de instituciones agrícolas y de desarrollo sostenible de Túnez.

El AHP propone una metodología matemática para priorizar en términos de importancia, preferencia o probabilidad un conjunto de criterios y/o alternativas en el mismo nivel de un modelo jerárquico con respecto al elemento del que dependen. Así, cada experto realizó una comparación por pares (CP) de la importancia de las dimensiones de sostenibilidad y, a continuación, de las categorías de impacto según la escala de calificación numérica de Saaty (1980) (Tabla 29), lo que da lugar a matrices de comparación individuales de juicios de los criterios y/o alternativas. Por ejemplo, se preguntó a los expertos por la importancia relativa de la dimensión ambiental en comparación con la dimensión económica en la escala de Saaty (1980). Posteriormente, se calculan las matrices medias del grupo de expertos mediante la agregación de las matrices individuales. Por último, se calcularon las prioridades agregadas de los elementos según el grupo de expertos de acuerdo con el cálculo de los vectores propios propuesto en el AHP. Se utilizó el software Expert Choice v.11 para registrar las preferencias individuales de los expertos y calcular las prioridades agregadas.

c) Cálculo de las puntuaciones de sostenibilidad del ciclo de vida (LCSS)

Para calcular LCSS de los sistemas de producción olivarera, es necesario integrar sus categorías de impacto ambiental, económico y social (calculadas en la evaluación del CV), según las prioridades de las categorías de impacto y las dimensiones de sostenibilidad (calculadas en el apartado anterior). Para ello, también se consultó a expertos para convertir el peor/mejor valor de cada categoría de impacto (a nivel de las alternativas) en prioridades mínimas/máximas según la escala numérica de Saaty (1980). A continuación, se calcularon las prioridades locales de los sistemas de producción olivarera (puntuaciones) y se normalizaron mediante una función de normalización mín/máx según el significado positivo o negativo de la categoría de impacto

(maximizar o minimizar). Por ejemplo, la categoría de creación de empleo debe maximizarse y la de huella de carbono debe minimizarse para mejorar la sostenibilidad. Finalmente, se sintetizaron las prioridades de i) las dimensiones de sostenibilidad, ii) las categorías de impacto y iii) las puntuaciones del desempeño de los sistemas olivareros, y se determinó una LCSS para cada alternativa (sistema oleícola) mediante una suma ponderada de las prioridades obtenidas para cada alternativa a nivel de objetivo (Rodríguez Sousa et al., 2020).

d) Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad para cuantificar la solidez de los resultados obtenidos mediante variaciones en el modelo AHP, como las prioridades asignadas por los expertos a las dimensiones de sostenibilidad en el contexto tunecino, utilizando Expert Choice v.11.

8.2. Resultados

8.2.1. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

La evaluación ambiental mostró que los sistemas de alta densidad (innovadores) obtuvieron un mejor desempeño por tonelada en las categorías HC y LU, pero obtuvieron peores resultados en todas las categorías por ha con respecto a los sistemas de baja densidad (tradicionales) (Tabla 30a, b). Los sistemas innovadores consumieron elevadas cantidades de agua de riego (Tabla 26) y el modelo SICIF fue el modelo olivarero con menor agotamiento de agua (WD) por tonelada (2000 m³ menos que los sistemas intensivos) debido a su mayor productividad. El SICIF y el ICIF2 produjeron rendimientos de aceitunas similares y superiores a los del resto de sistemas (Tabla 24). Por esta razón, estos últimos sistemas obtuvieron mejores resultados y valores similares en las categorías de impacto HC y LU por tonelada (por ejemplo, hasta un 59% en HC y un 74% en LU, más bajos que el sistema TCRF).

Por otro lado, los impactos de los sistemas de alta densidad, fueron los más significativos por ha, especialmente el modelo SICIF (hasta un 92% en las categorías HC y 83% en LU, más que en el sistema TOR). Estos resultados se deben a un mayor uso de equipos y maquinaria agrícola y sus relativos insumos (diésel, aceite lubricante, etc.) en la recolección, poda y manejo del suelo, mayor aplicación de pesticidas y fertilizantes, así como un mayor consumo de agua de riego en comparación con los sistemas de baja densidad (Tabla 26). El TOR fue el mejor sistema por hectárea, con un menor impacto ambiental (Tabla 30b), debido a la ausencia de aportes de energía y agua, de pesticidas y a la muy limitada cantidad de fertilizantes aplicados (sólo en la fase de plantación) (Tabla 26). El TOIF fue el sistema de cultivo de regadío con menor

agotamiento de agua (WD) por ha (hasta un 85% menos que el sistema SICIF) debido al menor consumo de agua, en comparación con los demás sistemas de riego.

En la fase de plena producción, las prácticas agrícolas de campo con mayor contribución en las categorías de impacto HC y LU fueron el manejo del suelo y los fertilizantes. En la mayoría de las categorías de impacto, el manejo del suelo fue el principal contribuyente en los sistemas tradicionales (hasta un 67% en HC, y un 53% en LU, para los sistemas TCR y TOR). En los sistemas innovadores, los fertilizantes contribuyeron más a la mayoría de las categorías de impacto. En concreto, la categoría de impacto HC adquirió más importancia en el sistema ICIF2, con un valor máximo del 87%.

8.2.2. Cálculo de los Costes del Ciclo de Vida (CCV)

Los sistemas innovadores obtuvieron mejores resultados económicos en las categorías económicas NPV e IRR que los sistemas tradicionales por ambas UFs (Tabla 31a, b), debido a la mayor productividad y al uso más eficiente de los insumos. Los sistemas innovadores obtuvieron mejores resultados en la categoría de impacto CLC por tonelada (menores costes), pero tuvieron peores resultados por ha (mayores costes) que los sistemas tradicionales. ICIF2 fue el sistema más rentable, a pesar de tener mayores costes de mano de obra en la fase de plena producción. El SICIF fue el sistema innovador con menor rentabilidad debido a los mayores costes de plantación e insumos y al ciclo de producción más corto y de productividad similar en comparación con el sistema ICIF2 (Tabla 24).

En general, los sistemas ecológicos fueron más rentables que los sistemas tradicionales y convencionales debido a los precios más altos de las aceitunas y a una productividad similar, especialmente los sistemas de secano (Tabla 24). A pesar de sus productos de alta calidad, el sistema ecológico de secano tradicional (TOR) mostró un resultado económico bajo debido a la baja productividad, una diferencia de precio insignificante en comparación con los productos convencionales (solo 0,4 TND en 2018/2019) y la ineficacia del régimen de subvenciones (Ben Abdallah et al., 2018).

Tabla 30. Impactos ambientales de los sistemas olivareros en Túnez: a) (UF=1 t de aceitunas) y b) (UF=1 ha de superficie de cultivo del olivo)

a) per t UF		TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Huella de Carbono	kg CO ₂ eq	2,02E+04	3,07E+04	2,34E+04	1,95E+04	2,86E+04	2,32E+04	1,73E+04	1,23E+04	1,24E+04
Uso de la Tierra	kg C deficit	5,24E+04	8,71E+04	8,67E+04	5,48E+04	8,66E+04	8,62E+04	3,72E+04	2,28E+04	2,23E+04
Agotamiento de los Recursos Hídricos	m ³ water eq	2,56E+04			3,14E+04			2,61E+04	2,60E+04	2,40E+04
b) per ha UF		TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Huella de Carbono	kg CO ₂ eq	3,30E+04	2,24E+04	1,23E+04	2,30E+04	1,95E+04	1,22E+04	1,17E+05	1,29E+05	1,57E+05
Uso de la Tierra	kg C deficit	8,77E+04	6,58E+04	4,75E+04	6,91E+04	6,13E+04	4,73E+04	2,53E+05	2,39E+05	2,78E+05
Agotamiento de los Recursos Hídricos	m ³ water eq	4,13E+04			3,77E+04			1,75E+05	2,48E+05	2,61E+05

Tabla 31. Resultados económicos de los sistemas olivareros en Túnez: a) (UF=1 t de aceitunas) y b) (UF=1 ha de superficie de cultivo del olivo)

a) per t UF		TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Valor Actual Neto	TND	1.171	-545	-2,622	761	594	-1.340	5.616	6.612	4.297
Tasa Interna de Retorno	%	10	7	4	9	9	6	36	42	21
Costes del Ciclo de Vida	TND	660	859	964	820	990	1.119	631	581	633
b) per ha UF		TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Valor Actual Neto	TND	3.591	-44	-1.255	3.257	532	-216	32.751	58.779	46.321
Tasa Interna de Retorno	%	12	8	6	12	9	7	28	41	23
Costes del Ciclo de Vida	TND	54.948	29.299	23.065	52.457	31.629	26.778	198.402	243.275	268.873

TND: Dinar tunecino

Las prácticas agrícolas con mayores costes en los sistemas tradicionales fueron la recolección, el manejo del suelo y la poda. La recolección fue la práctica que más contribuyó a los costes totales de los sistemas tradicionales (hasta un 40% en TCIF) debido a los elevados costes de la mano de obra y a la ausencia de mecanización. El equipo y la maquinaria utilizados para el manejo del suelo supusieron unos costes elevados en los sistemas tradicionales, especialmente en los sistemas ecológicos (hasta un 25 % en TCIF). En los sistemas intensivos (ICIF1 e ICIF2), la cosecha y los fertilizantes fueron las prácticas agrícolas más costosas, con una media del 30% y el 23% de los costes totales, respectivamente. En el sistema súper-intensivo, la fertilización supuso unos costes elevados (30%), seguida de la recolección (16%) y los pesticidas (13%).

8.2.3. Análisis Social del Ciclo de Vida (ACV-Social)

La tabla 32 presenta los impactos sociales por ambas UFs de los sistemas de cultivo de olivo en Túnez. Los sistemas de producción olivarera más innovadores mostraron mayores impactos por ha y menores impactos por tonelada en la categoría HT que el resto de sistemas. El sistema de cultivo ecológico de secano (TOR) mostró menores impactos por ha que el resto de sistemas tradicionales en la categoría HT (Tabla 32), debido al uso de menos insumos químicos (ausencia de pesticidas), mientras que el sistema TCIF mostró menores impactos por tonelada debido a una mayor productividad. El manejo del suelo y la recolección causaron mayores impactos en los sistemas tradicionales y los fertilizantes contribuyeron más en los sistemas innovadores.

En cuanto a la contribución potencial del sector del olivar al empleo local (categoría de impacto JC), la creación de empleo por ha fue significativamente mayor en los sistemas innovadores en comparación con los demás sistemas (Tabla 32). El sistema SICIF crea menos empleo que los sistemas intensivos (ICIF1 e ICIF2) para ambas UFs, debido a la mecanización casi total de las operaciones de recolección y poda. En términos de resultados por tonelada, los sistemas ecológicos contribuyeron más al empleo que el resto de sistemas debido a la tasa de empleo relativamente alta en comparación con la menor cantidad de aceitunas producidas. En general, los sistemas ecológicos ofrecen más horas de trabajo que los sistemas tradicionales y convencionales por ambas UFs. Este resultado se atribuye al mayor número de horas de trabajo permanentes en los sistemas ecológicos debido al mayor tamaño medio de las explotaciones olivareras ecológicas en Túnez y a la diversidad de su actividad agrícola (Ben Abdallah et al., 2018). Las explotaciones olivareras convencionales tradicionales utilizan principalmente mano de obra ocasional debido a su pequeño tamaño (75% menos de 10 ha) (Jackson et al., 2015). La

categoría JC es más importante en la operación de recolección en la mayoría de los sistemas (hasta el 74% en los sistemas tradicionales y el 57% en los sistemas intensivos), excepto en el sistema súper-intensivo donde la fertilización fue la práctica agrícola de campo más importante (36%) debido a la mecanización de la operación de recolección.

La categoría AT tiene como objetivo evaluar el impacto agronómico en el contexto agroclimático tunecino de los cultivares utilizados en los sistemas de cultivo del olivo: el cultivar local ("chemlali") cultivado en los sistemas tradicionales e ICIF1 frente a los cultivares extranjeros ("arbosana" y "arbequina") en el resto de sistemas innovadores (ICIF2 y SICIF). Este indicador proxy se estimó mediante un análisis multicriterio (metodología AHP) basado en el conocimiento de los expertos, como se explica en la sección de Materiales y métodos. Según la evaluación de los expertos, el cultivar "chemlali" mostró mejores resultados (0,624) que "arbosana" (0,217) y "arbequina" (0,159). Por lo tanto, los sistemas tradicionales mostraron mayores contribuciones a la preservación de las tradiciones agronómicas que los sistemas innovadores (Tabla 32).

8.2.4. Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV)

Según las preferencias de las partes interesadas, la mayor prioridad se asignó a los aspectos ambientales (0,410), seguidos de los económicos (0,357) y los sociales (0,233), especialmente las categorías WD (0,244), IRR (0,126) y HT (0,112), respectivamente, con respecto a la sostenibilidad de la producción olivarera en Túnez (Tabla 33). La mayor preocupación atribuida a la categoría WD se debe a la escasez de agua en Túnez (Chouchane et al., 2015; Souissi et al., 2019; Soula et al., 2021). Por esta razón, se atribuyó una puntuación máxima a los sistemas tradicionales de secano (TCRF, TCR, TORF, TOR) en la categoría WD para ambas UFs.

En la Figura 34 y la Figura 35 se presentan los LCSS de los sistemas de producción olivarera en Túnez por ambas UFs. En general, los sistemas de producción más innovadores fueron los más sostenibles por tonelada, especialmente el sistema ICIF2 con la mayor puntuación de sostenibilidad (0,148). La alta productividad de los sistemas intensivos fue el principal factor para lograr mejores resultados en la mayoría de las categorías de impacto en comparación con los sistemas tradicionales por tonelada (Figura 34).

En los sistemas tradicionales, el sistema TORF fue el sistema ecológico con mayor puntuación de sostenibilidad (0,102) y el sistema TCIF fue el sistema convencional más sostenible (0,103) debido a la mayor productividad (Figura 34).

En términos de resultados por ha, los sistemas tradicionales lograron mejores resultados de sostenibilidad, especialmente los sistemas de secano y ecológico TOR y TORF con una puntuación de sostenibilidad similar (0,122) (Figura 35). En general, los sistemas ecológicos fueron más sostenibles que los sistemas convencionales tradicionales por ambas UF (Figura 34 y Figura 35).

La Figura 36 presenta los resultados del análisis de sensibilidad con respecto a la sostenibilidad del CV de los sistemas olivareros por tonelada (a, a') y por ha (b, b'). La Figura 36 (a, b) muestra la clasificación de los sistemas de producción olivarera (resultados de sostenibilidad) antes de realizar los cambios por tonelada (a) y por ha (b), respectivamente. La Figura 36 (a', b') muestra el cambio en el ranking de los sistemas de producción olivarera (LCSS) tras las variaciones de las prioridades locales de las dimensiones de sostenibilidad (sensibilidad de resultados) por tonelada (a') y por ha (b'). En el caso de los resultados por tonelada (a, a'), un fuerte aumento de la prioridad de la dimensión ambiental con una fuerte disminución de las prioridades de las otras dimensiones (a'), el sistema ecológico de secano (TOR) se convierte en el sistema más sostenible por tonelada a pesar de su baja productividad. En cuanto al análisis de sensibilidad por ha UF (b, b'), un aumento de la prioridad asignada a la dimensión económica (b'), el sistema intensivo (ICIF2) es el sistema olivarero con mayor puntuación de sostenibilidad. Estos resultados indican que la sostenibilidad de los sistemas olivareros puede depender de los objetivos priorizados por los responsables de la toma de decisiones a la hora de definir las políticas, que pueden inclinarse más por alguna de las dimensiones de la sostenibilidad.

Tabla 32. Impactos sociales de los sistemas olivareros en Túnez: a) (UF=1 t de aceitunas) y b) (UF=1 ha de superficie de cultivo)

a) per t UF		TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Toxicidad Humana, efectos cancerígenos	CTUh	1,16E-03	1,86E-03	1,87E-03	1,22E-03	1,87E-03	1,86E-03	8,06E-04	5,02E-04	5,46E-04
Creación del Empleo	h	121	148	154	136	169	173	130	113	54
Tradiciones Agronómicas*		0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,217	0,159
b) per ha UF		TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Toxicidad Humana, efectos cancerígenos	CTUh	1,89E-03	1,38E-03	9,96E-04	1,49E-03	1,29E-03	9,91E-04	5,44E-03	5,23E-03	6,66E-03
Creación del Empleo	h	10.049	5.055	3.682	8.692	5.399	4.149	40.906	47.346	23.067
Tradiciones Agronómicas*		0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,217	0,159

* Peso/prioridad agregada asignada por los expertos

Tabla 33. Ponderación de las dimensiones y categorías de impacto

Dimensiones	Ambiental			Económico				Social	
Pesos de las dimensiones	0,410			0,357				0,233	
Categorías de impacto	HC	LU	WD	NPV	IRR	CLC	HT	JC	AT
Pesos locales de las categorías	0,214	0,190	0,596	0,331	0,353	0,316	0,481	0,267	0,252
Pesos globales de las categorías	0,088	0,078	0,244	0,118	0,126	0,113	0,112	0,062	0,059

Figura 34. LCSS de los sistemas de producción olivarera en Túnez por t UF

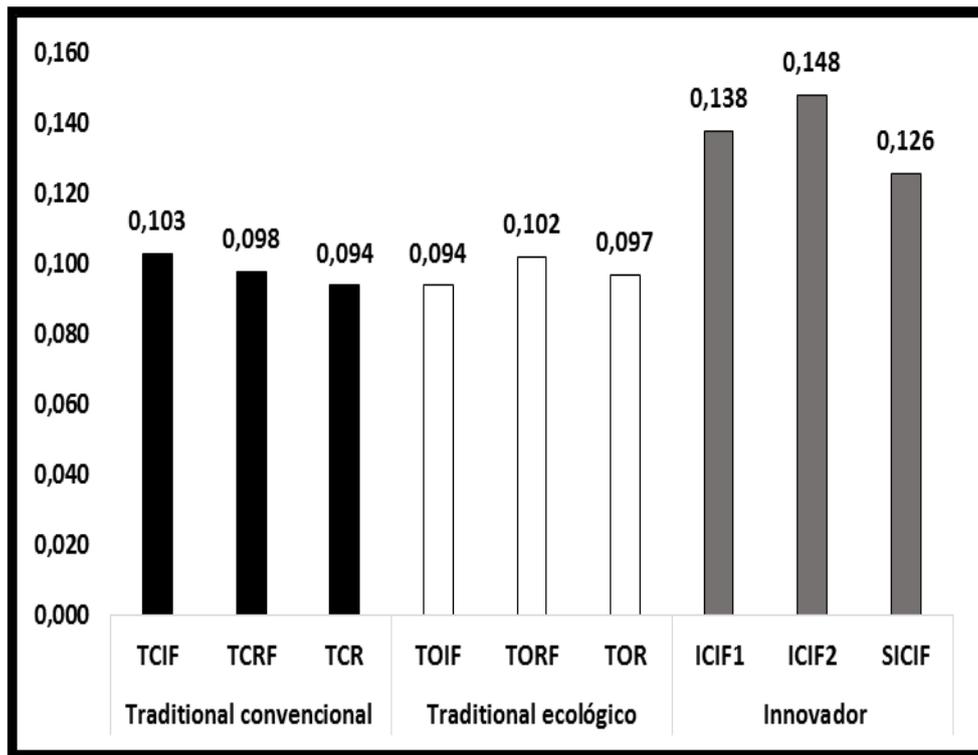


Figura 35. LCSS de los sistemas de producción olivarera en Túnez por ha UF

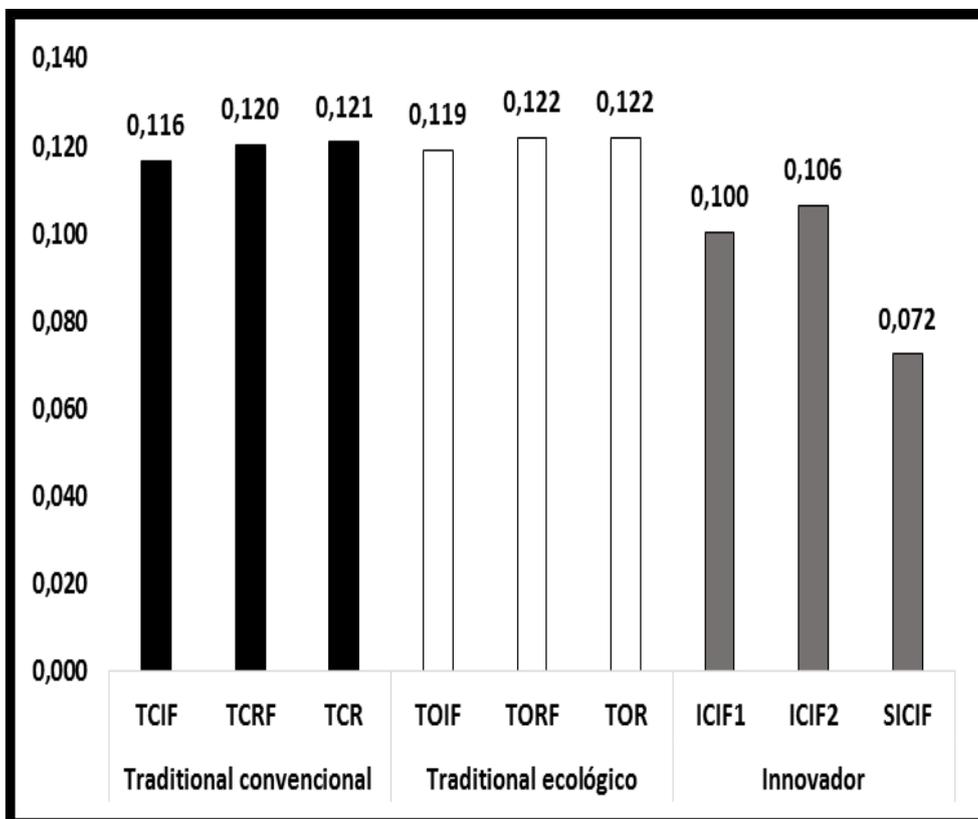
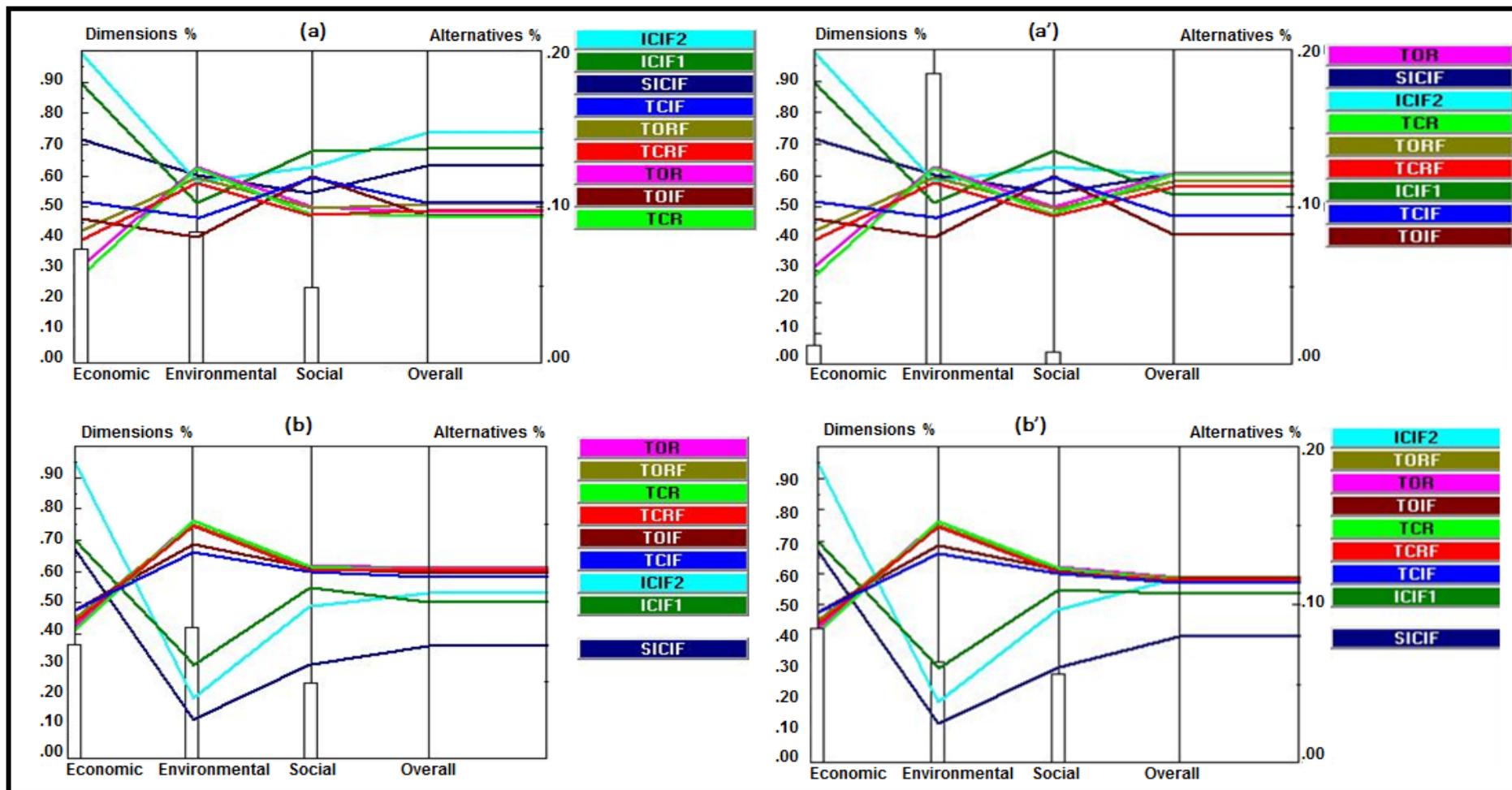


Figura 36. Análisis de sensibilidad de la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas olivareros en Túnez: (a, a'): por t UF: a) resultados iniciales; a') tras variaciones en las ponderaciones locales de las dimensiones de sostenibilidad; (b, b'): por ha UF: b) resultados iniciales; b') tras variaciones en las ponderaciones locales de las dimensiones de sostenibilidad



8.3. Discusión

El MCDA reveló que la mayor preferencia de las partes interesadas es la dimensión ambiental respecto a la sostenibilidad de la producción olivarera en Túnez. Según De Luca et al. (2018b), la evaluación ambiental también fue el aspecto más importante para evaluar algunas innovaciones de la sostenibilidad del ciclo de vida en la producción olivarera en el sur de Italia. En cuanto a las categorías de impacto, el Agotamiento de los Recursos Hídricos se consideró una cuestión relevante con la mayor prioridad dada la importancia del riego en la economía tunecina y en los países en desarrollo en general (Nechifor y Winning, 2017), así como la crítica situación de los recursos hídricos en Túnez (Soula et al., 2021). Souissi et al. (2019) sugirieron a los responsables políticos de fomentar los cultivos de secano mediante medidas especiales con el objetivo de reducir el uso del agua en Túnez.

La aplicación combinada de las metodologías de Ciclo de Vida y MCDA mostró que los impactos de los diferentes sistemas de cultivo del olivo y la LCSS de estos sistemas dependen fuertemente de las unidades funcionales consideradas. Meier et al. (2015) y Espadas-Aldana et al. (2019), entre otros, informaron de que los estudios de CV agrícola se refieren generalmente a una unidad funcional (tonelada o ha). Sin embargo, el uso de ambas UFs está fuertemente recomendado por la comunidad de CV por presentar relevantes ventajas permitiendo así una mejor interpretación de los resultados (Tricase et al., 2018). Según Bernardi et al. (2018), la interpretación de los resultados en los estudios comparativos es más adecuada utilizando la combinación de ambas UFs (masa de producción y superficie cultivada).

En el presente estudio, los sistemas más innovadores fueron más sostenibles desde el punto de vista productivo, debido al mejor rendimiento económico y ambiental en la mayoría de las categorías de impacto en comparación con los sistemas tradicionales. En general, los sistemas intensivos lograron una mejor LCSS que el sistema súper-intensivo para ambas UFs, especialmente el sistema ICIF2. El sistema ICIF2 fue económicamente más viable que el sistema súper-intensivo. Este resultado coincide con De Gennaro et al. (2012), que mostraron mejores resultados en los sistemas intensivos en comparación con los súper-intensivos, desde una perspectiva económica y de costes del ciclo de vida. Además, la contribución de la categoría JC en el sistema ICIF2 fue mayor que en el sistema SICIF para ambas UFs. Estos resultados sugieren el apoyo a las innovaciones basadas en la gestión intensiva sostenible que podría generar menores impactos ambientales, mayor rentabilidad y creación de empleo. Actualmente se acepta la adopción de una gestión intensiva más sostenible, para apoyar cualquier iniciativa de intensificación tanto por parte de los privados como por parte de los servicios públicos

(Tittonell, 2014). Los sistemas de riego provocan una elevada carga ambiental por hectárea debido al uso intensivo de agua e insumos químicos. La gestión integrada del olivo podría ser una buena opción para mitigar los impactos del uso de productos químicos en la producción convencional (Romero-Gómez et al., 2017).

Los sistemas tradicionales, especialmente los ecológicos, lograron una mejor LCSS por ha de superficie cultivada de olivo. Meier et al. (2015) revelaron que los estudios de ACV sobre diferentes productos agrícolas mostraron que los impactos por superficie cultivada son bajos en los sistemas ecológicos respecto a los impactos por unidades de masa de producción. Los sistemas tradicionales obtuvieron peores resultados económicos, especialmente en las categorías NPV e IRR para ambas UFs. Sin embargo, la productividad y la rentabilidad del olivo bajo manejo tradicional en Túnez se consideran muy bajas con respecto a la producción olivarera media en la región mediterránea, debido a la muy baja densidad de plantación, las bajas precipitaciones, la escasa mecanización y la falta organización de los agricultores a través de cooperativas (Jackson et al., 2015). Por lo tanto, la mejora del desempeño económico del olivar tradicional debe ser abordada con urgencia para sostener el sector del olivo en Túnez y hacer frente a la creciente competitividad en el mercado internacional del aceite de oliva. La afiliación de los agricultores a cooperativas podría ser una solución eficaz para mejorar la rentabilidad del olivar tradicional, preservar los beneficios socioculturales y territoriales y generar empleos de calidad mediante la profesionalización del sector (Colombo et al., 2020). Por otro lado, los sistemas tradicionales presentaron puntos fuertes como el potencial de adaptación del cultivar "chemlali" a las condiciones áridas de Túnez y la alta resistencia a la sequedad, especialmente en la región de Sfax (Dabbou et al., 2010). Según Ben Rouina et al. (2002), la producción media del cultivar "chemlali" por árbol es la más alta del mundo en los años de fuerte fructificación. Sin embargo, este gran potencial está mal aprovechado debido a las bajas densidades de plantación asociada al carácter tradicional de las técnicas de cultivo. El gobierno tunecino está diseñando un plan estratégico para mejorar el rendimiento de los sistemas tradicionales mediante el aumento de la densidad de plantación (Jackson et al., 2015). En general, los sistemas de producción olivarera ecológicos tradicionales fueron más rentables y más sostenibles que los sistemas de producción olivarera tradicionales y convencionales para ambas UFs. Mohamad et al. (2014) mostraron un mejor desempeño ambiental del sistema olivarero ecológico y una mayor rentabilidad en comparación con el convencional. Iofrida et al. (2020) mostraron mejores resultados socioeconómicos en los sistemas ecológicos en comparación con los sistemas convencionales en Italia. En Túnez, las explotaciones olivareras

convencionales tradicionales, especialmente los sistemas de secano, utilizan técnicas de cultivo de secano sin fertilizantes y sin insumos químicos, lo que supone un importante potencial que podría ser aprovechado para convertir en el futuro estas superficies al modo ecológico (Ben Abdallah et al., 2018; Fernández-Uclés et al., 2020). Nuestros resultados sugieren motivar a los productores tradicionales convencionales a involucrarse en el sector ecológico.

El análisis de sensibilidad confirmó que la principal base de la sostenibilidad de los sistemas tradicionales, especialmente los de secano, es la dimensión ambiental, mientras que la de los sistemas innovadores es la dimensión económica. Por lo tanto, las políticas orientadas a la sostenibilidad ambiental deberían sostener más a los sistemas tradicionales (mediante subvenciones, innovaciones, etc.), mientras que las orientadas a los resultados económicos (productividad) deberían privilegiar los sistemas de intensificación o intensivos. Daly-Hassen et al. (2019) mostraron peores resultados económicos en las plantaciones de olivo de secano y destacaron que la tecnología de riego es la mejor solución de adaptación para los agricultores, pero deberían abordarse más información sobre los efectos negativos relacionados con la degradación de los recursos hídricos.

En los sistemas tradicionales, el manejo del suelo y la recolección fueron las prácticas más señaladas por su relevante contribución a los costes del ciclo de vida y en la mayoría de las categorías ambientales y sociales, especialmente en las categorías CC, LU, JC y HT. La adopción de medidas de conservación del suelo mediante cultivos de cobertura y el acolchado de residuos de poda podría ser una alternativa eficaz a las técnicas convencionales para mitigar los impactos ambientales e impactos sobre la sanidad y el riesgo de erosión del suelo (Gómez et al., 2021). Bernardi et al. (2018) demostraron que la única forma de conseguir menores costes de producción en los olivares es la recolección mecánica, diferenciándose de la recolección manual o asistida. Sin embargo, la recolección mecánica reduce significativamente la intensidad de trabajo y el potencial de creación de empleo. Según Bernardi et al. (2018), los sistemas de recolección asistida podrían ser una alternativa eficaz a la recolección manual en los olivares tradicionales para reducir los costes de producción. Por otro lado, el uso de biodiesel en los procesos mecánicos y en el transporte, tanto en los sistemas tradicionales como en los innovadores, podría generar mejores resultados ambientales (Rinaldi et al., 2014; Romero-Gómez et al., 2017). En los sistemas con fertilización, especialmente en los sistemas innovadores, la operación de fertilización presentó altas cargas en las categorías de evaluación ambiental, costes de producción y HT debido al alto uso de fertilizantes minerales. Resultados similares sobre el impacto ambiental de la fertilización se pueden encontrar en estudios

anteriores (Romero-Gómez et al., 2017; De Luca et al., 2018b; entre otros). Zipori et al. (2020) informaron de que la aplicación racional de cultivos de cobertura, materia orgánica (por ejemplo, en forma de estiércol o compost), orujo de oliva, aguas residuales de la almazara y/o aguas residuales recicladas para el riego, podría servir como alternativa a la fertilización mineral con mayores mejoras en las propiedades del suelo, junto con beneficios ambientales y económicos. En los sistemas innovadores, el uso de energías renovables es beneficioso para minimizar el consumo de electricidad y optimizar la operación de fertilización (Torrellas et al., 2012), especialmente para reducir el impacto ambiental del fertirriego. En los sistemas de regadío, la aplicación de directrices de gestión del riego sostenible para los agricultores es crucial para mejorar la eficiencia del uso del agua en un país con una situación hídrica crítica como Túnez. El uso de sensores sensibles para monitorizar el estado hídrico de las plantas podría ser muy prometedor para la gestión del agua del olivo tanto en sistemas tradicionales como innovadores (Marino et al., 2016).

La mayoría de estudios de evaluación de la multifuncionalidad y la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera se llevó a cabo mediante el análisis multicriterio, en este caso basado en el conocimiento de expertos (Parra-López et al., 2008b; Carmona-Torres et al., 2014; Ben Abdallah et al., 2018). Las herramientas de CV y MCDA utilizadas por separado no permiten una evaluación completa de la sostenibilidad y un marco integrado de ASCV parece ser el método más adecuado para este fin (Campos-Guzmán et al., 2019). Campos-Guzmán et al. (2019), entre otros, destacaron la simplicidad y robustez del AHP para la evaluación sostenible y su amplia aplicación por parte de la comunidad científica.

Parte IV: Conclusiones generales

Capítulo 9. Conclusiones, limitaciones, recomendaciones y futuras líneas de investigación

Capítulo 9

Conclusiones, limitaciones, recomendaciones y futuras líneas de investigación

En este trabajo se ha realizado una evaluación integrada de la sostenibilidad de los sistemas de cultivo de olivar existentes en Túnez combinando de forma novedosa diferentes enfoques metodológicos basados en el Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDA) y el Ciclo de Vida (CV). Para ello, se han usado como fuentes de información primaria una encuesta de campo a 250 agricultores de las regiones de Sfax y Sidi Bouzid, principales regiones olivareras del país, y una entrevista a 58 expertos en olivar. La información primaria se ha complementado con una amplia revisión y uso de diferentes fuentes secundarias, como documentos técnicos y estadísticas sobre prácticas agrarias, y literatura científica para el cálculo de los impactos.

Según nuestro conocimiento, se trata del primer estudio que evalúa el impacto ambiental, económico y social del proceso de producción olivarera para todos los sistemas de cultivo de olivar más relevantes existentes en este país (9 sistemas). Se han tenido en cuenta las prácticas agrícolas implementadas (5 prácticas), desde la fase de plantación de los olivos hasta la fase final de plena producción (6 fases), durante un periodo de 50 años, y se han utilizado dos unidades funcionales de referencia para el cálculo de los impactos (tonelada de aceituna y hectárea). Si bien existen otros estudios del CV de la producción olivarera y para otros cultivos en diferentes países, ninguno incluye un espectro tan amplio de sistemas, prácticas agrícolas, fases y unidades funcionales, y que trate de abarcar todas las alternativas existentes en Túnez. En este estudio se analiza por primera vez en Túnez la sostenibilidad, incluyendo aspectos sociales, de sistemas más innovadores de producción (intensivos y súper-intensivos), tema controvertido y fundamental especialmente en este país y la región mediterránea.

Los resultados obtenidos pueden ser de utilidad para los responsables de la toma de decisiones a la hora de planificar políticas y estrategias para mejorar la sostenibilidad y competitividad de un cultivo tan importante y estratégico en Túnez como es el olivar, así como para mitigar sus posibles impactos ambientales. Además, pueden ser de utilidad para los diferentes actores del sector olivarero.

En los siguientes apartados se exponen las principales conclusiones obtenidas de todo el trabajo realizado, distinguiendo entre relativas a los resultados y relativas a las metodologías usadas. Posteriormente, se proponen una serie de recomendaciones y estrategias para la mejora de la

sostenibilidad del olivar tunecino en base a los resultados obtenidos. Y finalmente, se indican las principales limitaciones del trabajo, así como posibles líneas de investigación futuras.

9.1. Conclusiones

9.1.1. Conclusiones relativas a los resultados

9.1.1.1. Sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional en Túnez mediante la metodología AHP

- El análisis de sostenibilidad mediante la metodología MCDA, en concreto a través de AHP, ha puesto de manifiesto una mayor sostenibilidad global, y a nivel de las tres dimensiones de la sostenibilidad (económica, ambiental y social) del sistema de producción olivarera ecológico. Esta mayor sostenibilidad del sistema ecológico puede considerarse una razón para fomentar el apoyo institucional a su difusión en Túnez.
- A nivel de sub-criterios de sostenibilidad, el olivar ecológico es también la mejor alternativa excepto en dos: ingresos económicos (sub-criterio económico) y compatibilidad con los valores socioculturales locales (sub-criterio social). En todos los sub-criterios ambientales el olivar ecológico ha demostrado su superioridad.
- La mayor sostenibilidad ambiental del olivar ecológico se fundamenta en una serie de ventajas con respecto al convencional:
 - o El olivar ecológico contribuye al mantenimiento de la fertilidad orgánica del suelo, como lo confirma el mejor desempeño obtenido en el sub-criterio ambiental ‘Fertilidad del suelo’. Hoy en día está ampliamente reconocido que la agricultura ecológica conlleva a una mayor acumulación de materia orgánica en el suelo comparada con los sistemas convencionales. Además, las prácticas ecológicas de manejo del suelo son más racionales que aquellas con tratamientos químicos y permiten un mejor control de problemas graves del suelo como la erosión a través del mantenimiento de una cubierta vegetal. Así, la agricultura ecológica contribuye también a una menor contaminación de los recursos hídricos al detener la escorrentía contaminada. En la región de Sfax, la mayoría de los olivareros ecológicos tienden a enmendar el suelo utilizando compost/estiércol, lo que ayuda a conservar el agua.

- El olivar ecológico fomenta la biodiversidad como lo demuestra el mejor desempeño en el sub-criterio ambiental “biodiversidad”. Esto se evidencia por la mayor presencia de cultivos intercalares en el sistema ecológico en la región de Sfax.
- A nivel económico, el sistema de producción olivarera ecológico ha demostrado también ventajas con respecto al sistema convencional: mayor estabilidad de la renta a medio y largo plazo, mayor autonomía financiera, mejor acceso a las subvenciones y mejor accesibilidad al mercado a través del circuito corto de comercialización. No obstante, presenta un menor ingreso en comparación con el convencional, debido a los bajos rendimientos, cuestión de vital importancia en la situación económica actual.
- Es fundamental tener en cuenta que no se puede asegurar la sostenibilidad global sin la sostenibilidad económica de los ingresos de los agricultores de este sistema de producción. Además, los sistemas ecológicos presentan unos costes de producción más elevados debido a sus menores rendimientos. Por lo tanto, el apoyo institucional para fomentar la integración de los agricultores en cooperativas para ahorrar costes y la difusión de buenas prácticas agrarias (p.ej. mayor aplicación de fertilizantes orgánicos, cubiertas vegetales, mayor densidad de plantación, etc.) para mejorar la productividad e ingresos del sistema ecológico debería ser una prioridad.

9.1.1.2. Evaluación ambiental de los sistemas de producción olivarera en Túnez mediante el ACV

- Desde el punto de vista productivo, es decir, usando como unidad funcional la producción de aceitunas, los sistemas de producción olivarera más innovadores (intensivo y súper-intensivo), mostraron menores impactos ambientales para todas las categorías de impacto en comparación con el resto de sistemas, principalmente el sistema ICIF2 (sistema intensivo con riego y fertilización con alta densidad de plantación) y el sistema súper-intensivo. Sin embargo, la superficie cultivada de estos sistemas ocupa actualmente sólo una pequeña parte de la superficie total del país. Estos resultados respaldan la necesidad de promover innovaciones tecnológicas en el sector olivarero tunecino, utilizando un manejo más intensivo.
- Por el contrario, los sistemas tradicionales mostraron una mayor sostenibilidad ambiental por superficie cultivada. Sin embargo, la baja productividad de estos sistemas es una cuestión crítica que podría afectar a su viabilidad económica y, por tanto, comprometer su

sostenibilidad ambiental. Por tanto, la optimización de la productividad de los sistemas olivareros tradicionales tunecinos debería ser una prioridad dada su elevada presencia territorial pues representa el 95% de la superficie total olivarera del país.

- Los sistemas ecológicos mostraron menores impactos ambientales con respecto a los sistemas tradicionales y convencionales en todas las categorías para ambas unidades funcionales. Estos resultados coinciden con los obtenidos mediante la metodología AHP, como se ha indicado en el apartado anterior.
- En cuanto a las prácticas agronómicas, la fertilización y el manejo del suelo presentaron los mayores impactos en la mayoría de las categorías evaluadas. De hecho, los fertilizantes tuvieron altos impactos en todas las categorías en los sistemas más innovadores.

9.1.1.3. Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV) de los sistemas de producción olivarera en Túnez

- La dimensión ambiental es la más prioritaria a la hora de evaluar la sostenibilidad de los sistemas olivareros, según los diferentes actores implicados, seguida por la económica y la social.
- Por categorías de impacto destacan por su prioridad en la evaluación de la sostenibilidad el Agotamiento de los Recursos Hídricos (WD), la Tasa Interna de Retorno (IRR) y la Toxicidad Humana (HT).
- En general, los sistemas más innovadores (intensivo y súper-intensivo) son más sostenibles globalmente por tonelada, debido a su mayor productividad, y sus mejores resultados especialmente en la dimensión económica en comparación con los sistemas tradicionales. Sin embargo, presentaron una menor sostenibilidad por hectárea debido a sus mayores impactos ambientales y sociales.
- Por tanto, si se pretende mejorar la productividad y la competitividad del sector olivarero tunecino en el mercado internacional del aceite de oliva, las políticas deberían orientarse a promover el aumento de la superficie de los sistemas más innovadores y/o la intensificación de los sistemas tradicionales, p.ej. aumentando las densidades de plantación. Estos sistemas pueden contribuir a mantener una producción suficiente a nivel nacional y compensar la disminución del rendimiento en los años de baja productividad. Sin embargo, esta intensificación debería plantearse con una gestión más respetuosa con el medio ambiente,

por ejemplo, mediante las prácticas de la producción integrada y favorecer los sistemas de alta densidad más sostenibles (el sistema intensivo en lugar del sistema súper-intensivo).

- Los sistemas ecológicos tradicionales han demostrado ser más sostenibles que los sistemas convencionales tradicionales en ambas unidades funcionales. Además, el olivar ecológico ha confirmado su mayor sostenibilidad con respecto al resto de sistemas desde el punto de vista territorial (usando como unidad funcional la superficie cultivada). Por tanto, las políticas encaminadas a preservar los recursos naturales y el medio ambiente deberían diseñarse de forma que favorezcan la extensión agraria y la innovación hacia sistemas de producción ecológica, especialmente en las zonas desfavorecidas y más vulnerables a los problemas ambientales tales como el cambio climático.
- Dada su importante extensión territorial, la mejora del rendimiento económico del sistema olivarero tradicional (tanto ecológico como convencional) debería considerarse una prioridad. Esta mejora podría conseguirse mediante el apoyo institucional al aumento de las densidades de plantación, la integración de agricultores en cooperativas y la mejora de la calidad de sus productos, como se ha indicado anteriormente.
- Estas conclusiones obtenidas podrían ser útiles no sólo para el sector olivarero tunecino, sino también para orientar la definición de políticas en otras regiones de la cuenca mediterránea.

9.1.2. Conclusiones relativas a la metodología

9.1.2.1. Metodologías MCDA y AHP

- La metodología MCDA proporciona herramientas analíticas para la resolución práctica de problemas complejos, que implican la consideración de múltiples criterios, alternativas y actores con diferentes intereses, como es la evaluación de la multifuncionalidad y la sostenibilidad de la agricultura. Este trabajo ha intentado contribuir metodológicamente a la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas a través de un enfoque multicriterio.
- En concreto, la metodología AHP, una técnica MCDA, ha permitido satisfacer los cuatro elementos de una evaluación integrada: dimensiones de la sostenibilidad, escalas, modelo y partes interesadas.
- AHP ha permitido incluir el juicio de expertos (soft data), cuestión fundamental en la evaluación de la sostenibilidad pues en muchas cuestiones no existe información disponible (hard data). Se suele tratar de situaciones en las que los responsables de la toma de decisiones

deben realizar predicciones a largo plazo y simulaciones de nuevos comportamientos posibles fuera del rango de los datos observados.

- Un proceso de selección balanceado de las partes interesadas es un elemento crucial para lograr resultados satisfactorios. En general, se requiere el conocimiento más técnico del comportamiento de los sistemas agrarios en los elementos inferiores del modelo AHP (en los sub-criterios), mientras que se puede incluir las preferencias de todos los agentes del sector en los elementos superiores (prioridades de los criterios y dimensiones de sostenibilidad).
- El análisis de sensibilidad de la metodología AHP permite, en cualquier caso, evaluar la solidez de los resultados obtenidos ante variaciones en las preferencias de las partes interesadas.

9.1.2.2. Metodología ACV

- La metodología ACV ha demostrado ser una potente herramienta con numerosas ventajas pues permite: i) calcular las cargas ambientales a lo largo del ciclo de vida de los sistemas agrícolas; ii) diagnosticar la sostenibilidad ambiental de un cultivo; iii) evaluar/clasificar diferentes técnicas productivas/sistemas de producción; y iv) plantear acciones de mejora y comunicar los resultados.
- Su naturaleza holística y enfoque estructurado y estandarizado en múltiples etapas bien definidas, así como la consideración del ciclo de vida completo de un producto o proceso, hacen que el ACV sea una herramienta muy útil para evaluar científicamente el impacto ambiental de un sistema de producción.
- Sin embargo, la necesidad de una gran cantidad de información detallada y fiable para realizar un estudio adecuado y completo, puede ser difícil de abordar sobre todo en los países en vías de desarrollo. En este caso se ha debido obtener mucha información primaria para cubrir esta falta de información.

9.1.2.2. Metodología ASCV

- A pesar de la necesidad de integrar las tres dimensiones (económica, social y ambiental) en la evaluación de la sostenibilidad, desde el enfoque del Ciclo de Vida no existe un marco general y estandarizado para realizarlo.
- Este estudio pretende contribuir a avanzar en este sentido presentando un marco integrador de ASCV combinando la evaluación de CV y MCDA. El marco ASCV desarrollado ha permitido una evaluación completa de la sostenibilidad.
- Los resultados obtenidos mediante esta evaluación integrada pueden ser de interés para el diseño de políticas destinadas a mejorar la sostenibilidad.

9.2. Recomendaciones y estrategias para la mejora del olivar tunecino

- Actualmente, la olivicultura ecológica solo representa el 2,1% de la superficie agrícola de la región de Sfax, donde muchos agricultores han abandonado esta forma de producción por los bajos ingresos, lo que pone en peligro la existencia misma de este sistema. El reto es cómo garantizar el derecho de las generaciones futuras a una vida y medio ambiente dignos sin perjudicar la situación económica actual de los agricultores. En este sentido, se pueden sugerir tres tipos de medidas: i) desarrollar una política de precios más orientada a la internalización de los costes y beneficios ambientales; ii) subvencionar la renta de los agricultores ecológicos, pues actualmente las subvenciones específicas para la agricultura ecológica no son suficientes para que el sistema ecológico sea viable; y iii) mejorar y promover la formación sobre buenas prácticas de cultivo para contribuir a la mejora de los rendimientos ecológicos.
- Una mayor difusión del olivar ecológico en Túnez requeriría un esfuerzo combinado de varios actores (responsables de la toma de decisiones, agricultores y científicos) centrándose en la mejora de la rentabilidad de las explotaciones ecológicas, el control de costes de producción y la mejora de los flujos de información y el conocimiento científico sobre prácticas agrícolas sostenibles.
- Los sistemas ecológicos tradicionales presentaron, en general, una mayor sostenibilidad que los sistemas convencionales tradicionales para ambas unidades funcionales. Dada la escasa o nula utilización de insumos químicos en los olivares tradicionales de Túnez y su facilidad de conversión a la producción ecológica, especialmente en los sistemas de secano, las

políticas podrían orientarse a la conversión de un mayor número de productores convencionales a ecológicos.

- La mejora de la productividad y el rendimiento de los sistemas tradicionales debería considerarse una prioridad para aumentar la sostenibilidad del sector olivarero tunecino. El aumento de la densidad de plantación, el uso de fertilizantes orgánicos y la optimización del uso del compost o la utilización de fertilizantes foliares biológicos podría ser eficaz para este fin.
- El manejo del suelo y la recolección son prácticas con altos impactos en los sistemas tradicionales. El uso de cubierta del suelo, la maquinaria asistida (p.ej. vibradores manuales) en la fase de la cosecha y la utilización de energía renovable podrían contribuir a generar mejores impactos en la sostenibilidad.
- Los sistemas en regadío provocan una elevada carga ambiental por hectárea debido al uso intensivo de agua e insumos químicos. En estos sistemas deberían apoyarse y desarrollarse técnicas innovadoras como los sensores y las alternativas basadas en la desalinización como suministro seguro de agua, con el fin de mitigar el estrés hídrico y la crítica situación de escasez de agua.
- La gestión integrada del olivar podría ser una buena opción para mitigar los impactos debido al uso de productos químicos en la producción convencional.
- Los sistemas intensivos mostraron una mayor sostenibilidad que el sistema súper-intensivo para ambas unidades funcionales, especialmente el sistema ICIF2 (sistema intensivo con riego y fertilizantes de alta densidad de plantación). Estos resultados sugieren fomentar una gestión intensiva sostenible del olivar que podría generar un menor impacto ambiental y mejores impactos socio-económicos. Por otro lado, la optimización del uso de fertilizantes a través de tratamientos foliares y orgánicos podría mejorar los impactos ambientales en los sistemas innovadores.
- Si se pretende mejorar el impacto ambiental de la producción olivarera en Túnez, se debería considerar el desarrollo y aplicación de una normativa de gestión integrada del olivar con una mayor racionalización de las prácticas agronómicas implementadas, que podría ser similar a la de la UE, así como la elaboración de guías de buenas prácticas y la ejecución de programas de formación para los agricultores.
- Con el fin de estimular el desarrollo del olivar ecológico en Túnez desde la demanda, el reto es cómo sensibilizar al consumidor tunecino para que haga del aceite de oliva ecológico su

elección de compra. Para ello, habría que seguir una estrategia que tenga como objetivo informar al consumidor (por ejemplo, mediante campañas de sensibilización y publicidad) y al mismo tiempo mejorar el acceso a estos productos estableciendo una política de precios racional.

9.3. Limitaciones y futuras líneas de investigación

- Esta investigación se ha centrado en la fase agraria de la cadena de valor del aceite de oliva, pues la mayoría de los estudios han mostrado la gran relevancia de esta fase en la generación de impactos. No obstante, el estudio del impacto en toda la cadena sería interesante, incluyendo otras fases del proceso como la industrial, y el manejo de los residuos generados. Este análisis podría mejorar la eficiencia de todo el ciclo de vida del aceite de oliva, en consonancia con el actual apoyo institucional a una economía circular.
- Este estudio se ha llevado a cabo a nivel nacional (Túnez), aunque la importante posición de Túnez en el mercado internacional del aceite de oliva podría hacer que los resultados obtenidos sean útiles no sólo para el sector del olivar en el país sino también para otros de la cuenca mediterránea. En cualquier caso, habría que ser cautelosos y contrastar en profundidad la situación y resultados del sector del olivar en Túnez con los de otros países productores.
- Las bases de datos y las estadísticas de Ciclo de Vida, especialmente sobre los aspectos sociales, de los sistemas agrícolas en los países en desarrollo deberían organizarse y desarrollarse para emprender futuras investigaciones que podrían facilitar y ampliar el análisis de Ciclo de Vida a otros indicadores como las cuestiones de género, el comercio justo, las preferencias de los consumidores, entre otras.
- Finalmente, son necesarios más estudios para fomentar la difusión en el olivar de las prácticas agronómicas y sistemas de producción identificados como más sostenibles y transferir el conocimiento sobre las prácticas agronómicas asociadas a estos sistemas para mejorar su implementación en las explotaciones olivareras de Túnez.

REFERENCIAS

- Abdou, K. (2017). Évaluation des impacts environnementaux du chalutage de fond et de l'aquaculture en Tunisie: approche comparative par les Analyses de Cycle de Vie (ACV). Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale et Institut National Agronomique de Tunisie.
- Accorsi, R. Versari, L. y Manzini, R. (2015). Glass vs. Plastic: Life Cycle Assessment of Extra-Virgin Olive Oil Bottles across Global Supply Chains. *Sustainability*, 7: 2818-2840.
- AgriDATA. (2020). Statistiques du ministère d'agriculture de Tunisie. Available at: <http://agridata.tn/>
- Akadiri, P.O. y Olomolaiye, P.O. (2012). Development of sustainable assessment criteria for building materials selection. *Eng. Constr. Archit. Manag.*, 19: 666–687.
- André, P. Delisle, C.E. y Revéret, J.-P. (2007). L'évaluation des impacts sur l'environnement: Processus, acteurs et pratique pour un développement durable, 2nde ed. Presses Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada. p 522. ISBN 978-2-553-011320.
- APIA. (2019). COMPOSTAGE. Agence de Promotion des Investissements Agricoles (Tunisie). Document technique. <http://www.apia.com.tn/medias/files/compostage.pdf>
- Arcese, G. Lucchetti, M.C. y Merli, R. (2013). Social life cycle assessment as a management tool: Methodology for application in tourism. *Sustainability*, 5: 3275–3287.
- ASABE. (2015). Standards of American Society of Agricultural and Biological Engineers. In: Edwards, W., Estimating Farm Machinery Costs, *Ag Decision Maker*. Iowa State University.
- Audsley, E. Alber, S. Clift, R. Cowell, S. Crettaz, P. Gaillard, G. Hausheer, J. Jolliet, O. Kleijn, R. Mortensen, B. Pearce, D. Roger, E. Teulon, H. Weidema, B. y van Zeijts, H. (1997). Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture, Final Report, Concerted Action AIR3-CT94-2028, European Commission, DG VI Agriculture, 139 pp.
- Avraamides, M. y Fatta, D. (2008). Resource consumption and emissions from olive oil production: a life cycle inventory case study in Cyprus. *J. Clean. Prod.*, 16: 809-821.
- Banias, G. Achillas, C. Vlachokostas, C. Moussiopoulos, N. y Stefanou, M. (2017). Environmental impacts in the life cycle of olive oil: a literature review. *J. Sci. Food Agric*, 97: 1686-1697.
- Batuecas, E. Tommasi, T. Battista, F. Negro, V. Sonetti, G. Viotti, P. Fino, D. y Mancini G. (2019). Life Cycle Assessment of waste disposal from olive oil production: Anaerobic digestion and conventional disposal on soil. *J. Environ. Manage*, 237: 94-102.
- BCT. (2020). Annual Report 2019. Central Bank of Tunisia. <http://www.bct.gov.tn/>
- Belton, V. y Stewart, T.J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: an Integrated Approach*. Kluwer Academic Publisher.
- Ben Abdallah. (2015). Evaluation comparative de la multifonctionnalité des systèmes de production oléicole de la région de Sfax. Mémoire de master de recherche 'Gestion des Ecosystèmes Naturels et Valorisation de leurs ressources', Institut National Agronomique de Tunisie (INAT).

- Ben Abdallah, S. Elfkhi, S. y Parra-Lopez, C. (2018). A sustainability comparative assessment of Tunisian organic and conventional olive growing systems based on the AHP methodology. *NEW MEDIT*, 3: 51-68.
- Ben Rouina, B. Trigui, A. y Boukhris, M. (2002). Effect of climate and the soil conditions on crops performance of the Chemlali de Sfax “olive tree”. *Acta Horti*, 586: 285–289.
- Brentrup, F. Kusters, J. Kuhlmann, H. y Lammel, J. (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology. I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. *Eur J Agron*, 20: 247-264.
- Berentsen, P.B.M. Giesen, G.W.J. y Schneiders, M.M.F.H. (1998). Conversion from conventional to biological dairy farming: economic and environmental consequences at farm level. *Biol. Agric. Horti*, 16: 311-328.
- Bernardi, B. Falcone, G. Stillitano, T. Benalia, S. Strano, A. Bacenetti, J. y De Luca, A.I. (2018). Harvesting system sustainability in Mediterranean olive cultivation. *Sci. Total Environ*, 625: 1446-1458.
- Bezlepikina, I. y Reidsma, P. (2011). Integrated assessment of sustainability of agricultural systems and land use: Methods, tools and applications. *Agric. Syst*, 104(2): 105–109.
- Binder, C.R. Feola, G. y Steinberger, J.K. (2010). Considering the normative, systemic and procedural dimensions in indicator-based sustainability assessments in agriculture. *Environ. Impact Assess. Rev*, 30(2): 71-81.
- Bond, A. Morrison-Saunders, A. y Pope, J. (2012). Sustainability assessment: the state of the art. *Impact Assess. Proj. Appraisal*, 30: 53-62.
- Bovea, M.D., Perez-Belis, V., 2012. A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. *J. Clean. Prod*, 20(1): 61-71.
- Brown, V.A. Harris, J.A. y Russell, J.Y. (Eds.) (2010). *Tackling Wicked Problems through the Transdisciplinary Imagination*. Earthscan, London; Washington, DC.
- Brunelli, M. (2015). *Introduction to the Analytic Hierarchy Process*. Springer International Publishing Springer Briefs in Operations Research. Aalto, 83.
- Bruhn-Tysk, S. y Eklund, M. (2002). Environmental impact assessment — a tool for sustainable development? A case study of biofuelled energy plants in Sweden. *Environ*, 22: 129-144.
- Brusseau, M.L. (2019). *Sustainable Development and Other Solutions to Pollution and Global Change*. In *Environmental and Pollution Science (Third Edition)*, 585-603.
- Bushan, N. y Rai, K. (2004). *Strategic Decision Making. Applying the Analytic Hierarchy Process*. Springer-Verlag, London.
- Busset, G. (2014). *Approche D'évaluation de la durabilité des systèmes guidée par la pensée cycle de vie : Application à L'Agroindustrie Oléicole*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- Callieris, R. Roma, R. y Brahim, S. (2016). Different consumer behaviours for organic food in Tunisia. A cluster analysis application. *New Medit*, 15(2):53-62.

- Campos-Guzmán, V. García-Cáscales, M.S. Espinosa, N. y Urbina, A. (2019). Life Cycle Analysis with Multi-Criteria Decision Making: A review of approaches for the sustainability evaluation of renewable energy technologies. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 104: 343-366.
- Carmona-Torres, C. Parra-López, C. Hinojosa-Rodríguez, A. y Sayadi, S. (2014). Farm-level multifunctionality associated with farming techniques in olive growing: An integrated modeling approach. *Agr. Syst.*, 127: 97-114.
- Carmona-Torres, C. Parra-López, C. Sayadi, S. y Chiroso-Ríos, M. (2016). A public/private benefits framework for the design of policies oriented to sustainability in agriculture: An application to olive growing. *Land Use Policy*, 58: 54-69.
- Cerutti, A.K. Beccaro, G.L. Bosco, S. De Luca, A.I. Falcone, G. Fiore, A. Iofrida, N. Lo Giudice, A. y Strano, A. (2015). Life cycle assessment in the fruit sector. In: Notarnicola, B., Salomone, R., Petti, L., Renzulli, P.A., Roma, R., Cerutti, A.K. (Eds.), *Life Cycle Assessment in the Agri-food Sector Case Studies, Methodological Issues and Best Practices*. Springer Publishing, Switzerland.
- Chatzisymeon, E. Foteinis, S. Mantzavinos, D. y Tsoutsos, T. (2013). Life cycle assessment of advanced oxidation processes for olive mill wastewater treatment. *J. Clean. Prod.*, 54: 229–234.
- Chebaeva, N. Lettner, M. Wenger, J. Schoggl, J.P. Hesser, F. Holzer, D. Stern, T (2021). Dealing with the eco-design paradox in research and development projects: The concept of sustainability assessment levels. *J. Clean. Prod.*, 281, 125232.
- Chouchane, H. Hoekstra, A.Y. Krol, M.S. y Mekonnen, M.M. (2015). The water footprint of Tunisia from an economic perspective. *Ecol. Indic.*, 52: 311-319.
- Christoforou, E.A. y Fokaidis, P.A. (2016). Life cycle assessment (LCA) of olive husk torrefaction. *Renew. Energy*, 90: 257–266.
- Cinelli, M. Coles, S.R. Jørgensen, A. Zamagni, A. Fernando, C. y Kirwan, K. 2013. Workshop on life cycle sustainability assessment: the state of the art and research needs – November 26, Copenhagen, Denmark. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 18: 1421-1424.
- Cinelli, M. Coles, S.R. y Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecol. Indic.*, 46: 138-148.
- Ciroth, A. Hildenbrand, J. y Steen, B. (2016). Life Cycle Costing. In: Dewulf J., De Meester S., Alvarenga R.A.F. (eds.), *Sustainability Assessment of Renewables-Based Products: Methods and Case Studies* (1st ed.). Hoboken: John Wiley and Sons, 215-228.
- COI. (2020). Estadísticas del Consejo Oleícola Internacional. Available at: www.internationaloliveoil.org
- COI. (2021). Estadísticas del Consejo Oleícola Internacional. Available at: www.internationaloliveoil.org
- Colombo, S. Sánchez-Martínez, J.D. y Perujo-Villanueva, M. (2020). The trade-offs between economic efficiency and job creation in olive grove smallholdings. *Land Use Policy*, 96.

- Convertino, M. Baker, K.M. Vogel, J.T. Lu, C. Suedel, B. y Linkov, I. (2013). Multicriteria decision analysis to select metrics for design and monitoring of sustainable ecosystem restorations. *Ecol. Indic.* 26, 76–86.
- Comisión Europea, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability (2012) Characterization factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Database and Supporting Information. First edition. February 2012. EUR 25167. Luxembourg. Publications office of the European Union.
- Commission of the European Communities. (1999). Directions towards sustainable agriculture, COM (1999) 22 final, Commission of the European Communities, Brussels.
- Costa, D. Quinteiro, P. y Dias, A.C. (2019). A systematic review of life cycle sustainability assessment: Current state, methodological challenges, and implementation issues. *Sci. Total Environ.*, 686: 774-787.
- Couture, J.-M. (2013). Analyse Sociale du Cycle de Vie: réflexions méthodologiques sur la base d'un cas pratique. Séminaire annuel de la plateforme MEANS le 5 septembre 2013, Rennes, France.
- Cowell, S.J. (1998). Environmental Life Cycle Assessment of Agricultural Systems: Integration Into Decision-Making. Ph. D. thesis, University of Surrey, Guildford.
- CTAB. (2020). Centre Technique de l'Agriculture Biologique en Tunisie. Available at : <http://www.ctab.nat.tn/index.php/fr-fr/>.
- Dabbou, S. Rjiba, I. Nakbi, A. Gazzah, N. Issaoui, M. y Hammami, M. (2010). Compositional quality of virgin olive oils from cultivars introduced in Tunisian arid zones in comparison to Chemlali cultivars. *Sci. Horticulture-Amsterdam*, 124: 122-127.
- Daly-Hassen, H. Annabi, M. y King-Okumu, C. (2019). Social and private profitability of tree-based adaptation options to climate change in a dryland area of Tunisia. *NEW MEDIT*, 2: 90-104.
- De Gennaro, B. Notarnicola, B. Roselli, L. y Tassielli, G. (2012). Innovative olive growing models: and environmental and economic assessment. *J. Clean. Prod.*, 28: 70-80.
- Delate, K. Duffy, M. Chase, C. Holste, A. Friedrich, H. y Wantate, N. (2003). An economic comparison of organic and conventional grain crops in a long-term agroecological research (LTAR) site in Iowa. *AJAA*, 18(2): 59-69.
- De Luca, A.I. Iofrida, N. Leskinen, P. Stillitano, T. Falcone, G. Strano, A. y Gulisano, G. (2017). Life Cycle tools combined with multi-criteria and participatory methods for agricultural sustainability. Insights from a systematic and critical review. *Sci. Total Environ.*, 595: 352-370.
- De Luca, A.I. Stillitano, T. Falcone, G. Squeo, G. Caponio, F. Strano, A. y Gulisano, G. (2018a). Economic and Environmental Assessment of Extra Virgin Olive Oil Processing Innovations. *Chem. Eng. Trans.*, 67: 134-137.
- De Luca, A.I. Falcone, G. Stillitano, T. Iofrida, N. Strano, A. y Gulisano, G. (2018b). Evaluation of sustainable innovations in olive growing systems: A Life Cycle Sustainability Assessment case study in southern Italy. *J. Clean. Prod.*, 171: 1187-1202.

- Devuyst, D. (2001). Introduction to sustainability assessment at the local level. In: Devuyst D, editor. *How green is the city? Sustainability assessment and the management of urban environments*. New York: Columbia University Press. pp. 1 – 41.
- DGAB. (2020). *Statistiques de la Direction Générale de l’Agriculture Biologique en Tunisie*.
- DGEDA. (2019). *Statistics of the General Direction of Studies and Agricultural Development in Tunisia*.
- DGPA. (2013). *Statistiques de la Direction Générale de la Production Agricole de la Tunisie*.
- DGPA. (2019). *Statistiques de la Direction Générale de la Production Agricole de la Tunisie*.
- Drexhage, J. y Murphy, D. (2010). *Sustainable development: from Brundtland to Rio 2012, Background paper for the high-level panel on global sustainability*, United Nations, New York. Available at: http://www.un.org/wcm/webdav/site/climatechange/shared/gsp/ocs/GSP1-6_Background%20on%20Sustainable%20Devt.pdf
- Dreyer, L.C. Hauschild, M.Z. y Schierbeck, J. (2006). A framework for social life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess*, 11: 88–97.
- Ecoinvent. (2019). *Ecoinvent database v.3.2*. Swiss Centro for Life Cycle Inventories. Available at: www.ecoinvent.org/database/
- EEA. (2013). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013. Technical guidance to prepare national emission inventories* EEA Technical report No 12/2013 European Environmental Agency.
- Elfkih, S. Guidara, I. y Mtimet, N. (2012). Are Tunisian organic olive growing farms sustainable? An adapted IDEA approach analysis. *Span. J. Agric. Res*, 10(4): 877-889.
- Elfkih, S. Wannessi, O. y Mtimet, N. (2013). Le commerce équitable entre principes et réalisations : le cas du secteur oléicole Tunisien. *New Medit*, 12(1): 13 – 21.
- Elfkih, S. Ben Abdallah, S. y Ben Alaya, A. (2015). La commercialisation de l’huile d’olive: dans un contexte global de sécurité alimentaire. *SMA MED FOOD*, Sfax, Tunisie.
- Egea, P. y Pérez y Pérez, L. (2016). Sustainability and multifunctionality of protected designations of origin of olive oil in Spain. *Land Use Policy*, 58: 264-275.
- El Hanandeh, A. (2015). Energy recovery alternatives for the sustainable management of olive oil industry waste in Australia: life cycle assessment. *J. Clean. Prod*, 91: 78-88.
- El Hanandeh, A. y Gharaibeh, M.A. (2016). Environmental efficiency of olive oil production by small and micro-scale farmers in northern Jordan: Life cycle assessment. *Agric. Syst*, 148: 169-177.
- Environdec. (2020). *Product Category Rules Virgin Olive Oil and its Fractions*. PCR 2010:07 Version 3.0 2020-03-31. The International EPD® System. Available at: www.environdec.com
- Epa, U.S. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH, USA.
- Espadas-Aldana, G. Vialle, C. Belaud J.P. Vaca-Garcia, C. y Sablayrolles, C. (2019). Analysis and trends for Life Cycle Assessment of olive oil production. *Sustain. Prod. Consum*, 19: 216-330.

- ETF. (2014). Employment policies and active labour market programmes in Tunisia. Document prepared for the European Training Foundation. Available at: https://www.etf.europa.eu/sites/default/files/m/B32C0FCEDB4713DC1257D0100405D0F_Employment%20policies_Tunisia.pdf
- FAO. (2017). *Réflexion Stratégique et Opérationnelle pour le Secteur Oléicole Tunisien. Faciliter le dialogue politique public-privé dans le secteur de l'huile d'olive*. Publication of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Available at: <http://www.medagri.org/docs/group/86/Strategie%20Plan%20French%20final%20Jul%202019.pdf>
- Fernández-Hernández, A. Roig, A. Serramiá, N. García-Ortiz Civantos, C. y Sánchez-Monedero, M.A. (2014). Application of compost of two-phase olive mill waste on olive grove: Effects on soil, olive fruit and olive oil quality. *Waste Manage*, 34: 1139-1147.
- Fernández-Tirado, F. Parra-López, C. y Romero-Gámez, M. (2021). A multi-criteria sustainability assessment for biodiesel alternatives in Spain: Life cycle assessment normalization and weighting. *Renew. Energ*, 164: 1195-1203.
- Fernández-Uclés, D. Elfkah, S. Mozas-Moral, A. Bernal-Jurado, E. Medina-Viruel, M.J. y Ben Abdallah, S. (2020). Economic Efficiency in the Tunisian Olive Oil Sector. *Agriculture*, 10, 391.
- Figueira, J. Greco, S. y Ehrgot, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 78, International Series in Operations Research & Management Science, Springer-Verlag New York, 2005, 1048.
- Finkbeiner, M. Schau, E.M. Lehmann, A. y Traverso, M. (2010). Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability*, 2 (10), 3309–3322. Available at: <https://doi.org/10.3390/su2103309>.
- Foolmaun, R.K. y Ramjeeawon, T. (2013). Comparative life cycle assessment and social life cycle assessment of used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. *Int. J. Life Cycle Assess*, 18: 155–171.
- Forman, E. y Selly, M.A. (2001). *Decisions by Objectives*. Amazon Edition. 401pp.
- Fri, R.W. (1991). Sustainable development: principles into practice. *Resources*, 102: 1-3.
- Garrido, S.R. (2017). Social Life-Cycle Assessment: An Introduction. In: *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 253-265.
- Gasia, J. Fabiani, C. Chàfer, M. Pisello, A.L. Manni, A. Ascani, M. y Cabeza, L.F. (2021). Life cycle assessment and life cycle costing of an innovative component for refrigeration units. *J. Clean. Prod*, 295, 126442.
- Gasparatos, A. El-Haram, M. y Horner, M. (2008). A critical review of reductionist approaches for assessing the progress towards sustainability. *Environ. Impact Assess. Rev*, 28: 286–311.
- Gasparatos, A. y Scolobig, A. (2012). Choosing the most appropriate sustainability assessment tool. *Ecol. Econ*, 80: 1-7.

- Geldermann, J. y Lerche, N. (2015). Integration of prospect theory into PROMETHEE – a case study concerning sustainable bioenergy concepts. *Int. J. Multicriteria Decis. Mak*, 5(4).
- Gómez, J.A. Montero, A.S. Guzmán, G. y Soriano, M.A. (2021). *International Soil and Water Conservation Research*.
- Gómez-Limón, J.A. y Arriaza-Balmón, M. (2011). Evaluación de la sostenibilidad de las explotaciones de olivar en Andalucía. XIII Premio Unicaja de Investigación Agraria. < <https://www.unicaja.es/resources/1320671483909.pdf> >.
- Guarino, F. Falcone, G. Stillitano, T. De Luca, A.I. Gulisano, G. Mistretta, M. y Strano, A. (2019). Life cycle assessment of olive oil: A case study in southern Italy. *J. Environ. Manage.*, 238: 396-407.
- Guinée, J.B. Gorrée, M. Heijungs, R. Gjal, H. René, K. de Koning, A. van Oers, L. Wegener Sleeswijk, A. Suh, S. Udo de Haes, H.A. de Bruijn, H. van Duin, R. y Huijbregts, M.A. (2002). *Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards*. Dordr. Kluwer Acad. Publ. 704.
- Guinée, J.B. Heijungs, R. Huppes, G. Zamagni, A. Masoni, P. Buonamici, R. Ekvall, T. y Rydberg, T. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future†. *Environ. Sci. Technol*, 45: 90–96.
- Guiso, A. Parenti, A. Masella, P. Guerrini, L. Baldi, F. y Spugnoli, P. (2016). Environmental impact assessment of three packages for high-quality extra-virgin olive oil. *Agric. Eng*, 47: 191-196.
- Hansen, B. Alrøe, H.F. y Kristensen, ES. (2001). Approaches to assess the environmental impact of organic farming with particular regard to Denmark. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83(1-2): 11–26.
- Helga, W. y Lemoud, J. (2019). *The world of organic agriculture. Statistics and emerging trends 2019*. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick and IFOAM- Organics International, Bonn.
- Herva, M. y Roca, E. (2013). Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. *J. Clean.Prod*, 39: 355–371.
- Hinojosa-Rodríguez, A. Parra-López, C. Carmona-Torres, C. Sayadi, S. y Gallardo-Cobos., R. (2013). Certified quality systems and farming practices in olive growing: The case of integrated production in Andalusia. *Renew. Agric. Food Syst*, 29 (4).
- Hole, D.G. Perkins, A.J. Wilson, J.D. Alexander, I.H. Grice, P.V. y Evans, A.D. (2005). Does organic farming benefit biodiversity? *Biol. Conserv*, 122(1): 113–130.
- Hossaini, N. Kasun Hewage, K. y Sadiq, R. (2014). Spatial life cycle sustainability assessment: a conceptual framework for net-zero buildings. *Clean. Technol. Environ. Policy* 17, 2243-2253.
- Hrustek, L. (2020). Sustainability Driven by Agriculture through Digital Transformation. *Sustainability*, 12, 8596.
- Huang, I.B. Keisler, J. y Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends. *Sci. Total Environ*. 409: 3578–3594.
- Huertas-Valdivia, I. Ferrari, A.M. Settembre-Blundo, D. y García-Muiña, F.E. (2020). Social Life-Cycle Assessment: A Review by Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 12, 6211.

- Hussain, M. Mumma, G. y Saboor, A. (2005). Discount rate for investments: some basic considerations in selecting a discount rate. *Pak. J. life Soc. Sci*, 3(1-2): 1-5.
- IEC. (2004). IEC 60300-3-3:2004. Dependability Management - Part 3 3: Application Guide - Life Cycle Costing. Available from World Wide Web: Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/1302>.
- INS. (2019). Statistiques de l'Institut National de Statistiques de Tunisie. Available at: <http://www.ins.tn/>
- IO. (2017a). Guide pratique de l'huile d'olive. Ed. Olive Tree Institute (IO). Available at: <http://www.iosfax.agrinet.tn/index.php/news/item/112-guide-pratique-de-l-huile-d-olive>
- IO. (2017b). Techniques de plantation d'olivier. Ed. Olive Tree Institute (IO). Available at: <http://www.iosfax.agrinet.tn/index.php/news/item/106-2017-10-30-09-45-07>
- IO. (2019). Institut de l'Olivier (<http://www.iosfax.agrinet.tn/>). Database of olive prices in Souk Gremda (Sfax). Available at: <https://www.internationaloliveoil.org/>
- Iofrida, N. De Luca, A.I. Strano, A. y Gulisano, G. (2016). Can social research paradigms justify the diversity of approaches to social life cycle assessment? *Int. J. Life Cycle Assess.* Available at: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1206-6>
- Iofrida, N. Stillitano, T. Falcone, G. Gulisano, G. Nicolò, B.F. y De Luca, A.I. (2020). The socio-economic impacts of organic and conventional olive growing in Italy. *New Medit*, 1: 118-131.
- IPCC. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 10, Authors: Dong H, Mangino J, Mcallister TA, Hatfield JL, Johnson DE, Lassey KR, de Lima MA, Romanovskaya, A. Emissions from Livestock and Manure Management. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2007). IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Available at: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>
- Iraldo, F. Testa, F. y Bartolozzi, I. (2014). An application of Life Cycle Assessment (LCA) as a green marketing tool for agricultural products: the case of extra-virgin olive oil in Val di Cornia, Italy. *J. Environ. Planning Mgmt.*, 57(1): 78-103.
- Iraldo, F. Testa, F. Bartolozzi, I. (2015). An application of Life Cycle Assessment (LCA) as a green marketing tool for agricultural products: the case of extravirgin olive oil in Val di Cornia, Italy. *J. Environ. Plan. Manag.*, 57(1): 78–103.
- Ishizaka, A. y Labib, A. (2009). Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations. *OR Insight*, 22(4): 201-220.
- Ishizaka, A. y Nemery, P. (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis Methods and Software*. Portsmouth Business School, University of Portsmouth, UK.
- ISO 14040. (2006). Environmental management—life cycle assessment—principles and framework. International Organization for Standardization ISO, Geneva.

- ISO. (2006a). Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework. ISO 14040, ISO, Geneva.
- ISO. (2006b). Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines. ISO 14044, ISO, Geneva.
- ISO. (2008). ISO 15686-5:2008. Buildings and Constructed Assets e Service-life Planning e Part 5: Life-cycle Costing. Available from World Wide Web: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber-39843.
- Jackson, D. Paglietti, L. Ribeiro, M. y Karray, B. (2015). Tunisie. Analyse de la Filière Oléicole; FAO, European Bank, Eds. Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italy.
- Jacquemin, L. Pontalier, P.-Y. y Sablayrolles, C. (2012). Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review. *Int. J. Life Cycle Assess*, 17: 1028-1041.
- Jolliet, O. Margni, M. Charles, R. Humber, S. Payet, J. Rebitzer, G. y Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *Int. J. Life Cycle Assess*, 8(6): 324-330.
- Jolliet, O. Saadé, M. y Crettaz, P. (2005). Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan. 1ère ed, Sciences et Techniques de l'environnement. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse. p 242. ISBN: 2-88074-568-3.
- Jolliet, O. Saadé, M. Crettaz, P. Shaked, S. (2010). Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan, 2nde ed, Sciences et Techniques de l'environnement. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse. p 302. ISBN : 978-2-88074-886-9.
- Jorgensen, A. Finkbeiner, M. Jorgensen, M.S. y Hauschild, M.Z. (2010). Defining the baseline in social life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess*, 15: 376–384.
- Joshi, Y. y Rahman, Z. (2015). Factors Affecting Green Purchase Behaviour and Future Research Directions. *International Strategic Management Review*, vol. 3. Holy Spirit University of Kaslik.
- Kanter, D.R. Musumba, M. Wood, S.L.R. Palm, C. Antle, J. Balvanera, P. Dale, V.H. Hvlik, P. Kline, K.L. Scholes, R.J. Thornton, P. Tittonell, P. y Andelman, S. (2016). Evaluating agricultural trade-offs in the age of sustainable development. *Agric. Syst*, 163: 73-88.
- Karray, B. Louizi, A. y Sahnoun, A. (2000). Estimation du coût de production d'olives a huile en Tunisie: application de la méthode de coût constaté aux exploitations privées dans la région de Sfax. *NEW MEDIT*, 4.
- Karray, B. (2012). Enjeux de la filière oléicole en Tunisie et axes de développement dans le nouveau contexte politique. Les notes d'analyse du CIHEAM, 66.
- Keeney, L.R. y Raiffa, H. (1976). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Wiley, New York.
- Kloepffer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). *Int. J. Life Cycle Assess*, 13, 89.

- Kubba, S. (2017). Green Design and Building Economics. Chapter 10. Handbook of Green Building Design and Construction (Second Edition). LEED, BREEAM, and Green Globes.
- Laajimi, A. y Ben Nasr, J. (2009). Appréciation et comparaison de la durabilité des exploitations agricoles biologiques et conventionnelles en Tunisie: cas de l'oléiculture dans la région de Sfax. *New Medit*, 3(1): 10-19.
- Lampkin, N. y Padel, S. (1994). *The Economics of Organic Farming*. CAB International, Wallingford.
- Landais, E. (1998). Agriculture durable : les fondements d'un nouveau contrat social ? *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 33: 5-22.
- Laratte, B. Guillaume, B. y Birregah, B. (2012). *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society: Dynamic environmental assessment: scenarios, foresight and challenges*. Springer Netherlands.
- Larbi, A. Msallem, M. y Sai, M.B. (2017). L'intensification des oliviers en Tunisie: les avantages, les problèmes et les perspectives. Ed. Olive Tree Institute (IO).
- Lettner, M. Solt, P. Rößiger, B. Pufky-Heinrich, Jääskeläinen, A.S. Schwarzbauer, P. y Hesser, F. (2018). From wood to resin-identifying sustainability levers through hotspotting lignin valorisation pathways. *Sustainability*, 10 (8), 2745.
- Levasseur, A. (2011). Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie dynamique pour l'évaluation des impacts sur le réchauffement climatique. PhD thesis, Université de Montréal Ecole Polytechnique de Montréal.
- Levine, S. H. Gloria, T. P. y Romanoff, E. (2007). A dynamic model for determining the temporal distribution of environmental burden. *J. Ind. Ecol*, 11(4): 39–49.
- López-Pintor, A. Salas, E. y Rescia, A. (2018). Assessment of agri environmental externalities in Spanish socio-ecological landscapes of olive groves. *Sustainability* 10 (8), 2640. Available at: <https://doi.org/10.3390/su10082640>.
- Mabudafhasi, R. (2002). The role of knowledge management and information sharing incapacity building for sustainable development—an example from South Africa. *Ocean & Coastal Management*, 45(9-10): 695–707.
- Maffia, A. Pergola, M. Palese, A.M. y Celano, G. (2020). Environmental Impact Assessment of Organic vs. Integrated Olive-Oil Systems in Mediterranean Context. *Agronomy*, 10, 416.
- Marino, G. Pernice, F. Marra, F.P. y Caruso, T. (2016). Validation of an online system for the continuous monitoring of tree water status for sustainable irrigation managements in olive (*Olea europaea* L.). *Agric. Water Manag.*, 177: 298-307.
- Masmoudi-Charfi, C. Gargouri, K. Habaieb, H. Daghari, H. Abid-Karray, J. y Rhouma, A. (eds) (2012). *Manuel d'irrigation de l'Olivier. Techniques et Applications*. Olive Tree Institute (IO). 110 p. Available at: <http://www.iosfax.agrinet.tn/index.php/news/item/95-manuel-d-irrigation-de-l-olivier>

- Masmoudi-Charfi, C. Msallem, M. Larbi, A. Sai, B. Siala, S. y Kchaou, M. (eds) (2016). Mise en place et conduite d'une plantation intensive d'oliviers. CD. Olive Tree Institute (IO). 115 Diapos. Available at: <http://www.iosfax.agrinet.tn/index.php/news/item/99-mise-en-place-et-conduite-d-une-plantation-intensive-d-oliviers>.
- MAT. (2016). Plan de développement du secteur agricole 2016-2020. Ministère d'Agriculture de Tunisie. Available at: <http://www.agridata.tn/dataset/plan-de-developpement-2016-2020/resource/7fdf970c-5b0e-4560-8961-91edd1e67fe4>
- MAT. (2017). Révision du coût de production des grandes cultures, Légumes, arbres fruitiers, production, Élevage, pêche maritime et aquaculture Hydroponique. Fiches techniques. Ministère d'Agriculture de Tunisie. Available at: <http://www.agriculture.tn/images/fichestechniques.pdf>
- Mathé, S. (2014). Integrating participatory approaches into social life cycle assessment: the SLCA participatory approach. *Int. J. Life Cycle Assess*, 19(8): 1506-1514.
- Mattsson, B. (1999). Life cycle assessment (LCA) of carrot puree: case studies of organic and integrated production.
- McManus, M.C. y Taylor, C.M. (2015). The changing nature of life cycle assessment. *Biomass & Bioenergy*, 82: 13-26.
- MEEDDAT. (2009). Ministère de l'écologie, de l'environnement du développement durable et de l'aménagement du territoire. Calcul du Coût Global; Objectifs, méthodologie et principes d'application selon la norme ISO/DIS 15686-5.
- Meier, M.S. Stoessel, F. Jungbluth N. Juraske, R. Schader, C. y 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.
- Mezghani, M.A. Mguidiche, A. Khebour F.A. Zouari, I. Attia, F. y Provenzano, G. (2019). Water Status and Yield Response to Deficit Irrigation and Fertilization of Three Olive Oil Cultivars under the Semi-Arid Conditions of Tunisia. *Sustainability*, 11, 4812.
- Michelsen, G. Adomßent, M. Martens, P. y von Hauff, M. (2016). Sustainable Development – Background and Context. In H. Heinrichs et al. (eds.), *Sustainability Science*, 5-29. Springer Science+Business Media Dordrecht. Available at: DOI 10.1007/978-94-017-7242-6_2
- Milà, L. (2003). Contributions to Life Cycle Analysis for Agricultural Systems. Site-dependency and soil degradation impact assessment. P.hD tesis, Universitat Autònoma, Bellaterra.
- Mlih, R.K. Gocke, M.I. BOL, R. Berns, A.E. Fuhrmann, I. y Brahim, N. (2019). Soil Organic Matter Composition in Coastal and Continental Date Palm Systems: Insights from Tunisian Oases. *Pedosphere*, 29(4): 444-456.
- Mohamad, R.S. Verrastro, V. Cardone, G. Bteich, M.R. Favia, M. Moretti, M. y Roma, R. (2014). Optimization of organic and conventional olive agricultural practices from a life cycle assessment and life cycle costing perspectives. *J. Clean. Prod*, 70: 78-89.

- Mourad, A.L. Coltro L. Oliveira PAPLV. Kletecke, R.M. y Baddini JPAO. (2007). A simple methodology for Elaborating the Life Cycle Inventory of Agricultural Products. *Int. J. Life Cycle Assess*, 12(6): 408-413.
- Msallem, M. Sai, M.B. Larbi, A. y Khereddine, N. (2004). Normes technico-économiques pour la création des parcelles hyper intensives d'olivier. Institut de l'Olivier, Tunisie. 7p.
- Munda, G. 2005. Multi criteria decision analysis and sustainable development Pages 953-986 in J. Fiigueira, S. Greco, y M. Ehrgott, editors. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer, New York.
- Muthu, S.S. (2014). Estimating the overall environmental impact of textile processing: life cycle assessment (LCA) of textile products. *Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain*. 105-131.
- Navarro, A. Puig, R. Martí, E. Bala, A. y Fullana-i Palmer, P. (2018). Tackling the relevance of packaging in life cycle assessment of virgin olive oil and the environmental consequences of regulation. *Environ. Manage*, 62: 277-294.
- Nechifor, V. y Winning, M. (2017). Projecting irrigation water requirements across multiple socio-economic development futures – A global CGE assessment. *Water Resour. Econ*, 20: 16-30.
- Ness, B. Urbel-Piirsalu, E. Anderberg, S. y Olsson, L. (2007). Categorising tools for sustainability assessment. *Ecol. Econ*, 60(3): 498-508.
- Norris, C.B. Norris, G.A. y Aulisio, D. (2014). Efficient Assessment of Social Hotspots in the Supply Chains of 100 Product Categories Using the Social Hotspots Database. *Sustainability*, 6: 6973-6984. Available at: doi:10.3390/su6106973
- Notarnicola, B. Tassielu, G. y Nicoletti, G.M. (2004). Environmental and economic analysis of the organic and conventional extra-virgin olive oil. *NEW MEDIT*, 3 (2): 28-34.
- OCDE. (2014). *Water Governance in Tunisia: Overcoming the Challenges to Private Sector Participation*, OECD Studies on Water, OECD Publishing. Available at: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264174337-en>
- Olawumi, T.O. y Chan, D.W.M. (2018). A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. *J. Clean. Prod.* 183, 231–250. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.162>
- OLIVAE. (2017). Journal officiel du Conseil oléicole international, N° I 124.
- Onagri. (2019). Observatoire National de l'Agriculture (<http://www.onagri.nat.tn/>). Le secteur de l'agriculture biologique en chiffres. Available at: http://www.onagri.tn/uploads/images/filieres/bio/mai2019/Fiche_indicateur-BIOMAi2019.pdf
- Onat, N. Kucukvar, M. Halog, A. y Cloutier, S. (2017). Systems thinking for life cycle sustainability assessment: a review of recent developments, applications, and future perspectives. *Sustainability* 9 (5), 706. Available at: <https://doi.org/10.3390/su9050706>.

- Onisto, L. (1999). The business of sustainability. *Ecol. Econ*, 29: 37-43. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)00077-9)
- Ormazabal, M. Jaca, C. y Puga-Leal, R. (2014). Analysis and comparison of life cycle assessment and Carbon footprint software. In: *Proceedings of the Eighth International Conference on Management Science and Engineering Management*. 1521–1530. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-55122-2_131
- Pacini, C. Wossink, A. Giesen, G. Vazzana, C. y Huirne, R. (2003). Evaluation of sustainability of organic, integrated and conventional farming systems: a farm and field- scale analysis. *Agric Ecosyst Environ*, 95(1): 273-288.
- Pacini, C. Wossink, A. Giesen, G. y Huirne, R. (2004). Ecological-economic modelling to support multi-objective policy making: a farming systems approach implemented for Tuscany. *Agric Ecosyst Environ*, 102 (3): 349-364.
- Padey, P. (2013). *Modèles simplifiés d'Analyse de Cycle de Vie : cadre méthodologique et applications aux filières de conversion d'énergie*. Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris.
- Parascanu, M.M. Gamero, M.P. Sánchez, P. Soreanu, G. Valverde, J.L. y Sanchez-Silva, L. (2018a). Life cycle assessment of olive pomace valorisation through pyrolysis. *Renew. Energy*, 122: 589-601.
- Parascanu, M.M. Sánchez, P. Soreanu, G. Valverde, J.L. y Sanchez-Silva, L. (2018b). Environmental assessment of olive pomace valorisation through two different thermochemical processes for energy production. *J. Clean. Prod*, 186: 771-781.
- Parra-López, C. Calatrava-Requena, J. y De Haro-Giménez, T. (2006). A multi-criteria evaluation of the environmental performances of conventional, organic and integrated olive-growing systems in the south of Spain based on experts' knowledge. *Renew. Agr. Food Syst*, 22(3): 189-203.
- Parra-López, C. Calatrava-Requena J. y de-Haro-Giménez, T. (2007). A multi-criteria evaluation of the environmental performances of conventional, organic and integrated olive-growing systems in the south of Spain based on experts' knowledge. *Renew. Agric. Food Syst*, 22(3): 189-203.
- Parra-López, C. Groot, J.C.J. Carmona-Torres, C. y Rossing, W.A.H. (2008a). Integrating public demands into model-based design for multifunctional agriculture: An application to intensive Dutch dairy landscapes. *Ecol. Econ*, 67: 538-551.
- Parra-López, C. Calatrava-Requena, J. y de-Haro-Giménez, T. (2008b). A systemic comparative assessment of the multifunctional performance of alternative olive systems in Spain within an AHP extended framework. *Ecol. Econ*, 64(4): 820-834.
- Pattara, C. Salomone, R. y Cichelli, A. (2016). Carbon footprint of extra virgin olive oil: a comparative and driver analysis of different production processes in Centre Italy. *J. Clean. Prod*, 127: 533-547.

- Pergola, M. Favia, M. Palese, A.M. Perretti, B. Xiloyannis, C. y Celano, G. (2013). Alternative management for olive orchards grown in semi-arid environments: An energy, economic and environmental analysis. *SHRTA*, 162: 380–386.
- Pimentel, D. (1980). *Handbook of energy utilization in agriculture*. CRC Press, 475 pp.
- Pizzol, M. Laurent, A. Sala, S. Weidema, B. Verones, F. y Koffler, C. (2017). Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis? *Int J Life Cycle Assess*, 22: 853-866.
- PKN. (2006). PN-EN 60300-3-3:2006-wersja Polska. Available from World Wide Web: <http://sklep.pkn.pl/pn-en-60300-3-3-2006p.html>.
- Pomarici, E. Amato, M. y Vecchio, R. (2016). Environmental Friendly Wines: A Consumer Segmentation Study. *Agric. Agric. Sci. Procedia*, 8: 534-541.
- Posch, M., Seppälä, J., Hettelingh, J.P., Johansson, M., Margni, M., Jolliet, O., 2008. The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. *Int J Life Cycle Assess*, 13: 477–486. <http://doi.org/10.1007/s11367-008-0025-9>
- Pré Consultants bv. (2017). *SimaPro 8.5.2.0*. Amersfoort. The Netherlands.
- Pré Consultants bv. (2021). *SimaPro 8.5.2.0*. Amersfoort. The Netherlands.
- Proietti, S. Sdringola, P. Desideri, U. Zepparelli, F. Brunori, A. Ilarioni, L. Nasini, L. Regni, L. y Proietti, P. (2014). Carbon footprint of an olive tree grove. *Appl. Energy*, 127: 115-124.
- Proietti, P. Sdringola, P. Brunori, A. Ilarioni, L. Nasini, L. Regni, L. Pelleri, F. Desideri, U. y Proietti, S. (2016). Assessment of carbon balance in intensive and extensive tree cultivation systems for oak, olive, poplar and walnut plantation. *J. Clean. Prod*, 112(4): 2613-2624.
- Proietti, S. Sdringola, P. Regni, L. Evangelisti, N. Brunori, A. Ilarioni, L. Nasini, L. y Proietti, P. (2017). Extra Virgin Olive oil as carbon negative product: Experimental analysis and validation of results. *J. Clean. Prod*, 166: 550-562.
- Rajaeifar, M.A. Akram, A. Ghobadian, B. Rafiee, S. y Heidari, M.D. (2014). Energy-economic life cycle assessment (LCA) and greenhouse gas emissions analysis of olive oil production in Iran. *Energy*, 66: 139-149.
- Rasul, G. y Thapa, G.B. (2004). Sustainability of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh: an assessment based on environmental, economic and social perspectives. *Agricultural Systems*, 79 (2004), 327-351.
- Ravenmark, D. (2008). *State of the Art Study of LCA y LCC Tools*. Available from World Wide Web: <http://www.dantes.info/Projectinformation/Publications>.
- Redclift, M. (2005). An oxymoron comes of age. *Sustain. Dev*, 13: 212–227.
- Reglamento (CE) N° 834/2007. (2007). Council Regulation (EC) No. 834/2007 of 28 June 2007 on organic production and labelling of organic products and repealing Regulation (EEC) No. 2092/91. *Official Journal of the European Union*, L 189/1.

- Reglamento (CE) N° 537/2009. (2009). Commission Regulation (EC) No 537/2009 of 19 June 2009. Official Journal of the European Union, L 159/6.
- Rey-Valette, H. Clément, O. Aubin, J. Mathé, S. Chia, E. Legendre, M. Caruso, D. Mikolasek, O. Blancheton, J-P. Slembrouck, J. Baruthio, A. René, F. Levang, P. Morrissens, P. y Lazard, J. (2008). Guide to the coconstruction of sustainable development indicators in aquaculture. ©Cirad, Ifremer, INRA, IRD, Université Montpellier 1. Diffusion Cirad-Montpellier, 144.
- Rigby, D. y Cáceres, D. (2001). Organic farming and the sustainability of agricultural systems. *Agric. Syst*, 68 (1): 21-40.
- Rinaldi, S. Barbanera, M. y Lascaro, E. (2014). Assessment of carbon footprint and energy performance of the extra virgin olive oil chain in Umbria Italy. *Sci. Total Environ*, 482–483: 71-79.
- Rittel, H.W.J. y Webber, M.M. (1973). Dilemmas in a general theory of planning. *Policy. Sci*, 4 (2): 155–169. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF01405730>.
- Rivals, P. (1961). Regards sur les Oliviers de la Région de Sfax. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*. 8-4-5: 203-205.
- Rodríguez Sousa, A.A. Barandica, J.M. Sanz-Cañada, J. y Rescia, A.J. (2019). Application of a dynamic model using agronomic and economic data to evaluate the sustainability of the olive grove landscape of Estepa (Andalusia, Spain). *Landsc. Ecol*, 34(7): 1547–1563. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00773-3>.
- Rodríguez Sousa, A.A. Parra-López, C. Sayadi-Gmada, S. Barandica, J.M. y Rescia, A.J. (2020). A multifunctional assessment of integrated and ecological farming in olive agroecosystems in southwestern Spain using the Analytic Hierarchy Process. *Ecol. Econ*, 173, 106658.
- Romero-Gámez, M. Audsley, E. y Suárez-Rey, E.M. (2014). Life Cycle Assessment of producing lettuce and escarole in Spain. *J. Clean. Prod*, 73: 193-203.
- Romero-Gámez, M. Castro-Rodríguez, J. y Suárez-Rey, E.M. (2017). Optimization of olive growing practices in Spain from a life cycle assessment perspective. *J. Clean. Prod*, 129: 25-37.
- Romero-Gámez, M. y Suárez-Rey, E.M. (2020). Environmental footprint of cultivating strawberry in Spain *Int J Life Cycle Assess*, 25: 719-732.
- Rosenbaum, R.K. Bachmann, T.M. Gold, L.S. Huijbregts, M.A.J. Jolliet, O., Juraske, R. Köhler, A. Larsen, H.F. MacLeod, M. Margni, M. McKone, T.E. Payet, J. Schuhmacher, M. van de Meent, D. y Hauschild, M.Z. (2008). USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. *Int J Life Cycle Assess*, 13(7): 532-546. <http://doi.org/10.1007/s11367-0080038-4>
- Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of electre methods. *Theory Decision*, 49–73.
- Roy, P. Nei, D. Orikasa, T. Xu, Q. Okadome, H. Nakamura, N. y Shiina, T. (2009). A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *J. Food Eng*, 90: 1-10.

- Ruggerio, C.A. (2021). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *Sci. Total Environ*, 786, 147481.
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T.L. (1994). *The Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process VI*, AHP Series. Pittsburgh, USA, RWS Publications.
- Saaty, T.L. (2001). *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. Pittsburgh, USA, RWS Publications.
- Sachs, W. (1999). Sustainable development and the crisis of nature: On the political anatomy of an oxymoron. In: Fischer, F., Hajer, M. (Eds.), *Living with Nature: Environmental Discourse as Cultural Politics*. Oxford University Press, Oxford, 23-41.
- Sai, M.B. Larbi, A. Mestaoui, S. Bayouhd, C. y Msallem, M. (2012). Le système hyper intensif de L'olivier a huile en Tunisie après 10 ans: une évaluation technico-economique. *Revue Ezzaitouna*, 13 (1 et 2).
- Sala, S. Farioli, F. y Zamagni, A. (2013a). Life cycle sustainability assessment in the context of sustainability science progress (part 2). *Int. J. Life Cycle Assess*, 18: 1686-1697.
- Sala, S. Farioli, F. y Zamagni, A. (2013b). Progress in sustainability science: lessons learnt from current methodologies for sustainability assessment: Part 1. *Int. J. Life Cycle Assess*, 18: 1653-1672.
- Salomone, R. Cappelletti, G.M. Ioppolo, G. Mistretta, M. Nicoletti, G.M. Notarnicola, B. Olivieri, G. Pattara, C. Russo, C. y Scimia, E. (2010). Italian experiences in life cycle assessment of olive oil: a survey and critical review. In: *Conference Proceedings of the 7th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector*, Bari, Italy, 265–270.
- Salomone, R. y Ioppolo, G. (2012). Environmental impacts of olive oil production: a Life Cycle Assessment case study in the province of Messina (Sicily). *J. Clean. Prod*, 28: 88-100.
- Sánchez Jiménez, S. (1999). *El control de costes en el cultivo del olivar*. PhD dissertation, Dept. of Business Administration, University of Jaen, Spain.
- Sartori, S. Da Silva, F.L. y De Souza Campos, L.M. (2014). Sustainability and sustainable development: a taxonomy in the field of literature. *Ambient. e Soc*, 17: 1-22. Available at: <https://doi.org/10.1590/1809-44220003490>
- Savić, B. Milojević, I. y Petrović, V. (2019). COST OPTIMIZATION IN AGRIBUSINESS BASED ON LIFE CYCLE COSTING. *Economics of Agriculture*, 66(3): 823-834.
- Schaller, N. (1993). The concept of agricultural sustainability. *Agric Ecosyst Environ*, 46(1-4): 89-97.
- SDSN. (2013). *Una Agenda de Acción para el Desarrollo Sostenible*. Informe para el Secretario General de las Naciones Unidas. Elaborada por el Consejo de Liderazgo de la Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible.
- Seda, M. Assumpeió, A. y Muñoz, P. (2010). Analysing the influence of functional unit in agricultural LCA. *LCA FOOD 2010. VII international conference on life cycle assessment in the agri-food sector*. In Notarnicola, B. *7th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food*

- Sector (LCA Food 2010), 22–24 September 2010, Bari (Italy). *Int J Life Cycle Assess*, 16: 102-105.
- Sellare, J. Meemken, E.M. y Qaim, M. (2020). Fairtrade, Agrochemical Input Use, and Effects on Human Health and the Environment. *Ecol. Econ*, 176, 106718.
- Seppälä, J. Posch, M. Johansson, M. y Hettelingh, J.P. (2006). Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator. *Int J Life Cycle Assess* 11(6): 403-416. Available at: <http://doi.org/10.1065/lca2005.06.215>
- Sghari, M.B.A. y Hammami, S. (2016). Energy, pollution, and economic development in Tunisia. *Energy Reports*, 2: 35-39.
- SIGMA. (2016). Life Cycle Costing. Retrieved from <http://www.sigmaweb.org/publications/Public-Procurement-Policy-Brief-34-200117.pdf>.
- Silva, D.A.L. Nunes, A.O. Moris, V.A.S. Piekarski, C.M. y Rodrigues, T.O. (2017). How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro y Umberto. In: VII Conferencia Internacional de anáLisis de Ciclo de Vida En Latinoamérica, Colombia.
- Silva, D.A.L. Nunes, A.O. Piekarski, C.M. Moro, C. Moris V.A.d.S. Souza, L.S.M.d.S. y Rodrigues T.O. (2019). Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause–effect analysis of the problem. *Sustain. Prod. Consum*, 20: 304–315.
- Singh, R.K. Murty, H.R. Gupta, S.K. y Dikshit, A.K. (2009). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecol. Indic*, 9: 189-212.
- Souissi, A. Mtimet, N. Thabet, C. Stambouli, T. y Chebil, A. (2019). Impact of food consumption on water footprint and food security in Tunisia. *Food Secur*, 11: 989-1008.
- Soula, R. Chebil, A. McCann, L. y Majdoub, R. (2021). Water scarcity in the Mahdia region of Tunisia: Are improved water policies needed? *Groundw. Sustain. Dev.* (12).
- Speck, R. Selke, S. Auras, R. y Fitzsimmons, J. (2016). Life Cycle Assessment_selection can impact results. *J. Ind. Ecol*, 20: 18–28.
- Stanhill, G. (1980). The energy cost of protected cropping: A comparison of six system of tomato production. *J. Agric. Eng. Res*, 25: 145-154.
- Stern, N. (2006). *Stern Review on the Economics of Climate Change*. London: HM Treasury.
- Stillitano, T. Falcone, G. De Luca, A.I. Piga, A. Conte, P. Strano, A. y Gulisano, G. (2019). A Life Cycle Perspective to Assess the Environmental and Economic Impacts of Innovative Technologies in Extra Virgin Olive Oil Extraction. *Foods*, 8, 209.
- Stockdale, E.A. Lampkin, N.H. Hovi, M. Keatinge, R. Lennartsson, E.K.M. Macdonald, D.W. Padel, S. Tattersall, F.H. Wolfe, M.S. y Watson, C.A. (2001). Agronomic and environmental implications of organic farming systems *Advances in Agronomy*, 70 (2001), pp. 261-262.

- Stolze, M. Piorr, A. Häring, A. y Dabbert, S. (2000). The environmental impact of organic farming in Europe. *Organic Farming in Europe: Economics and Policy* 6. Stuttgart-Hohenheim, Germany.
- Struijs, J. Beusen, A. van Jaarsveld, H. Huijbregts, M.A.J. y (2009). Aquatic Eutrophication. Chapter 6 in: Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts MAJ, De Schryver A, Struijs J, Van Zelm R (2009) ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation factors, first edition.
- Sutherland, L.A. (2011). “Effectively organic”: Environmental gains on conventional farms through the market? *Land Use Policy*, 28(4): 815–824.
- Tatham, E. Eisenberg, D. y Linkov, I. (2014). Sustainable urban systems: a review of how sustainability indicators inform decisions. In: Linkov, I., Linkov, I. (Eds.), *Sustainable Cities and Military Installations*. Springer, Netherlands, 3-20.
- Taxidis, E.T. Menexes, G.C. Mamolos, A.P. Tsatsarelis, C.A. Anagnostopoulos, C.D. y Kalburtji, K.L. (2015). Comparing organic and conventional olive groves relative to energy use and greenhouse gas emissions associated with the cultivation of two varieties. *Appl. Energy*, 149: 117-124.
- TEEB. (2010). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Local and Regional Policy Makers*. H Wittmer (ed). London and Washington: Earthscan.
- Tittonell, P. (2014). Ecological intensification of agriculture — sustainable by nature. *Curr Opin Environ Sustain*, 8: 53-61.
- Torrellas, M. Antón, A. López, J.C. Baeza, E.J. Pérez-Parra, J. Muñoz, P. y Montero, J.I. (2012). LCA of a tomato crop in a multi-tunnel greenhouse in Almería. *Int. J. of Life Cycle Assess*, 17(7): 863-875.
- Tricase, C. Lamonaca, E. Ingraio, C. Bacenetti, J. y Giudice, A.L. (2018). A comparative Life Cycle Assessment between organic and conventional barley cultivation for sustainable agriculture pathways. *J. Clean. Prod*, 172: 3747-3759.
- Troullaki, K. Rozakis, S. Kostakis, V. (2021). Bridging barriers in sustainability research: A review from sustainability science to life cycle sustainability assessment. *Ecol Econ*, 184: 107007.
- Tsarouhas, P. Achillas, Ch. Aidonis, D. Folinas, D. y Maslis, V. (2015). Life Cycle Assessment of olive oil production in Greece. *J. Clean. Prod*, 93: 75-83.
- Tuomisto, H.L. Hodge, I.D. Riordan, P. y Macdonald, D.W. (2012). Does organic farming reduce environmental impacts? A meta-analysis of European research. *J. Environ. Manage*, 112: 309-320.
- UN-DSD. (United Nations Division for Sustainable Development) (2000). In: *Agenda 21*, 14, Promoting sustainable agriculture and rural development. United Nations (UN), New York.
- UN. (2001). *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies*. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development, New York.
- UN Environment/MAP. (2017). *Regional Action Plan On Sustainable Consumption And Production In The Mediterranean*. Athens, Greece. Available at:

- https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/20731/unepmap_SCPAP_eng_web.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- UNEP-SETAC. (2009). Guidelines for social life cycle assessment of products. United Nations Environment Programme.
- UNEP/SETAC (United Nations Environment Programme/Society of Environmental Toxicology and Chemistry). (2011). Towards a life cycle sustainability assessment: making informed choices on products. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, Belgium.
- Vecchio, R. (2013). Determinants of willingness-to-pay for sustainable wine: Evidence from experimental auctions. *Wine Econ. Policy*, 2: 85-92.
- Verheem, R. (2002). Recommendations for Sustainability Assessment in the Netherlands. In Commission for EIA. *Environmental Impact Assessment in the Netherlands. Views from the Commission for EIA. The Netherlands*; 2002.
- Vermeir, I. y Verbeke, W. (2006). Sustainable food consumption: Exploring the consumer “attitude-behavioral intention” gap. *J. Agric. Environ. Ethics*, 19(2): 169-194.
- Vladisavljević, V. y Vukasović, B. (2017). Contemporary costing systems, *Oditor- časopis za menadžment, finansije i pravo*, Centar za ekonomska i finansijska istraživanja, Beograd, 3(3): 133-151. [In Serbian: Владисављевић, В., & Вукасовић, Б. (2017). Савремени системи обрачуна трошкова].
- Wang, J.-J. Jing, Y.-Y. Zhang, C.-F. y Zhao, J.-H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision making. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 13: 2263-2278.
- WCED. (1987). *Our Common Future, Brundtland Report*. Brundtland. Available at: <https://doi.org/10.1002/jid.3380010208>
- Weidema, B.P. (2006). The integration of economic and social aspects in life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess*, 11: 89-96.
- Weidema, B.P. Bauer, C. Hischier, R. Mutel, C. Nemecek, T. Reinhard, J. Vadenbo, C. y Wernet, G. (2013). Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Wernet, G. Bauer, C. Steubing, B. Reinhard, J. Moreno-Ruiz, E. y Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess*, 21: 1218-1230.
- Yazdi, S.K. y Khanalizadeh, B. (2017). Air pollution, economic growth and health care expenditure. *Econ. Res.-Ekon. Istraz*, 30 (1): 1181-1190.
- Yu, M. y Halog, A. (2015). Solar photovoltaic development in Australia-A life cycle sustainability assessment study. *Sustainability*, 7: 1213-1247.
- Yunlong, C. y Smit, B. (1994). Sustainability in agriculture: a general review. *Agric Ecosyst Environ*, 49: 299-307.

- Zamagni, A. Buttol, P. Buonamici, R. Masoni, P. Guinée, J. Huppés, G. Heijungs, R. Van Der Voet, E. Ekvall, T. y Rydberg, T. (2009). D20 blue paper on life cycle sustainability analysis, deliverable 20 of work package 7 of the calcas project. Technical report, CALCAS.
- Zipori, I. Erel, R. Yermiyahu, U. Ben-Gal, A. y Dag, A. (2020). Sustainable Management of Olive Orchard Nutrition: A Review. *Agriculture*, 10, 11.
- Zouari, I. Mezghani, A. y Labidi, F. (2017). Flowering and heat requirements of four olive cultivars grown in the south of Tunisia. *ISHS Acta Horticulturae 1160: X International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management*, 231-236.
- Zribi, M.M. (2017). Les concessions fiscales et financières accordées aux investissements dans le secteur agricole - Les concessions accordées au secteur oléicole. Agence de Promotion des Investissements Agricoles. Document in Arabic.

ANEXOS

Anexo I

Fuentes de información en las fases de la investigación

Fases de la investigación	Análisis	Capítulo	Datos obtenidos	Fuentes de información
Fase 1: Evaluación general de la sostenibilidad de los sistemas de producción ecológico y convencional	Análisis multicriterio	6	Importancia de los criterios/sistemas de producción	Encuesta a expertos*
Fase 2: Evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera tradicional, ecológico, intensivo y súper-intensivo en Túnez mediante un marco integrado de herramientas de ciclo de vida y análisis de decisión multicriterio	Análisis del ciclo de vida	7, 8	Productividad	Encuesta de campo*; Larbi et al. (2017); IO (2017a)
			Equipo (maquinaria, diésel, lubricante, tiempo)	Encuesta de campo*; Masmoudi-Charfi et al. (2012); IO (2017b)
			Número de operaciones	Encuesta de campo*; IO (2017b); Masmoudi-Charfi et al. (2016)
			Consumo de agua	Encuesta de campo*; Masmoudi-Charfi et al. (2012)
			Electricidad	Encuesta de campo*
			Dosis (fertilizantes, pesticidas)	Encuesta de campo*; IO (2017b); Masmoudi-Charfi et al. (2016)
			Transporte	Encuesta de campo*
			Tratamiento de los residuos de poda	Encuesta de campo*
			Emisiones al aire	IPCC (2006); EEA (2013)
			Análisis de los costes del ciclo de vida	8
Precio de insumos/costes de las operaciones	Encuesta de campo*; APIA (2019); Mercado local			
Subvenciones	Zribi (2017); Onagri (2019); encuesta de campo			
Intereses y tasa de descuento	BCT (2020); Daly-Hassen et al. (2019)			
Seguros, gastos de mantenimiento	Encuesta de campo*; MAT (2017)			
Costes de reparación	Encuesta de campo*; ASABE (2015)			
Salario de los empleados	Encuesta de campo*			

Análisis social del ciclo de vida	8	Número de empleados	Encuesta de campo*; MAT (2017)
		Rendimiento de la mano de obra	Encuesta de campo*; Karray et al. (2000); Masmoudi-Charfi et al. (2016)
		Duración de las operaciones	Encuesta de campo*; IO (2017a,b)
		Importancia de los criterios/variedades de aceitunas	Encuesta a expertos*
Análisis multicriterio	8	Importancia de las dimensiones/categorías de impactos	Encuesta a expertos*

*Encuesta cara a cara a los agricultores

Anexo II

Cuestionario: Priorización de los criterios/alternativas para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional

Presentación

El objetivo de este trabajo es evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional en Túnez. El presente cuestionario tiene por objeto i) establecer un orden de prioridad de los criterios de sostenibilidad (económicos, sociales, ambientales) en función de su importancia en el contexto de la evaluación de la sostenibilidad del sector del olivar y ii) evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción olivarera ecológico y convencional en Túnez. Se trata de comparar un número determinado de criterios y sistemas por pares.

Por favor, puntúe la importancia de un criterio/sistema con respecto a otro basándose en la escala de comparación de Saaty (1980) (Tabla 1).

Ejemplo: (i) es extremadamente más importante que **(j)**: el indicador i toma un valor de importancia 9 con respecto al indicador j.

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
(i)	X																	(j)

La siguiente tabla proporciona una explicación de la escala de comparación.

Escala de comparación de Saaty

<i>Intensidad</i>	<i>Importancia</i>	<i>Explicación</i>
1	Igual	Ambos indicadores tienen la misma importancia
3	Moderado	Un indicador es ligeramente más importante que otro
5	Fuerte	Un indicador es significativamente más importante que el otro
7	Muy fuerte	Un indicador es mucho más importante que el otro
9	Extrema	El máximo nivel de importancia posible de un indicador con respecto a otro

1. Dimensión ambiental

1.1. Explicación de los criterios/objetivos

<i>Criterio</i>	<i>Explicación</i>
<i>1. Protección de la erosión del suelo</i>	Preservar el suelo limitando el efecto de la erosión hídrica o eólica y/o asegurando la presencia de una cubierta vegetal permanente
<i>2. Fertilidad del suelo</i>	Está relacionada con la gestión de la materia orgánica y la fertilización nitrogenada
<i>3. Recursos hídricos</i>	Buena gestión de este recurso por parte de los agricultores bajo el clima árido de la región
<i>4. Minimización del uso de pesticidas</i>	Reducción del uso de tratamientos químicos
<i>5. Biodiversidad</i>	La diversidad de plantas, animales y variedades genéticas de olivos puede contribuir a los ingresos económicos, minimizar los riesgos climáticos o sanitarios, aumentar la fertilidad del suelo y protegerlo de la erosión

1.2. Comparación de criterios ambientales por pares:

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<i>1. Protección de la erosión del suelo</i>																		<i>1. Fertilidad del suelo</i>
<i>1. Protección de la erosión del suelo</i>																		<i>3. Recursos hídricos</i>
<i>1. Protección de la erosión del suelo</i>																		<i>4. Minimización del uso de pesticidas</i>
<i>1. Protección de la erosión del suelo</i>																		<i>5. Biodiversidad</i>
<i>2. Fertilidad del suelo</i>																		<i>3. Recursos hídricos</i>
<i>2. Fertilidad del suelo</i>																		<i>4. Minimización del uso de pesticidas</i>
<i>2. Fertilidad del suelo</i>																		<i>5. Biodiversidad</i>
<i>3. Recursos hídricos</i>																		<i>4. Minimización del uso de pesticidas</i>
<i>3. Recursos hídricos</i>																		<i>5. Biodiversidad</i>
<i>4. Minimización del uso de pesticidas</i>																		<i>5. Biodiversidad</i>

2. Dimensión socio-territorial

2.1. Explicación de los criterios

<i>Criterio</i>	<i>Explicación</i>
<i>1. Contribución a la creación de empleo:</i>	Empleos directos e indirectos.
<i>2. Trabajo colectivo</i>	Participación en el trabajo colectivo desarrollado en el territorio. Esto supone solidaridad, mayor eficiencia, ahorro de escala y sinergias, etc.
<i>3. Compatibilidad con los valores socioculturales locales</i>	Compatibilidad de las prácticas agrícolas con los valores tradicionales de los productores y conformidad de los productos generados con los hábitos culinarios de los consumidores.
<i>4. Condiciones de trabajo</i>	Estado de salud laboral (higiene) y buenas condiciones de trabajo mediante: salario digno, seguridad social y participación en la formación
<i>5. Tasa de supervisión</i>	Refleja el interés del agricultor por mejorar la explotación a través del acceso a la información
<i>6. Enfoque de calidad</i>	Implantación de etiquetas de calidad para los alimentos reconocidos oficialmente
<i>7. Valor recreativo del entorno</i>	Pluriactividad asociada al sistema agrícola y relacionado con las actividades de ocio

2.2. Comparación de los criterios socio-territoriales por pares

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<i>1. Contribución a la creación de empleo:</i>																		<i>2. Trabajo colectivo</i>
<i>1. Contribución a la creación de empleo</i>																		<i>3. Compatibilidad con los valores socioculturales locales</i>
<i>1. Contribución a la creación de empleo</i>																		<i>4. Condiciones de trabajo</i>
<i>1. Contribución a la creación de empleo</i>																		<i>5. Tasa de supervisión</i>
<i>1. Contribución a la creación de empleo</i>																		<i>6. Enfoque de calidad</i>
<i>1. Contribución a la creación de empleo</i>																		<i>7. Valor recreativo del entorno</i>
<i>2. Trabajo colectivo</i>																		<i>3. Compatibilidad con los valores socioculturales locales</i>

3. Dimensión económica

3.1. Explicación de los indicadores económicos

<i>Criterio</i>	<i>Explicación</i>
<i>1. Ingresos</i>	Se refiere a los resultados financieros de la producción olivarera
<i>2. Estabilidad de los ingresos</i>	Se relaciona con la sostenibilidad del producto a medio-largo plazo
<i>3. Autonomía financiera</i>	Está relacionada con la independencia económica respecto a las deudas
<i>4. Fomento mediante subvenciones</i>	Este criterio refleja el índice de conocimiento del agricultor sobre las subvenciones existentes para la agricultura y el fomento estatal que se da a cada sistema de producción.
<i>5. Accesibilidad al mercado</i>	Relaciona la accesibilidad al mercado y la valorización a través del circuito corto de comercialización.

3.2. Comparación de criterios económicos por pares

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<i>1. Ingresos</i>																		<i>2. Estabilidad de los ingresos</i>
<i>1. Ingresos</i>																		<i>3. Autonomía financiera</i>
<i>1. Ingresos</i>																		<i>4. Fomento mediante subvenciones</i>
<i>1. Ingresos</i>																		<i>5. Accesibilidad al mercado</i>
<i>2. Estabilidad de los ingresos</i>																		<i>3. Autonomía financiera</i>
<i>2. Estabilidad de los ingresos</i>																		<i>4. Fomento mediante subvenciones</i>
<i>2. Estabilidad de los ingresos</i>																		<i>5. Accesibilidad al mercado</i>

4. Dimensiones de la sostenibilidad (económica, social, ambiental)

Habiendo evaluado los criterios anteriores, en su opinión, ¿cuál es la dimensión más importante (a la que se debe dar prioridad) en el contexto de la sostenibilidad de la olivicultura tunecina? (X junto a la dimensión más importante según el grado de esta importancia).

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<i>1. Dimensión ambiental</i>																		<i>1. Dimensión socio-territorial</i>
<i>1. Dimensión ambiental</i>																		<i>3. Dimensión económica</i>
<i>1. Dimensión social</i>																		<i>3. Dimensión económica</i>

5. Alternativas: Sistemas de producción olivarera ecológico y convencional

Habiendo evaluado los criterios/dimensiones anteriores, en su opinión, ¿cuál es la alternativa (ecológico/convencional) que tiene mejor desempeño en satisfacer los criterios de cada dimensión (a la que se debe dar más prioridad) en el contexto de la sostenibilidad de la olivicultura tunecina? (X junto a la alternativa más importante según el grado de esta importancia).

5.1. Criterios ambientales

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<i>Criterio</i>	<i>Ecológico</i>										<i>Convencional</i>							
<i>1. Protección de la erosión del suelo</i>																		
<i>2. Fertilidad del suelo</i>																		
<i>3. Recursos hídricos</i>																		

4. <i>Minimización del uso de pesticidas</i>																		
5. <i>Biodiversidad</i>																		

5.2. Criterios socio-territoriales

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Ecológico									Convencional								
1. <i>Contribución a la creación de empleo:</i>																		
2. <i>Trabajo colectivo</i>																		
3. <i>Compatibilidad con los valores socioculturales locales</i>																		
4. <i>Condiciones de trabajo</i>																		
5. <i>Tasa de supervisión</i>																		
6. <i>Enfoque de calidad</i>																		
7. <i>Valor recreativo del entorno</i>																		

5.3. Criterios económicos

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Criterio	<i>Ecológico</i>									<i>Convencional</i>								
1. Ingresos																		
2. Estabilidad de los ingresos																		
3. Autonomía financiera																		
4. Fomento mediante subvenciones																		
5. Accesibilidad al mercado																		

Datos de la persona entrevistada

Nombre y apellido: _____

Nombre de su organización/empresa: _____

Cargo en su organización/empresa: _____

Área de conocimiento: _____

Teléfono/email: _____

Anexo III

Cuestionario: Priorización de los cultivares de aceitunas

Presentación

El objetivo de este trabajo es evaluar la categoría de impacto “las tradiciones agronómicas” (AT) en los sistemas de producción olivarera. La categoría AT tiene como objetivo evaluar el impacto agronómico en el contexto agroclimático tunecino de los cultivares utilizados en los sistemas de cultivo del olivo: el cultivar local ("chemlali") cultivado en los sistemas tradicionales frente a los cultivares extranjeros ("arbosana" y "arbequina") los sistemas innovadores de alta densidad. Se consideraron seis criterios para clasificar el impacto del ciclo de vida de los cultivares de olivo en el contexto tunecino: rendimiento de la aceituna y del aceite, calidad del aceite, resistencia a la sequía y a la salinidad y vida útil. Se trata de comparar la importancia de estos criterios por pares en el contexto de la sostenibilidad del olivar tunecino y luego se comparan los cultivares con respecto a la satisfacción de cada criterio.

Por favor, puntúe la importancia de un criterio/cultivar con respecto a otro basándose en la escala de comparación de Saaty (1980) (Tabla 1).

Ejemplo: (i) es extremadamente más importante que (j): el criterio i toma un valor de importancia 9 con respecto al indicador j.

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
(i)	X																	(j)

La tabla 1 proporciona una explicación de la escala de comparación.

Tabla 1. Escala de comparación de Saaty

Intensidad	Importancia	Explicación
1	Igual	Ambos indicadores tienen la misma importancia
3	Moderado	Un indicador es ligeramente más importante que otro
5	Fuerte	Un indicador es significativamente más importante que el otro
7	Muy fuerte	Un indicador es mucho más importante que el otro
9	Extrema	El máximo nivel de importancia posible de un indicador con respecto a otro

1. Comparación de criterios de la evaluación de la categoría AT por pares

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1. Rendimiento de la aceituna																		2. Rendimiento de del aceite
1. Rendimiento de la aceituna																		3. Calidad del aceite
1. Rendimiento de la aceituna																		4. Resistencia a la sequía
1. Rendimiento de la aceituna																		5. Resistencia a la salinidad
1. Rendimiento de la aceituna																		6. Vida útil
2. Rendimiento de del aceite																		3. Calidad del aceite
2. Rendimiento de del aceite																		4. Resistencia a la sequía
2. Rendimiento de del aceite																		5. Resistencia a la salinidad
2. Rendimiento de del aceite																		6. Vida útil
3. Calidad del aceite																		4. Resistencia a la sequía
3. Calidad del aceite																		5. Resistencia a la salinidad
4. Resistencia a la sequía																		5. Resistencia a la salinidad
4. Resistencia a la sequía																		6. Vida útil
5. Resistencia a la salinidad																		6. Vida útil

2. Comparación de los cultivares por pares

2.1. Chemlali x Arbosana

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Chemlali									Arbosana								
1. Rendimiento de la aceituna																		
2. Rendimiento de del aceite																		
3. Calidad del aceite																		
4. Resistencia a la sequía																		
5. Resistencia a la salinidad																		
6. Vida útil																		

2.2. Chemlali x Arbequina

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Chemlali									Arbequina								
1. Rendimiento de la aceituna																		
2. Rendimiento de del aceite																		
3. Calidad del aceite																		
4. Resistencia a la sequía																		
5. Resistencia a la salinidad																		
6. Vida útil																		

2.3. Arbosana x Arbequina

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	Arbosana										Arbequina								
1. Rendimiento de la aceituna																			
2. Rendimiento de del aceite																			
3. Calidad del aceite																			
4. Resistencia a la sequía																			
5. Resistencia a la salinidad																			
6. Vida útil																			

Datos de la persona entrevistada

Nombre y apellido: _____

Nombre de su organización/empresa: _____

Cargo en su organización/empresa: _____

Teléfono/email: _____

Anexo IV

Cuestionario: Priorización de las categorías de impacto para evaluar la sostenibilidad del cultivo de olivar en Túnez

Presentación

El objetivo de este trabajo es evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción de aceitunas en Túnez. El presente cuestionario tiene por objeto establecer un orden de prioridad de los indicadores de sostenibilidad (económicos, sociales, ambientales) en función de su importancia en el contexto de la evaluación de la sostenibilidad en general y de los sistemas olivareros en Túnez en particular. Se trata de comparar un número determinado de indicadores por pares.

Por favor, puntúe la importancia de un indicador con respecto a otro basándose en la escala de comparación de Saaty (1980) (Tabla 1).

Ejemplo: (i) es extremadamente más importante que (j): el indicador i toma un valor de importancia 9 con respecto al indicador j.

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
(i)	X																	(j)

La tabla 1 proporciona una explicación de la escala de comparación.

Tabla 1. Escala de comparación de Saaty

<i>Intensidad</i>	<i>Importancia</i>	<i>Explicación</i>
1	Igual	Ambos indicadores tienen la misma importancia
3	Moderado	Un indicador es ligeramente más importante que otro
5	Fuerte	Un indicador es significativamente más importante que el otro
7	Muy fuerte	Un indicador es mucho más importante que el otro
9	Extrema	El máximo nivel de importancia posible de un indicador con respecto a otro

1. Dimensión ambiental

1.1. Explicación de los indicadores

<i>Indicador</i>	<i>Explicación</i>
1. Cambio climático / huella de carbono	Calentamiento global calculando el forzamiento radiativo en un horizonte temporal de 100 años (causado por un sistema de producción de aceitunas)
2. Ecotoxicidad del agua dulce	Unidad de Toxicidad Ecosistémica Comparativa - que expresa una estimación de la fracción de las especies potencialmente afectadas integradas a lo largo del tiempo y el volumen por la sustancia química emitida.
3. Uso de la tierra (cambio en la materia orgánica del suelo)	Basado en el cambio de la materia orgánica en el suelo.
4. Agotamiento de los recursos hídricos	La escasez de agua. Cantidad de agua utilizada ajustada a la escasez.

1.2. Comparación de indicadores ambientales por pares

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1. Cambio climático / huella de carbono																		2. Ecotoxicidad del agua dulce
1. Cambio climático / huella de carbono																		3. Uso de la tierra (cambio en la materia orgánica del suelo) Indicador
1. Cambio climático / huella de carbono																		4. Agotamiento de los recursos hídricos
1. Ecotoxicidad del agua dulce																		3. Uso de la tierra (cambio en la materia orgánica del suelo) Indicador
2. Ecotoxicidad del agua dulce																		4. Agotamiento de los recursos hídricos
3. Uso de la tierra (cambio en la materia orgánica del suelo) Indicador																		4. Agotamiento de los recursos hídricos

2. Dimensión social

2.1. Explicación de los indicadores

<i>Indicador</i>	<i>Explicación</i>
1. Creación de empleo	El potencial de un proyecto para ofrecer oportunidades de empleo
2. Toxicidad/salud humana	Toxicidad humana/efectos cancerígenos, expresa el aumento estimado de la morbilidad en la población humana total por unidad de masa de una sustancia química emitida.
3. Preservación del patrimonio agronómico/genético	Conservación de los recursos genéticos locales (variedades). Algunos sistemas utilizan variedades foráneas (intensivos y súper-intensivos).

2.2. Comparación de los indicadores sociales por pares

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1. Creación de empleo																		1. Toxicidad/salud humana
1. Creación de empleo																		3. Preservación del patrimonio agronómico/genético
2. Toxicidad/salud humana																		3. Preservación del patrimonio agronómico/genético

3. Dimensión económica

3.1. Explicación de los indicadores económicos

<i>Indicador</i>	<i>Explicación</i>
1. Valor actual neto (NPV)	El Valor Actual Neto (VAN) es una medida de la rentabilidad de una inversión calculada como la suma de los flujos de efectivo generados por la transacción, cada uno de los cuales se descuenta para reducir su importancia en esta suma a medida que va perdiendo importancia con el tiempo.
2. La tasa interna de retorno (IRR)	La tasa interna de retorno (TIR) es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto.

3.2. Comparación de indicadores económicos por pares

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1. Valor actual neto (NPV)																		2. Tasa interna de retorno (TIR)

4. Dimensiones de la sostenibilidad (económica, social, ambiental)

Habiendo evaluado los indicadores anteriores, en su opinión, ¿cuál es la dimensión más importante (a la que se debe dar prioridad) en el contexto de la sostenibilidad de la oleicultura tunecina? (X junto a la dimensión más importante según el grado de esta importancia).

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1. Dimensión ambiental																		2. Dimensión social
1. Dimensión ambiental																		3. Dimensión económica
2. Dimensión social																		3. Dimensión económica

Datos de la persona entrevistada

Nombre y apellido: _____

Nombre de su organización/empresa: _____

Cargo en su organización/empresa: _____

Teléfono/email: _____

Anexo V

Cuestionario: Identificación del ciclo característico de la producción de aceitunas

DETALLES DE LA ENTREVISTA	
Número	
Fecha	
DATOS DEL EXPERTO/AGRICULTOR	
Nombre	
Número de teléfono	
Dirección de correo electrónico	

1. DETALLES DEL AGRICULTOR	
Edad	
Nivel de estudios	
Formación	
Fecha de la adquisición de la finca	

2. INFORMACIÓN GENERAL / DETALLES DE CULTIVO

1.1 Posición geográfica			
1.2 Cultivar			
1.3 Superficie			
1.4 Numero de arboles			
1.5 Edad de las plantaciones			
1.6 Densidad de plantación (disposición de los huertos)			
1.7 Calidad de las plantas			
1.8 Número de plantas (inicial)			
1.9 Distancia vivero/finca			
1.10 Control de las malas hierbas	Mecánico / Herbicidas		
1.11 Control fitosanitario (Técnica)			
1.12 Fases del ciclo de vida (años)	<i>Fase juvenil (FJ)=</i>	<i>Fase de crecimiento (FC)=</i>	<i>Fase de incremento de producción (FIP1)=</i> <i>Fase de incremento de producción (FIP1) =</i> <i>Fase de plena producción (FPP)=</i>

3. MANEJO DE SUELO/FASE DEL CICLO DE VIDA a	Plantación	FJ	FC	FIP1	FIP2	FPC
3.1 ¿Aplicable?	SI/NO					
3.2 Método						
3.3 Equipo usado						
3.4 Coste de adquisición (DT)						
3.5 Tipo de maquinaria (nombre y marca)						
3.6 Coste de adquisición (DT)						
3.7 Potencia						
3.8 Frecuencia (No/año)						
3.9 Número de horas/operación/ha						
3.10 Cantidad de diésel (T o L/Ha)						
3.11 Precio unitario: DT/T o/Ha						
3.12 Cantidad de aceite lubricante (T o L/Ha)						
3.11 Precio unitario: DT/T o/Ha						
3.13 Cantidad de mano de obra (DT)						
3.14 Coste de mano de obra (DT)						

4. FERTILIZANTES/FASE DEL CICLO DE VIDA a	<i>Plantación</i>	<i>FJ</i>	<i>FC</i>	<i>FIP1</i>	<i>FIP2</i>	<i>FPC</i>
4.1 ¿Aplicable?	SI/NO					
4.2 Fertilizante (nombre o tipo)						
4.3 Origen de los fertilizantes						
4.4 Distancia (Km)						
4.5 Medio de transporte (tipo y peso bruto para el transporte por carretera)						
4.6.Coste del transporte						
4.7 Frecuencia de aplicación (no/año)						
4.8 Cantidad aplicada cada vez (Kg)						
4.9 Cantidad aplicada al año (kg/año)						
3.10 Coste de compra: DT/T o/Kg						
4.11 Método de aplicación						
4.12 Medio de aplicación						
4.13 Equipo usado						
4.14 Coste de adquisición (DT)						
4.15 Número de horas/operación/ha						
4.16 Cantidad de diésel (T o L/Ha)						
4.17 Precio unitario: DT/T o/Ha						
4.18 Cantidad de aceite lubricante (T o L/Ha)						
4.19 Precio unitario: DT/T o/Ha						
4.20 Cantidad de mano de obra (DT)						
4.21 Coste de mano de obra (DT)						

5. PESTICIDAS/FASE DEL CICLO DE VIDA a	<i>Plantación</i>	<i>FJ</i>	<i>FC</i>	<i>FIP1</i>	<i>FIP2</i>	<i>FPC</i>
5.1 ¿Aplicable?	SI/NO					
5.2 Pesticida (nombre o tipo)						
5.3 Origen de los fertilizantes						
5.4 Distancia (Km)						
5.5 Medio de transporte (tipo y peso bruto para el transporte por carretera)						
5.6.Coste del transporte						
5.7 Frecuencia de aplicación (no/año)						
5.8 Cantidad aplicada cada vez (Kg)						
5.9 Cantidad aplicada al año (kg/año)						
5.10 Coste de compra: DT/T o/Kg						
5.11 Método de aplicación						
5.12 Medio de aplicación						
5.13 Equipo usado						
5.14 Coste de adquisición (DT)						
5.15 Número de horas/operación/ha						
5.16 Cantidad de diésel (T o L/Ha)						
5.17 Precio unitario: DT/T o/Ha						
5.18 Cantidad de aceite lubricante (T o L/Ha)						
5.19 Precio unitario: DT/T o/Ha						
5.20 Cantidad de mano de obra (DT)						
5.21 Coste de mano de obra (DT)						

6. HERBICIDAS/FASE DEL CICLO DE VIDA a	<i>Plantación</i>	<i>FJ</i>	<i>FC</i>	<i>FIP1</i>	<i>FIP2</i>	<i>FPC</i>
6.1 ¿Aplicable?	SI/NO					
6.2 Fertilizante (nombre o tipo)						
6.3 Origen de los fertilizantes						
6.4 Distancia (Km)						
6.5 Medio de transporte (tipo y peso bruto para el transporte por carretera)						
6.6.Coste del transporte						
6.7 Frecuencia de aplicación (no/año)						
6.8 Cantidad aplicada cada vez (Kg)						
6.9 Cantidad aplicada al año (kg/año)						
6.10 Coste de compra: DT/T o/Kg						
6.11 Método de aplicación						
6.12 Medio de aplicación						
6.13 Equipo usado						
6.14 Coste de adquisición (DT)						
6.15 Número de horas/operación/ha						
6.16 Cantidad de diésel (T o L/Ha)						
6.17 Precio unitario: DT/T o/Ha						
6.18 Cantidad de aceite lubricante (T o L/Ha)						
6.19 Precio unitario: DT/T o/Ha						
6.20 Cantidad de mano de obra (DT)						
6.21 Coste de mano de obra (DT)						

7. AGUA DE RIEGO/FASE DEL CICLO DE VIDA a	FJ	FC	FIP1	FIP2	FPC
7.1 ¿Aplicable?					
7.2 Origen del agua					
7.3 Cualidad (salinidad g/l)					
7.4 Método de riego					
7.5 Distancia del cultivo a la fuente (metros)					
7.6 Tipos de equipos mecánicos (por ejemplo, bombas)					
7.7 Costes de adquisición (DT)					
7.8 Frecuencia de riego (no/año)					
7.9 Cantidad de agua consumida cada vez (m3)					
7.10 Cantidad de agua consumida al año (m3/año)					
7.11 Cantidad de consumo de electricidad					
7.12 Costes de riego (DT)					
7.13 Cantidad de mano de obra (DT)					
7.14 Costes de mano de obra (DT)					

8. PODA Y RESIDUOS/FASE DEL CICLO DE VIDA A	FJ	FC	FIP1	FIP2	FPC
8.1 ¿Aplicable?					
8.2 Frecuencia de aplicación (no/año)					
8.3 Método de aplicación					
8.4 Árboles podados					
8.5 Equipo usado					
7.6 Costes de adquisición (DT)					
8.6 Maquinaria usada					
8.7 Costes de adquisición (DT)					
8.8 Número de horas/operación/ha					
8.9 Cantidad de diésel (T o L/Ha)					
8.10 Precio unitario: DT/T o/Ha					
8.11 Cantidad de aceite lubricante (T o L/Ha)					
3.12 Precio unitario: DT/T o/Ha					
8.13 Cantidad de residuos (T/Ha)					
8.14 Método de manejo de residuos					
8.15 Número de horas/operación/ha					
8.16 Cantidad de diésel (T o L/Ha)					
8.17 Cantidad de aceite lubricante (T o L/Ha)					
8.18 Cantidad de mano de obra (DT)					
8.19 Costes de mano de obra (DT)					

9. RECOLECCIÓN/FASE DEL CICLO DE VIDA A	FJ	FC	FIP1	FIP2	FPC
9.1 Producción (Kg o T/Ha)					
9.2 Precio unitario de venta: DT/T o/Ha					
9.3 Método de recolección					
9.4 Equipo usado					
9.5 Costes de adquisición (DT)					
9.6 Tipo de maquinaria (nombre y marca)					
9.7 Costes de adquisición (DT)					
9.8 Cantidad de diésel (T o L/Ha)					
9.9 Precio unitario: DT/T o/Ha					
9.10 Cantidad de aceite lubricante (T o L/Ha)					
9.11 Distancia (finca/almazara)					
9.12 Medio de transporte (tipo y peso bruto para el transporte por carretera)					
9.13 Cantidad de diésel (T o L/Ha)					
9.14 Cantidad de aceite lubricante (T o L/Ha)					
9.15 Equipos usados en la recolección					
9.16 Costes de adquisición (DT)					
9.17 Cantidad de mano de obra (DT)					
9.18 Costes de mano de obra (DT)					

Anexo VI. Artículos publicados

Artículo 1

A sustainability comparative assessment of Tunisian organic and conventional olive growing systems based on the AHP methodology

Saker Ben Abdallah, Saida Elfkih, Carlos Parra-López

NEW MEDIT, 2018, 3: 51-68

Title: A sustainability comparative assessment of Tunisian organic and conventional olive growing systems based on the AHP methodology

ABSTRACT

This work aims to assess, in a comparative way, the sustainability of organic and conventional olive growing systems in the Sfax region (Tunisia). This assessment will be undertaken based on i) a multidimensional perspective considering the three classical dimensions of sustainability – environmental, economic and socio-territorial – and ii) on an experts' knowledge approach selecting the adequate criteria of sustainability to compare both systems. The Analytic Hierarchy Process methodology (AHP) was applied as the adequate framework to fulfil the study objectives based on a survey directed with a panel of 20 Experts. Results suggest the need to reinforce the economic performance of organic olive growing production system through political strategies focusing on i) the improvement of the productivity by the implementation of good practices ii) the increase of the demand of organic products in the local market, essentially by the improvement of the consumer's purchase capacity and iii) the adoption of a strategic plan to explore new markets.

Key words: Criteria; Experts' knowledge; multidimensional perspective; Sfax.

Résumé

Ce travail a pour but d'évaluer, d'une manière comparative, la durabilité des systèmes oléicoles biologiques et conventionnels dans la région de Sfax (Tunisie). Cette évaluation sera effectuée en se basant sur i) une perspective multidimensionnelle considérant les trois dimensions classiques de la durabilité : environnementale, économique et socio-territoriale et ii) sur la connaissance des experts dans la sélection des critères de durabilité les plus adéquats. Pour répondre aux objectifs du travail, la méthodologie AHP (Analytic Hierarchy Process) a été entreprise avec un panel de 20 experts. Les résultats suggèrent la nécessité de renforcer la performance économique du système de production oléicole biologique à travers des stratégies axées sur i) l'amélioration de la productivité à travers l'application des bonnes pratiques agricoles ii) le renforcement du marché local des produits biologiques tout en améliorant la capacité d'achat des consommateurs et iii) l'adoption d'un plan stratégique permettant d'explorer de nouveaux marchés.

Mots clés: Critères, la connaissance des experts; perspective multidimensionnelle; Sfax.

1. Introduction

Nowadays, it is widely accepted by the scientific community, decision makers and farmers that modern agriculture must meet new challenges such as the production of healthy food, adaptation to climate change, protection of natural resources, and conservation of landscape (Carof et al., 2013). These challenges point out the multifunctional role of agriculture and the sustainability concept. In this context, multifunctionality refers to the multiple functions that society assigns to and demands from agriculture. The preservation of a multifunctional agriculture may lead to more sustainable growing systems. Thus, sustainability is a multi-dimensional and multi-criteria concept that entails a set of economic, social, and environmental issues (Elfkih et al., 2012).

For many decades, conventional agriculture has imposed many negative externalities upon society, through land and water resources overuse, biodiversity loss, erosion, non controlled use of pesticides, and assorted other problems. In contrast to this system, organic agriculture represents a deliberate attempt to make the best sustainable use of natural resources. In fact, the negative effects associated with intensive systems were the main motivations of an increasing social demand for more sustainable production systems. This has led to a big expansion of the international organic market, even in countries that were suppliers for developed countries (Callieris et al., 2016), making of organic farming a more attractive activity to producers. In this context, sustainability can be closely linked to organic farming— one of the most viable growing systems which has been rapidly extended in the past two decades in many countries (Rigby and Cáceres, 2001).

In Tunisia, organic farming is an activity that goes back to late 90s. In fact, specific interest was allocated to organic farming with the initiative of a group of motivated and innovative farmers and supported by political commitment. Thus, in 1999, a specific regulation was established setting rules governing production and organic farming control (Tunisian Regulation N° 99-30 of 5 April 1999). The Tunisian system of production and control measures for organic production are recognized as equivalent to those laid down in Regulation (EC) No 834/2007 ((EC) No 537/2009). In Tunisia, organic farming is a very interesting activity covering a surface of 198.000 ha in 2015. Olive growing is the main organic agriculture activity with 148.000 ha representing almost 75% of total national organic area. Sfax is one of the most important olive growing Tunisian regions retaining 23% of national olive oil production which is mostly exploited under the conventional system. The conventional production system has many

adverse environmental effects, especially the degradation of soil organic matter in the Sfax region (Rivals, 1961). Sfax is also one of the most organic olive oil producers with 5872 tons representing the 22% of the overall national production of organic olive oil for the period 2011-2015 (Data of the Tunisian Ministry of Agriculture).

Despite the positive evolution of organic farming, many questions were raised about the overall sustainability of these production systems: highlighting possible conflicts between the optimisation of economic profitability, environment protection and the improvement of social wellbeing. Bringing about such a balance requires optimizing a range of agronomic, environmental and socio-economic outcomes from agricultural systems (Kanter et al., 2016). In fact, many researchers consider that research on sustainability assessment in agriculture has so far poorly addressed multi-functionality in agriculture and has favoured the ecological aspect of sustainability instead of aiming at a balance between the ecological, economic and social dimensions, and neglected the knowledge of utilizing the results of assessments to achieve their implementation (Binder et al., 2010; Bezlepkina et al., 2011). For this reason, starting a study considering the three dimensions of sustainability seems to be very interesting to design more mitigation-oriented strategies.

In the case of olive growing systems, a few studies have followed a more explicitly holistic approach, such as those of Parra-López et al. (2008), Laajimi and Ben Nasr (2009), Gómez-Limón and Arriaza-Balmón (2011), Elfkih et al. (2012), and Carmona-Torres et al. (2014). These researches reveal the specificities of each studied case. So, there is not one farm sustainability model which can be applied to all the cases. Therefore, each local farming situation involves a set of sustainability indicators and involves an adapted theoretical framework.

To assess the sustainability of particular agricultural systems, a multi-criteria analysis can be implemented. In all complex multi-criteria approaches, evaluating sustainability poses problems of high complexity, uncertainty and risk. The AHP methodology is proposed as an adequate multi-criteria framework to mitigate weaknesses and disadvantages of other indicators' methods such as Farm Sustainability Indicators method (IDEA). Thus, the AHP method has the advantage of providing an aggregated overall sustainability whereas the overall sustainability in the IDEA method is based on the rule of key constraint (the lowest value of the three sustainability scales: economic, social and environmental is used as the final numerical sustainability) (Elfkih et al., 2012). Indeed, in this study, the AHP method seems to be one of

the most adapted theoretical frameworks and one of the most powerful methods providing adequate responses to the multifunctionality and the sustainability evaluation of agricultural production systems for at least two reasons: i) AHP is a discrete multi-criteria analysis method dealing with the complex decision- making of multiple agents in a context of high conflict of interests as this case study ii) AHP allows the achievement of an overall aggregated sustainability evaluation.

The main purpose of this paper is to assess the sustainability of both organic and conventional olive growing systems in the Sfax region through the AHP method. To fulfill this objective, the paper will be organized as follows. The next section presents the material and methods with a special focus on the implemented AHP model. The third section includes a presentation and a discussion of the main results obtained. Finally, conclusions and recommendations are highlighted.

2. Material and methods

This paper aims to assess the sustainability and the current state of both organic and conventional olive growing systems in the Sfax region by prioritizing the olive production methods established by a sample of experts using AHP. Therefore, the results could provide a scientific basis for endorsing institutional support for the promotion and implementation of a farming system with a greater value for society, both for present and future generations.

To fulfil the outlined objectives, a well-defined approach is needed to assess sustainability and to structure the problem: from the setting of the goal to the sensitivity analysis. Thus, we distil agricultural sustainability analysis into four steps: 1) Structuring the decision problem and identifying the specific-context of needed criteria to assess agricultural sustainability 2) Selecting the method for generating score of criteria and alternatives across different dimensions 3) Assignment and comparison of criteria values with decision-makers (experts' knowledge) 4) A sensitivity analysis for delimiting the most sensitive farming functions, i.e. those with the highest potential to affect the sustainability of olive growing at farm-level.

The selection of sustainability criteria in the current study has been founded mainly on experts' knowledge of olive growing farms in the Sfax region. In fact, experts were consulted in both steps: the selection of criteria and the evaluation of the two systems. Thus, experts are acquainted with specific characteristics of the region (socio-economic, agronomic sectors and edapho-climatic conditions etc.), and they have enough expertise to resolve the quantification

complexity of the environmental and socio-economic impact of the two systems through the AHP method.

2.1. The study area

The olive growing area in the Sfax region is currently estimated at about 340 700 hectares, representing approximately 19.5% of the national total area. It has contributed to approximately 23% of the national production of olive oil during the past decade (2006-2015) with an average estimated at 45 000 tons of olive oil (Ben Abdallah, 2015). Sfax is also the most important Tunisian organic olive growing region in surface area and production. The olive growing sector is the locomotive of organic farming in the Sfax region with 22 300 ha (about 18% of organic olive growing area in Tunisia) (Statistics of the Tunisian Agricultural Ministry). Despite this positive growth and favorable conditions, only a small share of the total agricultural land is under organic agriculture (2.1%). In this perspective, it is important to test the highest multifunctional value of the alternative farming systems compared to the conventional one.

2.2. Research method: AHP methodology

The AHP (Saaty, 1980) is an intuitively easy method for the practical resolution of complex decision-making problems that involves the prioritization of potential alternate solutions. Several papers have compiled the AHP success stories in very different fields (Ishizaka and Labib, 2009). In regard to the sustainability assessment field, Cinelli et al. (2014) showed that Multi Attribute Utility Theory (MAUT) and AHP are fairly simple to understand and have good software support compared to other methods such as: Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE), Elimination and Choice Expressing Reality (ELECTRE) and Dominance-based Rough Set Approach (DRSA).

The software widely used in AHP applications is the “Expert Choice”. The AHP and expert choice softwares engage decision makers in structuring a decision as a multi-level hierarchical model (AHP model), proceeding from the goal to objectives to sub-objectives down to the most basic elements of the problem (alternatives). Decision makers, then, make simple pair-wise comparison judgments between elements for each level of the hierarchy (objectives, sub-objectives) for their importance with respect to each of the elements in a higher stratum to arrive at alternatives. These comparisons are used to obtain the weights or priorities of importance of the decision elements and performance of alternatives. This process ends with the synthesis to determine the best alternative.

In our case study, the decision-makers' panel was of 20 experts specialized on olive growing systems from the Sfax region. The experts were divided into two groups according to the personal knowledge of each production system in the following way: 10 experts specialized in the conventional olive system and 10 experts specialized in the organic olive system. It must be pointed out that these participants have a large experience in both study fields (organic and conventional) but they were divided according to their preferences and their most important expertise areas. Listed by profession, 8 were private farmers-engineers (olive growers), 2 researchers from public research centers, 7 practitioners-engineers of the olive growing sector in State Lands and 3 government employees.

Relying on the experts, judgement has limits, mainly due to subjectivity, and divergence of opinions may emerge. To deal with this issue and evaluate its effect on the results obtained, a "Relative Global Agreement index" (RGA index) was calculated. It was developed by a researchers group from the Department of Agricultural Economics and Sociology of the Institute of Agricultural and Fisheries Research and Training of Granada (Spain). This index measures the consensus gradient between the opinions of two stakeholder groups involved in the decision-making process (Parra-López et al. 2007).

The steps of AHP, from building the decision model to giving alternatives' priorities, are as shown below:

2.2.1. The AHP model

To fulfil the study objectives; the selection of evaluation sub-criteria in each sustainability dimension (economic, socio-territorial and environmental) were based on: (i) an accurate revision of the scientific literature related to the context of sustainable development specific to the situation of the olive-growing sector in Tunisia and particularly in the Sfax region; and (ii) a panel of experts on conventional and organic olive growing specialists was selected to act as the decision group. The decision group formulates the AHP decision hierarchy based on the selection of the most relevant criteria and indicators. These criteria ought to be the more significant: in revealing the socio-economic and environmental strengths and/or weaknesses of each system and to establish, if needed, an extension program for the diffusion of innovative olive production methods. Figure 1 depicts the hierarchical model for selection of olive-growing production systems. The following is the meaning in short of the sub-objectives (sub-criteria):

Economic objectives. I.1. Income: This refers to the financial results of olive growing. I.2. Income Stability: It is related to product sustainability in the medium-long term. I.3. Financial autonomy: It is related to economic independence with respect to debts. I.4. Encouragement by subsidies: This criterion reflects the rate of the farmer's knowledge of the existing subsidies for agriculture and the State encouragement provided to each production system. I.5. Market accessibility: It relates market accessibility and valorization through short marketing circuit.

Socio-territorial objectives. II.1. Contribution to employment creation: Direct and indirect jobs. II.2. Collective work: Participation in collective work developed within the territory. This entails solidarity, better efficiency, saving of scale and synergies, etc. II.3. Compatibility with local socio-cultural values: Compatibility of the farming practices with producers' traditional values and the conformity of generated products with consumers' culinary habits. II.4. Work conditions: Work health status (hygiene) and good working conditions through: decent salary, social security and involvement in training. II.5. Supervision rate: This reflects the interest of the farmer to improve the farm through access to information. II.6. Quality approach: Implementation of quality labels for food officially recognized. II.7. Recreational value of the environment: Multi-activity associated to agricultural systems and related to leisure activities.

Environmental objectives. III.1. Protection from soil erosion: Preserving the ground by limiting the effect of water or wind erosion and/or ensuring the presence of a permanent plant cover. III.2. Soil fertility: It is related to the management of organic matter and nitrogen fertilization. III.3. Water resources: Good management of this resource by farmers under the arid climate of the region. III.4. Minimization of the use of pesticides: Reducing the use of chemicals treatments. III.5. Biodiversity: The Diversity of plants, animals and genetic varieties of olive-trees can contribute to the economic income, minimize climatic or health risks, increase soil fertility and protect the soil from erosion.

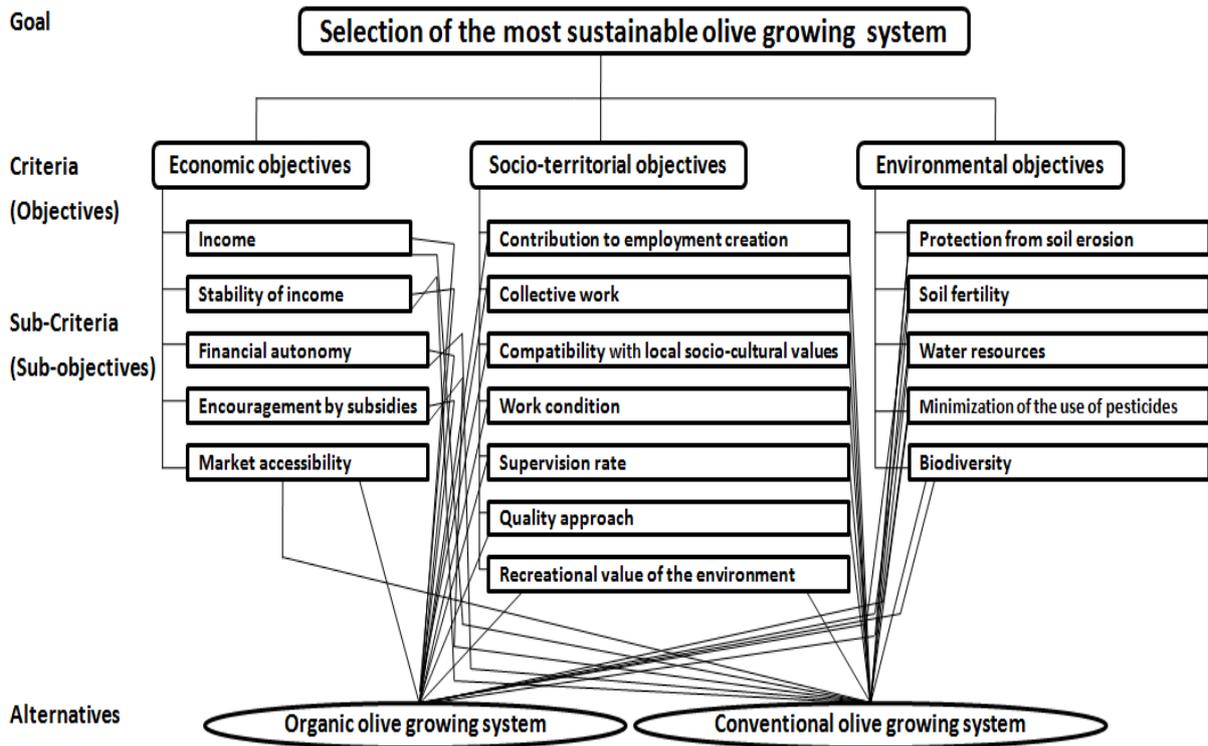


Figure 1. The AHP model for selecting of the most sustainable olive growing system

2.2.2. Pair-wise comparison

Once the model had been built, the next step was to evaluate the elements by making a Pair-wise Comparison (PC). At each level of the hierarchy, experts had individually performed a PC between two elements (i, j) with respect to another element in the level above. PC was carried out through the model to establish priorities while respecting the rating scale proposed by AHP (Figure 2). Expert Choice has three modes of PC assessment: verbal, graphical and numerical. Numerical judgments were made using a nine-point scale (Figure 2), which represents how many times one element is more important than another (www.expertchoice.com).

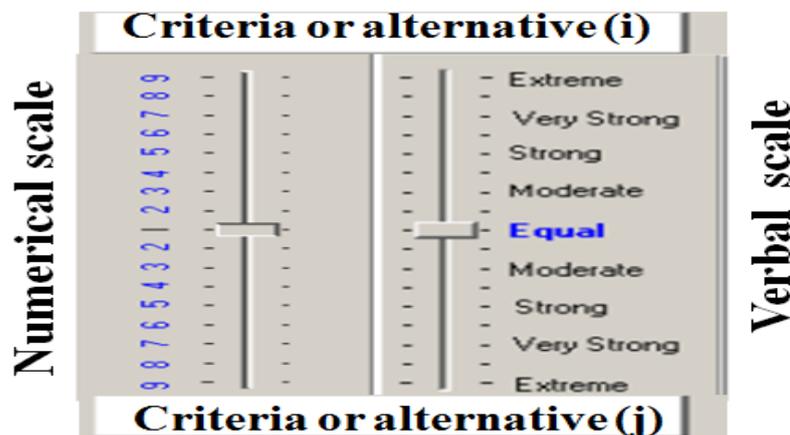


Figure 2. *The fundamental verbal and numerical scale of pair wise-comparison in AHP*

In the following sections, a node is an element of the hierarchy on which other sub-elements depend.

2.2.3. Local priorities

The local priorities or weights (pL) of each node’s sub-elements must be assessed and then standardized, i.e., they must accomplish:

$$\sum_{i=1}^n pL(i) = 1 \quad (1)$$

These weights or priorities may be evaluated on the basis of PC of these sub-elements (L(i)/ L(j)) with respect to the satisfaction of the node on which they depend. On the basis of these ratios, it is possible to construct a comparison matrix (\hat{A}) with elements: $a_{i,j} = L(i)/ L(j)$:

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} 1 & pL(1)/pL(2) & pL(1)/\omega L(3) & \dots & pL(1)/pL(n) \\ & 1 & pL(2)/\omega L(3) & \dots & pL(2)/pL(n) \\ & & 1 & \dots & pL(3)/pL(n) \\ \text{inverse} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{elements} & & & & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

It is a positive reciprocal matrix having a series of important properties: (i) It is square (order $n \times n$); (ii) All diagonal elements hold the value 1; (iii) Their elements accomplish: $a_{i,j} = 1/a_{j,i}$, $\forall i,j$; being $a_{i,j} = pL(i)/pL(j)$ (Saaty, 1994; Forman & Selly, 2001). The local priorities of the sub-elements depending on the node may be calculated by the resolution of the eigenvector of the equation systems:

$$\hat{A} * p_L = \lambda * p_L \quad (3)$$

Where p_L is the column vector of local priorities and λ is the maximum Eigen value. These priorities have a natural ratio (Saaty, 2001). The inconsistency of the judgment matrix can be proven by the indicators $\lambda \geq n$ and the difference $\lambda - n$ where n is the number of comparative elements. A consistency ratio of 0.1 is considered the acceptable upper limit.

2.2.4. Synthesis of priorities

Alternatives may be ranked according to their priorities (or performance) with respect to the goal (global priorities, pG) or any intermediate node of the decision hierarchy (final priorities, pF). The Final priorities of alternatives (conventional and organic olive growing systems) for a given node of the AHP model (for example the ‘economic objectives’) can be calculated by weighted addition based on the local priorities of the elements depending on it, according to:

$$p_{F(AK)} = \sum_{i=1}^I pL\left(\frac{AK}{i}\right) * pL(so(i)) \quad (4)$$

Where $p_{F(AK)}$ is the final priority of the alternative K (Ak being the conventional or organic farming system); $pL(Ak/i)$ is the local priority of the k alternative with respect to the i sub-objective depending on the main criterion. $pL(so(i))$ is the local priority of the i sub-objective with respect to the main criterion, and I is the number of sub-objectives depending on the criterion (Saaty, 1994). The global priorities (pG) can be calculated similarly on the basis of all local priorities of sub-objectives and alternatives depending on the goal.

2.2.5. Agreement measurement: RGA index

As previously mentioned, RGA index measures the consensus gradient between experts' opinions. In this case, two groups are involved: one group is specialized in the organic system and the other in the conventional one. Relative Global Agreement index is a measure of the convergence of opinions of individual groups with respect to the mean of all the groups. The Relative Global Agreement index is a node that measures the importance of consensus among all groups. Thus, the consensus is increasingly important as the RGA index acquires greater values. The Relative Global Agreement index is defined as:

$$RGA = \frac{1}{\frac{\sum_{g=1}^G \left(\frac{\sum_{i=1}^n |pL(i),g - pL(i),m|}{n} \right)}{G}} \quad (5)$$

where G is the number of decision groups, g is a particular decision group, $pL(i),g$ is the mean local priority of the i element with respect to the node for the g group, $pL(i), m$ is the mean local priority of the i element for the G groups and n is the number of child sub-nodes or node alternatives.

RGA index must be calculated for both the local priorities of elements (nodes and alternatives) and the final and global priorities of the alternatives. RGA index for the final priorities of alternatives, at a particular node, is simply calculated by substituting pL by either pG or pF , respectively, in Eq (5). Once RGA is calculated for all the nodes, agreement degrees can be segmented in low, medium, and high. The agreement degree's limits are the percentiles 1/3 and 2/3: the first third are the nodes with a low agreement gradient, the next, those with a medium agreement gradient and the last third, those with a high agreement gradient (Table 1).

Table 1. *Agreement degrees' segments*

Agreement degree	RGA
Low	$RGA \leq \text{Percentile } 1/3$
Medium	$\text{Percentile } 1/3 < RGA \leq \text{Percentile } 2/3$
High	$\text{Percentile } 2/3 < RGA$

It is very important to note that these limits are exclusive and different for each AHP model. They are used to classify the agreement level of each node in relative terms, that is to say, in relation to the level of agreement of the remaining nodes of the estimated model.

3. Results

The figures mentioned in the following paragraphs show the mean opinions of both groups of experts. It summarizes the results of the relative priorities of the different criteria and sub-criteria at each level of the model (“Local priorities of nodes”) as well as the relative performances of the organic and conventional olive farming systems in this region at each node (“Priorities of alternatives”). The inconsistency index also refers to the mean opinions. This is always below 0.10 for mean opinions as well as for each group and individual experts.

3.1. Comparative assessment of criteria and sub-criteria

The local priorities of the three main criteria of the model (economic, socio-territorial and environmental) with respect to the goal show a slight difference being, in a decreasing order of importance: economic, environmental, and socio-territorial criteria (0.480, 0.357 and 0.163) (Figure 3). This reflects the current trend of olive growers in the Sfax region. They are neglecting the environmental and socio-territorial objectives of their activity, compared to the economic objectives. This same olive growers' behaviour was observed in previous studies in the Andalucia region (Spain) (Parra-López et al., 2008; Carmona-Torres et al., 2014).

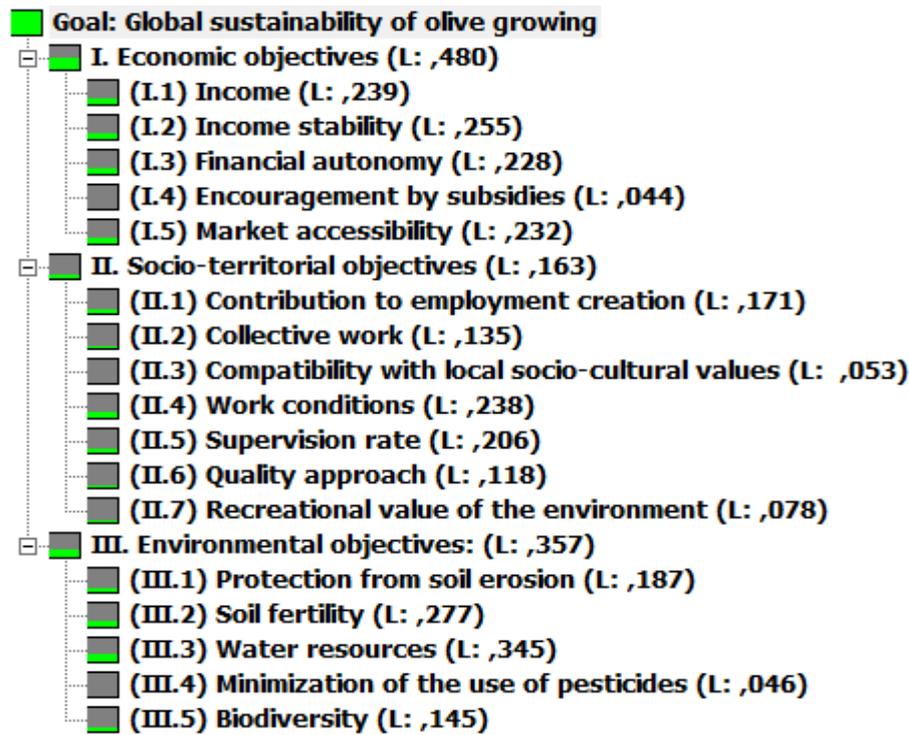


Figure 3. Local priorities of criteria and sub-criteria

3.2. Comparative assessment of alternatives

3.2.1. Global sustainability

According to the results shown in Figure 4, the organic olive-growing system is more globally sustainable according to the mean opinion of both groups of experts (Global priority (pG) = 0.696). This result is in agreement with previous studies comparing these two olive systems in the same study zone and from a multi-criteria point of view (Laajimi & Ben Nasr, 2009).

This result has important policy consequences. This is probably an approximation of the real ‘total economic value’ of these olive-farming systems for society.

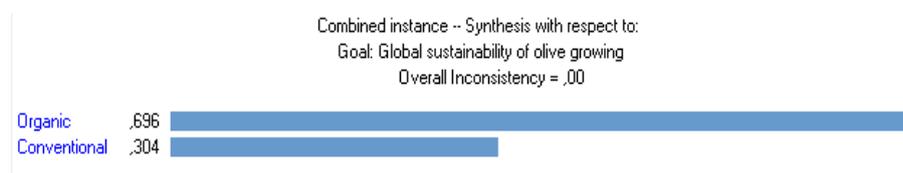


Figure 4. Performances of the olive systems in the goal

3.2.2. Sustainability in the three dimensions

Figure 5 indicates the priorities of the alternatives with respect to each objective and sub-objectives (economic sub-objectives, socio-territorial sub-objectives and environmental sub-objectives). The organic olive system sustainability is clearly superior to the conventional one

in the three main objectives of the model and, therefore, at the overall level, as shown in the previous section. It must be pointed out that of the three analysed criteria, the environmental one shows the greatest difference in the performance of the two alternatives. However, the economic criterion presents less difference between both alternatives.

- **Economic sub-criteria**

Regarding the performance of both farming systems in the economic sub-criteria (“Priorities of alternatives” Figure 5), organic olive growing has several advantages with respect to the conventional one, such as: (i) a better stability of the income (ii) an independence in the supply of inputs and a regular payment of debts (iii) it is easier to sell organic olive oil in the local market, given its good reputation among Tunisian consumers, and this despite its sale as a conventional product in this market and the difficulties faced in the international market to commercialize the entire quantity produced. However, the average opinion of both groups of experts reveals that the conventional alternative entails a slightly higher income for farmers ($p=0.546$) than that of the organic one (0.454). This result appears to be acceptable by considering the current situation of the organic product in Tunisia. Hence, according to Lampkin and Padel (1994), the income of organic farming in the short/medium term is lower than that of the conventional one. This is mainly related to (i) the higher production costs of the organic olive oil, (ii) the price fluctuation of the organic olive-growing product being sometimes equal to that of the conventional one, and (iii) according to Delate et al. (2003), farms with less fertility or inadequate expertise in organic practices may experience a longer “transitional effect” in which organic yields remain substantially lower than conventional yields.

The improvement of the economic situation of the organic production system being the most sustainable production method can be carried out through the encouragement of this sector by increasing subsidies, the implementation of a better strategy of integration in the sector and the organization of producers through cooperatives.

- **Socio-territorial sub-criteria**

In terms of socio-territorial criteria (Figure 5), the organic olive growing system allows: more employment creation, a better product quality and a possible enhancement of the environment, thus contributing to the maintenance of space and landscapes. The organic system is more diversified, allowing exchanges between the agricultural and the territory, contributes to the creation not only of an economic value of both space and environment but also the preservation of many agricultural systems. In relation to the criterion “Compatibility with local socio-

cultural values”, the conventional alternative has a synthetic priority slightly higher than the organic alternative because i) from the producer’s perspective, organic practices are more discordant with the farmers' practices, on the one hand, and ii) from consumers’ perspective, the lack of demand for organic products in the local market. According to the experts, the organic product is still sold with a specific consumers’ category in the local market. These consumers still have a relatively high purchasing power.

- **Environmental sub-criteria**

According to the experts, organic olive growing is the best environmental alternative (Figure 5 and Table 2). Moreover, it presents the greatest differences in performance when compared to the conventional alternative in the environmental sub-criteria. The overall environmental superiority of the organic system over the conventional one is in accordance with previous studies (Stolze et al., 2000; Hansen et al., 2001; Pacini et al., 2003, 2004; Parra- López et al. 2007; Laajimi and Ben Nasr 2009; Tuomisto et al., 2012). By preserving soil fertility, the organic system can fight the degradation of the organic matter of soils in the Sfax region. Besides, the organic agricultural method, using green manure, allows farmers to enrich the soil with organic matter and to improve its capacity of water retention. The practical experience of most experts (6 are organic farmers) showed that the olive-tree was suited to the organic method under the edaphic-climatic conditions of this region. On the other hand, the diversity of the intercalary plantations of fruit trees strengthened the financial autonomy and the income stability in the organic system.

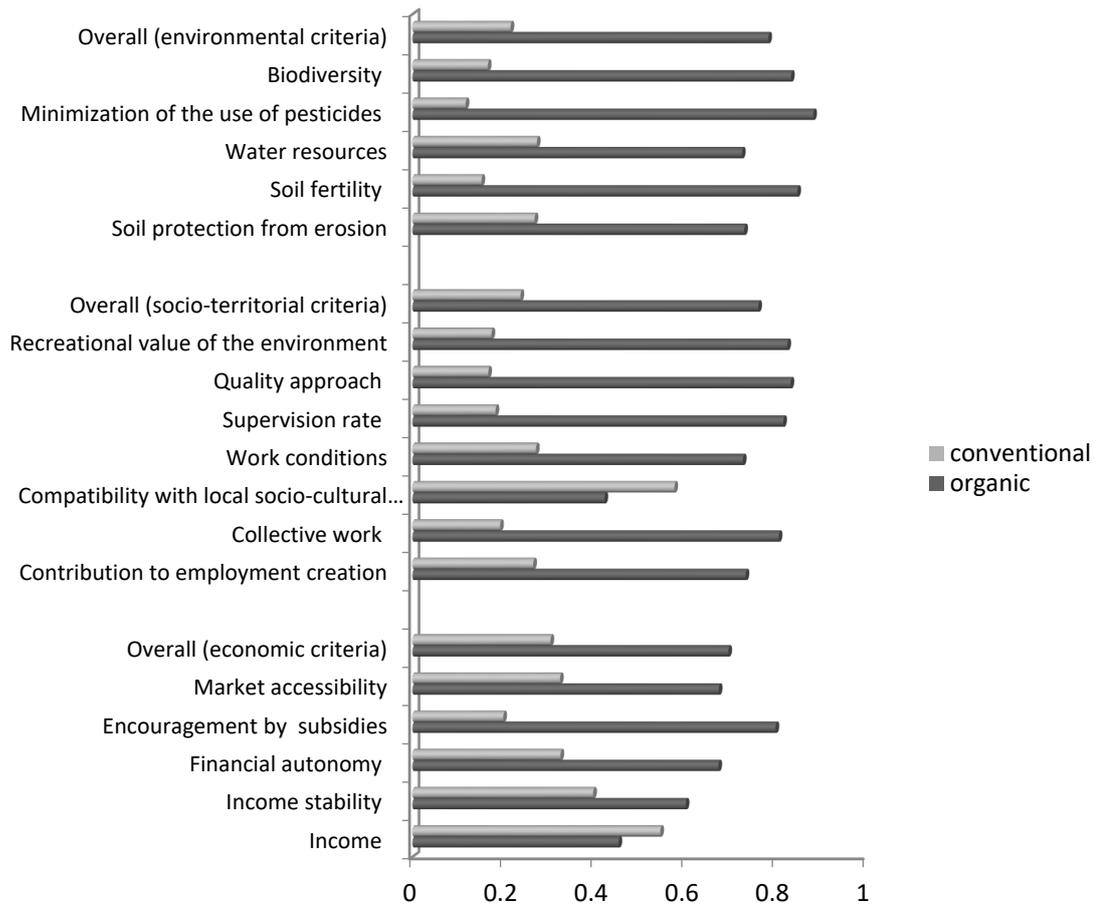


Figure 5. Performances of the olive systems in the objectives and sub-objectives

3.3. Sensitivity analysis

Sensitivity analysis is designated to examine the decision results (Figure 6 and Figure 7). The Expert Choice implementation of AHP provides four graphical sensitivity analysis modes: dynamic, gradient, performance and two-dimensional analysis. The ranking of alternatives can be changed by increasing or decreasing the importance of the criteria or sub-criteria (local priorities or weights). For this reason, the local priorities of the main criteria and sub-criteria are separately altered, simulating weights between 0% and 100% (note that the priorities of the other criteria change accordingly, reflecting the relative nature of the weights, i.e., the total weights have to add up to 100% in this paper). Figure 6 shows the results before making any changes on local weights of criteria and sub-criteria (objectives and sub-objectives). The graphs (A, B, C, D) show successively: graph (A) - performances sensitivity of the olives systems in the three main objectives and Goal (Overall); graph (B) performances sensitivity of the olives systems in the economic sub-criteria; graph (C) performances sensitivity of the olives systems in the socio-territorial sub-criteria and (D) performances sensitivity of the olives systems in the

environmental sub-criteria. The change of the alternatives ranking overview was only in the graph (B and C). Therefore, two other graphs after the change were obtained (Figure 7) B' and C'. In the case of increasing: i) local priorities of sub-criteria "income" from 0.239 to 0.774 (Figure 7: B, B'), ii) local priorities of sub-criteria "Compatibility with local socio-cultural values" from 0.053 to 0.786 (Figure 7: C, C'), the conventional olive system will become more sustainable, in the overall economic criteria and overall socio-territorial criteria than the organic one. Finally, other changes in the local priorities of main criteria cannot alter the outcome of overall sustainability (Goal) (Figure 6, graph A).

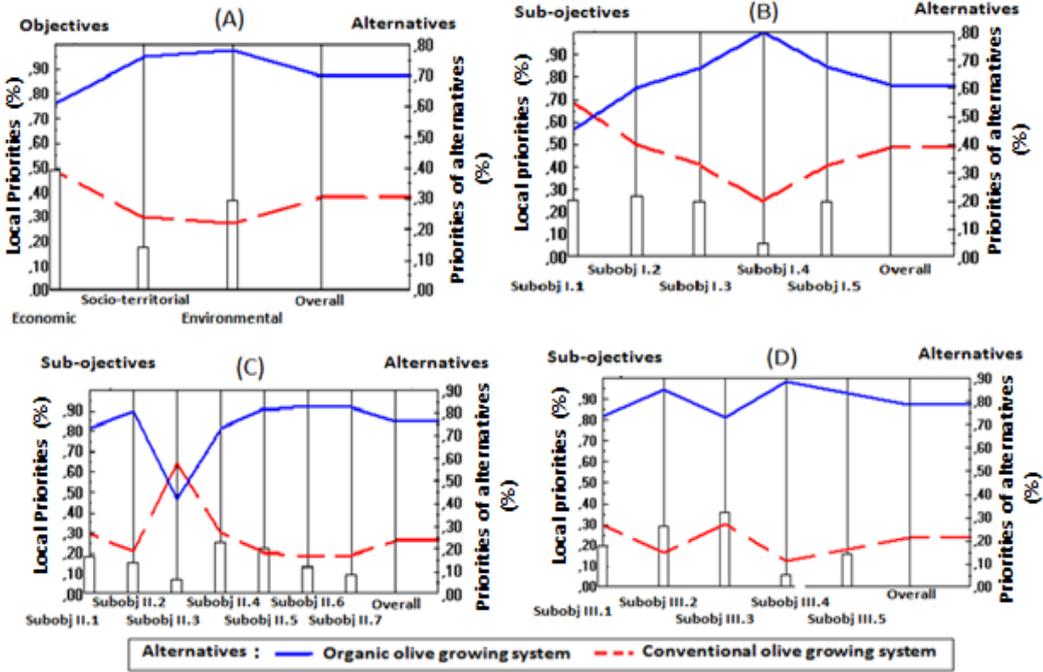


Figure 6. Performance sensitivity graphics

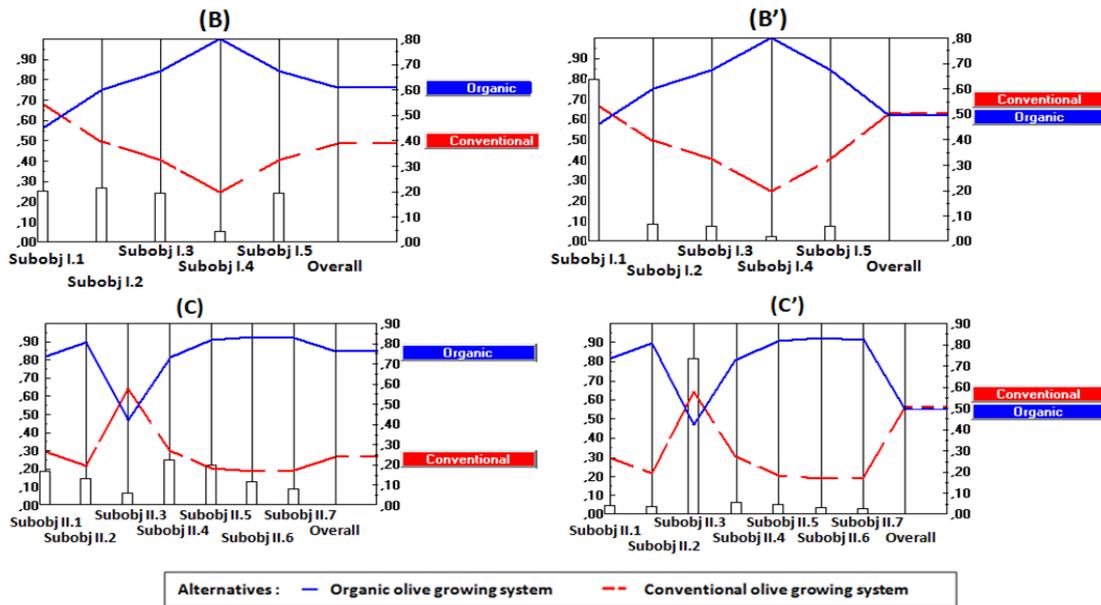


Figure 7. Performance sensitivity graphics in the economic and socio-territorial sub-objectives

Note: Graphic (B) - Subobj I.1: Income; Subobj I.2: Income stability; Subobj I.3: Financial autonomy; Subobj I.4: Encouragement by subsidies; Subobj I.5: Market accessibility. Graphic (C) - Subobj II.1: Contribution to employment creation; Subobj II.2: Collective work; Subobj II.3: Compatibility with local socio-cultural values; Subobj II.4: Work conditions; Subobj II.5: Supervision rate; Subobj II.6: Quality approach; Subobj II.7: Recreational value of the environment. Graphic (D) - Subobj III.1: Protection from soil erosion; Subobj I.2: Soil fertility; Subobj I.3: Water resources; Subobj I.4: Minimization of the use of pesticides; Subobj I.5: Biodiversity.

3.4. Agreement measurement

Table 2 shows the opinion convergence among the groups of experts which is indicated by the agreement indices/degrees at all nodes, both for the local priorities of the sub-nodes (“Local priorities of nodes”) and for the priorities of the alternatives with respect to each node (“Priorities of alternatives”). The RGA index at the “global performance” is medium (c.3–4, RGA = 10.32). Moreover, there is a slight agreement among the experts regarding these local priorities (Table 2: c.6–7: RGA index=4.30, Agreement degree=low). This low agreement could be explained by the differences in the ideological tendencies of the experts. Regarding the agreement of experts in "priorities of alternatives" with respect to the main criteria, the environmental one is the aspect on which there is more agreement between experts, the agreement degree being medium but at the upper limit of the high agreement index (Table 2:

RGA=28.22). The positive environmental impact of organic farming practices is a matter of agreement between several researchers. However, many comparative studies have encountered methodological problems, limiting their ability to draw quantitative conclusions. Thus, there remains a pressing need for longitudinal, system-level studies in order to address these issues and to fill in the gaps in our knowledge of the impacts of organic farming (Hole et al., 2005). Regarding the economic side, it is the aspect for which there is the most difference between experts' opinions (Table 2: c.3: RGA=7.11, Agreement degree=low). The controversy about the economic profitability of organic farming remains. Moreover, Rigby et al. (2001) and Sutherland (2011) have identified low financial rewards as the primary reasons given by organic farmers for reverting to conventional production. In reality, this vision is limited in the short term, since such a positive environmental impact will increase the farming economic viability in the medium-long term. Thereby, the diffusion of sustainable systems must be needed to rethink the cost of the environmental actions.

Table2. *Agreement in all the nodes of the AHP olive model*

Nodes of the AHP model	Agreement among experts*			
	Local priorities of nodes		Priorities of alternatives	
Level 1 (Goal)	RGA Index	Agreement Degree	RGA Index	Agreement Degree
Level 2 (Criteria)				
Level 3 (Subcriteria)				
(Columnnumber)	1	2	3	4
Global performances	4.3	•	10.32	••
I. Economic objectives	5.04	•	7.11	•
I.1. Income	n/a	n/a	5.08	•
I.2. Income stability	n/a	n/a	4.89	•
I.3. Financial autonomy	n/a	n/a	12,04	••
I.4. Encouragement by subsidies	n/a	n/a	22.07	••
I.5. Market accessibility	n/a	n/a	7.37	•
II. Socio-territorial objectives	5,45	•	20.15	••
II.1. Contribution to employment creation	n/a	n/a	26.03	••
II.2. Collective work	n/a	n/a	207.67	•••
II.3. Compatibility with local socio-cultural values	n/a	n/a	16.55	••
II.4. Work conditions	n/a	n/a	264.02	•••
II.5. Supervision rate	n/a	n/a	42.72	•••
II.6. Quality approach	n/a	n/a	61.83	•••
II.7.Recreational Value of the environnement	n/a	n/a	14.74	••
III. Environmental objectives	9.62	•	28.22	••
III.1. Soil protection from erosion	n/a	n/a	39.33	•••
III.2. Soil fertility	n/a	n/a	257.79	•••
III.3. Water ressources	n/a	n/a	37.89	•••
III.4. Minimization of the use of pesticides	n/a	n/a	31.79	•••
III.5. Biodiversity	n/a	n/a	15.82	••

Note: Agreement Degree: ●●=High; ●●= Medium; ●=Low. n/a=not applicable because there are no sub-nodes depending on this node. Limits for the segmentation of RGA Indexes: PRGA1/3 = 10.32; PRGA2/3= 28.22.

4. Discussion

From an overall sustainability perspective, organic olive growing has proved its superiority. This result is in agreement with the study of Laajimi and Ben Nasr (2009) comparing these two olive systems in the same study zone and from a multicriteria point of view based on the IDEA method. This prioritization is also in agreement with previous researches comparing these production systems but under other conditions (Stockdale et al., 2001; Pacini et al., 2003, 2004; Rasul and Thapa, 2004 and Parra-López et al., 2008). This work showed a slightly lower income of organic olive growing system compared to the conventional one. This result is in concordance with the studies of Berentsen et al. (1998), and Lampkin and Padel (1999). Otherwise, Sánchez Jiménez (1999) and Parra-López et al. (2008) obtained a higher income for organic olive farming with respect to conventional methods. These contradictory results can be explained by at least two reasons :i) The context of each study; if it is a research focusing on medium-long term or short-medium term outcomes and ii) the characteristics of the study zone such as the socio-economic criteria and the geo-political context. The economic aspect including profitability of sustainable farming is highly criticized in the literature (Schaller, 1993). In Tunisia, the aspects to be improved are mainly related to institutional and policies orientations to support more sustainable agricultural systems. Thus, viability of agriculture may be achieved by adjusting the agricultural behavior to more sustainable practices and through a modulation of decision makers' policies. The improvement of organic olive growing farmers' income seems to be a priority for the importance of this system to preserve the environment. This income can be improved by direct aids or through more sophisticated marketing plans exploring more interesting international markets. In this context, fair trade associated to organic farming can represent a good tool to improve farms' income and can contribute in a best organization of farmers into cooperatives. Certainly, this strategy can contribute to best controlling the value chain and taking advantage of the highest added value of olive oil (Elfkih et al., 2013). On the other hand, knowledge management and information sharing mechanisms can facilitate meaningful participation and promote decision-making at the local level (Mabudafhasi, 2002). Surveyed experts agreed that organic system can provide interesting yields at the short and medium terms always when it is well conducted. So, training and farmers' supervision are essential to go into more sustainable practices and more productive orchards.

In the long term, a general consensus was established between scientists, that sustainable farming can generate more productive systems taking into account the soil degradation and water overuse of non sustainable systems. All these assumptions represent an additional motivation to decision makers to provide more support for organic agriculture.

From a consumers' perspective, surveyed experts are in agreement with literature which suggests that consumers are often not well informed about the benefits of organic products essentially in local markets (Vermeir and Verbeke, 2006; Vecchio, 2013 ; Pomarici et al., 2016). In this context, it was desirable to increase the demand for organic products in the local market by consumer awareness of the importance of organic foods; by setting a clear price policy aiming at the improvement of consumers' purchase capacity and encouraging organic companies and farming to strengthen the communication of their environmental commitment to consumers through appropriate programs and marketing tools. In fact, from a strategic perspective, supporting sustainable agriculture may be more economically efficient for the state taking into account public expenditure in health. Many studies confirm a positive correlation between pollution and health expenditure, such as the study of Yazdi and Khanalizadeh (2017) which proves that CO₂ and PM₁₀ emissions have statistically significant positive effects on health expenditure. Indeed, without a sufficient income, agriculture cannot reach the desirable sustainable levels. For this reason, subsidizing sustainable agriculture is not only the right of farmers but also the right of society and future generations. On the other hand, prices may reflect the real value of products. Fri (1991) argues that markets need the right price signals to work properly, so externalities must be internalized in private markets (Yunlong, 1994).

In relation to the use of the AHP method and the associated software package (Expert-Choice), as previously mentioned, AHP has shown a number of strengths and facilities that make it a potentially useful tool in the evaluation of sustainability. The main strengths of AHP realised in this study are: (i) It makes it possible to quantify qualitative, subjective and intangible information, which can be arranged in a complex decision-making problem with high uncertainty and great risk; (ii) It makes possible the achievement of an overall aggregated sustainability evaluation; (iii) It allows an easy implementation and processing of data via a specific computer support (software "Expert choice"); (iv) It facilitates the identification of the level of agreement between different agents involved in decision making, thus allowing the specification of the preferences of the actors and the necessary justifications; and (v) It provides practical solutions based on a justified choice. On the other hand, the most obvious weaknesses of AHP mentioned in the literature are related to the independence and relevance of objectives,

representativeness of the judgments, and open/closed nature of the model. These weaknesses attributed to AHP can be mitigated if the problem is properly structured, as has been implemented in this paper. In addition, the ANP (Analytic Network Process) that is the extension methodology of AHP can be also used if there are many dependent criteria (Ishizaka et al., 2013). In fact, AHP is an effective tool for the sustainability assessment but it is cognitively demanding for the decision makers, and can only embrace a weak sustainability perspective as trade-offs are the norm. The robust results can be obtained with MAUT methodology (Cinelli et al., 2014).

The modeling process is based on a mechanistic agro-ecological engineering approach (Ittersum and Rabbinge, 1997) which makes it possible to deal with specific alternative, technological options or new constraints and policies. This approach is easier than the classical 'empirical' econometric approaches which are based on hard statistical data for certain very restrictive conditions (Janssen and Van Ittersum, 2007). Therefore, this approach seems to be holistic, systemic, integrative and trans-disciplinary. In the olive case study, the use of experts' knowledge is a good option because of the scientific and technical nature of the analyzed criteria. In addition, the discussion of the prototype model with experts is a procedure which has been proven to be a useful concept as the prototype already delivers preliminary results that can be utilized for improvement of the model (Sattler et al., 2010). The validity of our model and results was evaluated through previous partial studies on the impacts of alternatives on the functions of olive growing, as detailed previously. These studies are, in general, narrowly focused on a few functions and impacts, but some of them are more holistic, such as those analyzing the multifunctionality of integrated production (Carmona-Torres et al., 2014).

5. Conclusions

This study confirms the global sustainability of the organic production system, as expected by the initial hypothesis. The holistic superiority of the alternative of the olive growing system may be considered as a further reason to foster institutional support to its wider diffusion in Tunisia.

This global sustainability entails contrasts concerning the studied sub-criteria. These contrasts may reveal strengths and weaknesses related to the studied systems, which can contribute to a better orientation of public strategies. Results derived from the AHP evaluation reveal a superiority of the organic olive growing system in all the criteria except for two sub-criteria: economic income (economic criteria) and compatibility with local socio-cultural values (socio-

territorial criteria) whereas environmental criteria have demonstrated an overall superiority of all the studied sub-criteria.

In fact, the environmental dimension forms the strong pillar of organic farming, mainly thanks to their diversify advantages: i) It contributes to the maintenance of the organic fertility of the soil. In this context, experts affirm the importance to start with healthy soil to grow healthy food. Nowadays it is widely recognized that organic farming builds up organic soil matter better than conventional systems. In addition, natural cultivation practices are far better than chemical soil management. ii) Organic farming helps combat serious soil problems such as erosion, iii) It contributes to keeping water supplies clean by stopping polluted run-off. In the Sfax region, the majority of organic farmers tend to amend the soil correctly using compost - which helps conserve water; and finally iv) Organic farming encourages biodiversity with intercalary plantation mainly fruit trees in the region of Sfax.

Moreover, organic farming may play an extraordinary social function by adopting an effective innovation process based on an eco-tourism strategy associated to its recreational value. From the socio-territorial point of view, the challenge is how to better sensitize the Tunisian consumer to make of organic olive oil its healthy and ethical choice. This is done by pursuing a strategy aiming to bring the producer closer to the consumer (e.g. through awareness campaigns and publicity) and improving at the same time the consumers' purchase to ameliorate the access to these products. This may make organic products more compatible with local socio-cultural values.

At the economic level, the organic olive growing system has demonstrated great advantages with respect to the conventional system: better stability of the income at the medium and long terms, better financial autonomy, better access to subsidies and better market accessibility through short marketing circuit. Despite all these advantages, the current economic situation (income) presents less performance compared with the conventional one. In other words, organic economic performances are better at the medium and long terms than at the short term. But we cannot insure medium and long term sustainability without a short term viability of this production system. In reality, organic olive farming represents only 2.1% of agricultural area in the Sfax region where many farmers have given up the organic system for the low registered incomes; which endangers even the existence of this system. The challenge here is how to assist and reinforce the current situation to guarantee the right of future generations in sustainable farming systems, without prejudicing farmers' current economic situation. In this way, three

kinds of measures can be suggested: i) a more oriented prices policy aiming at the internalisation of environmental costs and benefits. This, makes markets more transparent ii) subsidising organic farming incomes; actually, specific subsidies for organic farming cover only 70% of the certification fees (only the five first years of production) and 30% of agricultural material. This is not enough to make the organic system more preponderant; and iii) better information sharing on good cultivation practices to contribute in the improvement of organic yields. In reality, the organic systems present higher production costs caused by lower yields. Therefore, the organic systems should improve their productivity to improve farmers' incomes. Thus, it seems to be obvious that a wider diffusion of organic olive farming in Tunisia would require a combined effort of several actors; decision makers, farmers and scientists; focusing their effort on the improvement of the profitability of the organic farms controlling production costs and improving knowledge management and information sharing mechanisms for a good command of sustainable agricultural practices through direct access to scientific research. Further research is needed to address knowledge and up-take of 'green' agricultural practices among both organic and conventional producers outside of agri-environmental schemes, and to rethink the cost of the environmental actions – or lack of – that are being driven by the market (Sutherland, 2011).

Methodologically, the use of MCDM techniques is increasing and providing new analytical tools for the practical resolution of complex problems which are a target in the field of the evaluation of the multifunctionality and sustainability of agriculture. This work contributes to integrating assessment of sustainability of agricultural systems through a well-defined approach from the structuring of the problem - from the setting of the goal to the sensitivity analysis. Through AHP methodology, our study has covered the four integrative elements of integrated assessment: sustainability dimensions, scales, model and stakeholders. The use of the tool comparing experts' judgment has enriched the debate on the agricultural systems sustainability, and reflects the current interest of decision-makers in making long-term predictions and simulations of new possible behavior outside the range of observed data.

Finally, this study represents the first step of a wider research project aiming at defining public policies for a wider adoption of more sustainable olive growing systems in Tunisia. Subsequent studies are aimed to complete the vision of the problem: (i) By carrying out a thorough study on production sub-systems which can characterize the production systems already studied; (ii) An enrichment of the theoretical approach with other tools, on the one hand, and a reinforcement of the identified advantages of the methodology, on the other hand; (iii) greater

involvement of farmers and consumers in the information gathering process; (iv) a more integrative analysis taking into account the other components of sustainability, such as the impact of agricultural practices on the multiple agricultural functions; (v) a more in-depth study multiplying existing agricultural systems such as intensive and hyper-intensive olive-growing systems recently introduced in Tunisia.

Acknowledgements- Thanks go to the Olive Tree Institute of Tunisia that has supported this work. Comments raised by the referees and the editor are highly appreciated. Thanks are also given to Wanderlust International Language Center of Tunisia for its English editing.

References

- Bezlepkina I. and Reidsma P., 2011. Integrated assessment of sustainability of agricultural systems and land use: Methods, tools and applications. *Agricultural Systems*, 104(2) : 105–109.
- Ben Abdallah S., 2015. Evaluation comparative de la multifonctionnalité des systèmes de production oléicole dans la région de Sfax. Master's thesis in Institut National Agronomique de Tunisie, Tunisie. 119 pp. [In French].
- Binder C.R., Feola G. and Steinberger J.K., 2010. Considering the normative, systemic and procedural dimensions in indicator-based sustainability assessments in agriculture. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(2): 71-81.
- Berentsen P.B.M., Giesen G.W.J. and Schneiders M.M.F.H., 1998. Conversion from conventional to biological dairy farming: economic and environmental consequences at farm level. *Biological Agriculture and Horticulture*, 16 (1998), pp. 311-328.
- Callieris R., Roma R. and Brahim S., 2016. Different consumer behaviours for organic food in Tunisia. A cluster analysis application. *New Medit*, 15(2):53-62.
- Carmona-Torres C., Parra-López C., Hinojosa-Rodríguez A. and Sayadi S., 2014. Farm-level multifunctionality associated with farming techniques in olive growing: An integrated modeling approach. *Agricultural Systems*, 127: 97-114.
- Carof M., Colomb B. and Aveline A., 2013. A guide for choosing the most appropriate method for multi-criteria assessment of agricultural systems according to decision-makers' expectations. *Agricultural Systems*, 115: 51–62.

- Cinelli M., Coles S.R. and Kirwan K., 2014. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, 46: 138–148.
- Delate K., Duffy M., Chase C., Holste A., Friedrich H. and Wantate N., 2003. An economic comparison of organic and conventional grain crops in a long-term agroecological research (LTAR) site in Iowa. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18 (2): 59–69.
- Elfkhih, S., Wannessi, O. and Mtimet, N., 2013. Le commerce équitable entre principes et réalisations : le cas du secteur oléicole Tunisien. *New Medit.* 12(1). P 13 – 21.
- Elfkhih S., Guidara I. and Mtimet N., 2012. Are Tunisian organic olive growing farms sustainable? An adapted IDEA approach analysis. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(4): 877-889.
- Forman E. and Selly M.A., 2001. *Decisions by Objectives*. Amazon Edition. 401pp.
- Fri R.W., 1991. Sustainable development: principles into practice. *Resources*, 102 (1991), pp. 1-3.
- Gómez-Limón J.A. and Arriaza-Balmón, M., 2011. Evaluación de la sostenibilidad de las explotaciones de olivar en Andalucía. XIII Premio Unicaja de Investigación Agraria. < <https://www.unicaja.es/resources/1320671483909.pdf> >.
- Gomez Sal A. and Gonzalez Garcia A., 2007. A comprehensive assessment of multifunctional agricultural land-use systems in Spain using a multi-dimensional evaluative model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120 (1): 82–91.
- Hansen B, Alrøe H.F. and Kristensen ES., 2001. Approaches to assess the environmental impact of organic farming with particular regard to Denmark. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83(1-2): 11–26.
- Hole D.G., Perkins A.J., Wilson J.D., Alexander I.H., Grice P.V. and Evans A.D., 2005. Does organic farming benefit biodiversity? *Biological Conservation*, 122(1): 113–130.
- Ishizaka A. and Labib A., 2009. Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations. *OR Insight*, 22(4): 201–220.
- Ishizaka A. and Nemery P., 2013. *Multi-Criteria Decision Analysis Methods and Software*. Portsmouth Business School, University of Portsmouth, UK.
- Ittersum V.M.K. and Rabbinge R., 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52 (3): 197-208.
- Janssen S. and Ittersum M.K.V., 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*, 94(3):622-636.

- Kanter D.R., Musumba M., Wood S.L.R., Palm C., Antle J., Balvanera P., Dale V.H., Hvlik P., Kline K.L., Scholes R.J., Thornton P., Tittone P. and Andelman S., 2016. Evaluating agricultural trade-offs in the age of sustainable development. *Agricultural Systems*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.010>.
- Yazdi S.K. and Khanalizadeh B., 2017. Air pollution, economic growth and health care expenditure. *Journal of Economic Research-Ekonomska Istrazivanja*. 30(1): 1181-1190.
- Laajimi A. and Ben Nasr J., 2009. Appréciation et comparaison de la durabilité des exploitations agricoles biologiques et conventionnelles en Tunisie: cas de l'oléiculture dans la région de Sfax. *New Medit*, 3(1): 10-19.
- Lampkin N. and Padel S., 1994. *The Economics of Organic Farming*. CAB International, Wallingford.
- Mabudafhasi R., 2002. The role of knowledge management and information sharing incapacity building for sustainable development—an example from South Africa. *Ocean & Coastal Management*, 45(9-10): 695–707.
- Pacini C., Wossink A., Giesen G., Vazzana C. and Huirne R., 2003. Evaluation of sustainability of organic, integrated and conventional farming systems: a farm and field-scale analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 95(1): 273–288.
- Pacini C., Wossink A., Giesen G. and Huirne R., 2004. Ecological-economic modelling to support multi-objective policy making: a farming systems approach implemented for Tuscany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 102 (3): 349–364.
- Pomarici E., Amato M. and Vecchio R., 2016. Environmental Friendly Wines: A Consumer Segmentation Study. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 8 (2016) Pp. 534-541.
- Parra-López C., Calatrava-Requena J. and de-Haro-Giménez T., 2007. A multi-criteria evaluation of the environmental performances of conventional, organic and integrated olive-growing systems in the south of Spain based on experts' knowledge. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 22(3): 189-203.
- Parra-López C., Calatrava-Requena J. and de-Haro-Giménez T., 2008. A systemic comparative assessment of the multifunctional performance of alternative olive systems in Spain within an AHP-extended framework. *Ecological Economics*, 64 (4): 820–834.
- Pazek K., Rozman C., Majkovic D., Turk J., Kljaji M., Skraba A., Borec A., Simonic P. and Prisenk J., 2014. Assessment of multifunctional agriculture: application of selected multi-criteria methods in case of Slovenia. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 20(5): 1008-1017.

- Rasul G. and Thapa G.B., 2004. Sustainability of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh: an assessment based on environmental, economic and social perspectives. *Agricultural Systems*, 79 (2004), pp. 327-351.
- Regulation (EC) No 834/2007. Council Regulation (EC) No. 834/2007 of 28 June 2007 on organic production and labelling of organic products and repealing Regulation (EEC) No. 2092/91. *Official Journal of the European Union*, L 189/1.
- Regulation (EC) No 537/2009. Commission Regulation (EC) No 537/2009 of 19 June 2009. *Official Journal of the European Union*, L 159/6.
- Rigby D. and Cáceres D., 2001. Organic farming and the sustainability of agricultural systems. *Agricultural Systems*, 68(1): 21-40.
- Rivals P., 1961. Regards sur les Oliviers de la Région de Sfax. *Journal d'agriculture tropicale et de botanique appliquée*, 8(4): 203-205.
- Saaty T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. New York, McGraw Hill, Pittsburgh, RWS Publications.
- Saaty T.L., 1994. *The Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process VI, AHP Series*. Pittsburgh, USA, RWS Publications.
- Saaty T.L., 2001. *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. Pittsburgh, USA, RWS Publications.
- Sánchez Jiménez S., 1999. *El control de costes en el cultivo del olivar*. PhD dissertation, Dept. of Business Administration, University of Jaen, Spain.
- Sattler C., Nagel U.J., Werner A. and Zander P., 2010. Integrated assessment of agricultural production practices to enhance sustainable development in agricultural landscapes. *Ecological Indicators*, 10(1): 49–61.
- Schaller N., 1993. The concept of agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 46(1-4): 89-97.
- Stockdale E.A., Lampkin N.H., Hovi M., Keatinge R., Lennartsson E.K.M., Macdonald D.W., Padel S., Tattersall F.H., Wolfe M.S. and Watson C.A., 2001. Agronomic and environmental implications of organic farming systems *Advances in Agronomy*, 70 (2001), pp. 261-262.
- Stolze M., Piorr A., Häring A. and Dabbert S., 2000. The environmental impact of organic farming in Europe. *Organic Farming in Europe: Economics and Policy 6*. Stuttgart-Hohenheim, Germany.
- Sutherland L.A., 2011. “Effectively organic”: Environmental gains on conventional farms through the market? *Land Use Policy*, 28(4): 815–824.

- Tunisian Regulation N° 99-30 of 5 April 1999. Loi n° 99-30 du 5 avril 1999, relative à l'agriculture biologique. Journal Officiel de la République Tunisienne N° 29.
- Tuomisto H.L., Hodge I.D., Riordan P. and Macdonald D.W., 2012. Does organic farming reduce environmental impacts? A meta-analysis of European research. *Journal of Environmental Management*, 112: 309-320.
- Vecchio R., 2013. Determinants of willingness-to-pay for sustainable wine: Evidence from experimental auctions. *Wine Economics and Policy*, 2: 85-92.
- Vermeir I. and Verbeke W., 2006. Sustainable food consumption: Exploring the consumer “attitude–behavioral intention” gap. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 19(2): 169-194.
- Yunlong C. and Smit B., 1994. Sustainability in agriculture: a general review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 49: 299-307.

Artículo 2

**Evaluation of the environmental sustainability in the olive growing systems
in Tunisia**

**Saker Ben Abdallah, Saida Elfkih, Elisa M. Suárez-Rey, Carlos Parra-
López, Mercedes Romero-Gómez**

Journal of Cleaner Production, 2021, 282: 124526

Abstract

Olive cultivation for oil production in Tunisia covers from traditional to innovative cropping systems. The aim of the study was to assess the environmental footprint of the most representative olive growing systems of the actual production of olive fruit in Tunisia, from the planting phase to the full production phase, during a reference period of the life cycle of the olive growth of 50 years. Six traditional systems, two intensive systems and one super-intensive system were compared and the differences of type of production (conventional or organic), irrigation management and fertilization management were selected. The impacts associated to olive production were calculated and evaluated by the Life Cycle Assessment methodology and the results of this study were referred to two functional units: 1 ton of olives and 1 hectare of cultivated olive growing area. Field agricultural practices of olive systems were soil management, fertilizers, pesticides, pruning and harvesting. The impact categories selected for the environmental analysis were climate change, acidification, freshwater eutrophication and freshwater ecotoxicity. The most innovative olive production systems (intensive and super-intensive) resulted in less environmental impacts for all categories with respect to the rest of systems from the productive perspective but produced higher impacts per hectare of cultivated area. Fertilizers and soil management were the field agricultural practices that presented the highest contributions in most of the categories evaluated. The implementation of an integrated crop management, as well as good practice guides and training programs for farmers, should be considered a priority.

keywords: environmental footprint, innovative systems, life cycle assessment, olive growing practices, Tunisia

1. Introduction

In Tunisia, olive cultivation for oil production is the main agricultural activity and olive farms spread throughout the country. It is estimated that olive surface cover 1.85 million hectares in the country (AgriDATA, 2019; DGPA, 2019), having the cultivation of the olive tree for the production of oil a great socioeconomic importance. In terms of olive oil production, apart from some European countries (Spain, Italy and Greece) known to be main producers of olive oil in the world, Tunisia is the fourth producer (193,700 t/year) and also the third exporter (152,650 t/year) of olive oil in the world (IOOC, 2020). The main olive orchards in Tunisia are in Sfax and Sidi Bouzid regions, which represent 19% and 15% of the total olive area and contribute 21.7% and 10.2% of the country's production, respectively (AgriDATA, 2019; DGPA, 2019).

The olive cultivation sector is mainly traditional and rainfed with a low tree density (20 trees ha⁻¹), in the region of Sfax. As a result, its productivity at farm level is significantly low compared to other producing countries in the Mediterranean area. Moreover, the low level of

mechanization, the old-age and large-size of the olive trees and the limited annual rainfall affect the competitiveness of the sector (Jackson et al., 2015; Larbi et al., 2017). Consequently, the Tunisian agricultural policy has moved towards the renewal of this traditional olive grove. One of the main agricultural management practices recently adopted is irrigation, especially in high density plantations. For example, during the 2015-2018 crop seasons, the intensive irrigated olive orchards have increased from 82,560 ha to 101,600 ha (DGEDA, 2019). The most important irrigated olive areas have been installed in the Sidi Bouzid region with 21.6% of the total irrigated olive plantations in Tunisia (DGEDA, 2019).

Another management practice that is undergoing changes in Tunisia is the shift from traditional low-density (17-34 trees ha⁻¹) to high-density systems (1,250 to 1,666 trees ha⁻¹). Olive growing in Tunisia is characterized by having 81.8% of its area with traditional conventional systems, 13.6% with traditional organic systems and 4.6% with intensive and super-intensive systems (DGPA, 2019; DGEDA, 2019). These systems differ in several aspects such as the planted varieties, the amount of used inputs and the level of mechanization of soil management, pest treatments, fertilization, and pruning and harvesting operations. Despite of the economic benefits of intensive and super-intensive olive orchards regarding, high productivity and early crop production, they could lead to adverse impacts on the environment due to the high use of energy and chemical inputs (De Gennaro et al., 2012). The adoption of innovative systems could improve productivity with low environmental impact. Indeed, environmental sustainability is becoming the leading paradigm of management practices in many crops (De Luca et al., 2018). According to Ben Abdallah et al. (2018), conventional management has contributed to the degradation of soil organic matter in the Sfax region. On the other hand, traditional farming may reduce the risk of detrimental environmental effects compared to more intensive agriculture (Tilman et al., 2002; Weiser et al., 2014; Taxidis et al., 2015). Among the traditional methods, organic farming may reduce environmental problems caused by conventional chemical products used in agriculture. During the two last decades, the area dedicated to organic olive growing has increased in Tunisia. In 2017, Tunisia was the first country with organic olive groves with 254,400 ha followed by Italy (235,700 ha) and Spain (195,100 ha) (Helga and Lemoud, 2019).

In recent years, international and national governance advocate for more sustainable management patterns. Especially, food, fisheries and agriculture constitute a priority for achieving sustainable operational objectives and actions in the Mediterranean region (UN Environment/MAP, 2017). Thus, promoting innovation and knowledge will be required to

adopt best environmental practices and technologies in the growing, harvesting, processing and consumption phases. The environmental burdens in the olive growing systems may vary depending on the management practices used and climatic, cultural, and socio-economic conditions (Beaufoy, 2000). Despite the advanced world position of Tunisia in the olive oil sector, there is a lack of specific environmental analysis of the different olive production systems in the country. For this purpose, a comprehensive environmental analysis is needed to identify those operation or systems producing the highest impacts and to propose strategies to minimize them.

Life Cycle Assessment (LCA) is a methodology strongly recommended to evaluate the environmental impacts of agricultural production systems (Audsley et al., 1997). LCA has already been used in olive production in several studies and different countries, as in Italy (De Gennaro et al., 2012; Salomone and Ioppolo, 2012 ; Accorsi et al., 2013; Mohamad et al., 2014; Rinaldi et al., 2014; Guiso et al., 2016; Proietti et al., 2014; Bernardi et al., 2018; De Luca et al., 2018; Guarino et al., 2019), Spain (Romero-Gómez et al., 2017; Navarro et al., 2018; Parascanu et al., 2018), Greece (Chatzisyneon et al., 2013; Tsarouhas et al., 2015; Taxidis et al., 2015), Cyprus (Avraamides and Fatta, 2008; Christoforou and Fokaides, 2016), Iran (Rajaeifar et al., 2014), Jordan (El Hanandeh and Gharaibeh, 2016), among others. In these studies, it was reported that the agricultural stage is the process that contributes significantly to most environmental impacts.

Several LCA studies on olive oil production, compare conventional to organic farming (Notarnicola et al., 2004; Salomone and Ioppolo., 2012; Mohamad et al., 2014; Taxidis et al., 2015; Pattara et al., 2016; Guarino et al., 2019). In general, these studies agree that the environmental impact of organic systems is lower than that of conventional systems. However, productivity of organic cultivation must be improved to be a competitive system for the grower. Romero-Gómez et al. (2017) compared the impacts of a wide range of olive production systems in Spain, including the integrated and organic production systems, and concluded that the integrated system was the best from an environmental and productive point of view. However, though the doses and air and water emissions of N fertilizers were lower in organic and integrated systems compared to conventional management and that there was an environmental gain of organic and integrated systems with respect to conventional systems, fertilizer use should be adjusted and reduced further in both. Meier et al. (2015) highlighted the importance of quantifying the environmental impacts of organic and conventional agricultural products for both functional units (per cultivated area and per production). De Gennaro et al. (2012)

compared the environmental and economic sustainability of two intensive olive growing systems (the ‘high density’ and ‘super high density’ orchards) from planting to the removal of trees, and concluded that the high density system was the best for all the impact categories analyzed, but that further studies were needed for clarifying the relationship between agricultural intensity and environmental impact, regionalizing characterization factors and constructing new indicators for soil quality and biodiversity. Busset et al. (2012) studied different olive production techniques (with or without irrigation, mechanical or not, organic, or conventional) and showed that the highest environmental footprint was caused in the fertilization phase. Proietti et al. (2014) analyzed the carbon footprint of an olive tree grove in Italy applying LCA and concluded that the greatest impact was caused by the use of fertilizers and pesticides (especially after the first year). El Hanandeh and Gharaibeh (2016) evaluated the environmental impacts of olive oil micro-farming practices in the northern region of Jordan. De Luca et al., (2018) focused on weeding practices in three scenarios from a life cycle assessment perspective and proposed that the best solution was reducing the use of chemicals and operational machinery with respect to the conventional and organic farming systems, but, still further improvements should be done by considering other impact categories. Bernardi et al. (2018) assessed various olive-harvesting scenarios, considering technical, economic, and environmental aspects. Navarro et al. (2018) applied the methodology LCA in different case studies in Spain focusing on the role of packaging of Virgin Olive Oil.

In order to provide scientific support to farmers and decision-makers, this paper presents a life cycle assessment of olive production in Tunisia. The comparative analysis covers all the olive production systems in this country (traditional, intensive, and super-intensive).

2. Materials and methods

2.1. Goal and scope definition

The goal of the study was to assess the environmental footprint of the olive growing systems existing in Tunisia. The aim of the study was to select and optimize the agricultural practices producing important environmental impacts and to propose mitigation strategies to provide an efficient and environmentally friendly management. To our knowledge, this is the first study that calculates the environmental footprint for the olive growing systems existing in Tunisia (nine systems), including the life cycle phases (up to six phases), from the planting phase to the full production phase (from year 1 to year 50). Other LCA studies on olive growing in different

countries have been reported, but none including such a variety of systems, phases, and functional units as those found in Tunisia. This study also considered an important issue mainly related to the environmental sustainability of innovative olive production systems (intensive and super-intensive), the sustainability of which remains not only a controversial subject but also a fundamental topic of discussions and debates, especially in Tunisia (Sai et al., 2012; Jackson et al., 2015; Larbi et al., 2017). Accordingly, this work could be useful to decision-makers in quantifying and then mitigating the environmental impacts on the most important crop in Tunisia such as olive growing.

The scope of this work is limited to crop production, considering from the extraction of raw materials of inputs up to the farm gate when the olives are harvested, transported to the oil mill and the trees are removed at the end of the production cycle. The results of this study were referred to two functional units (FUs): 1 t of olives and 1 ha of cultivated olive growing area.

Nine systems representatives of the actual production of olive fruit in Tunisia were considered in this study (Table 1). Six traditional systems, two intensive systems and one super-intensive system were compared. Within these systems, the differences of type of production (conventional or organic), irrigation management (irrigation or rainfed) and fertilization management (with or without fertilization) were selected.

Table 1. Systems representatives of the actual production of olive fruit in Tunisia

Production systems in Tunisia			Main features of the production systems				
<i>Traditional/Intensive/ Super-intensive</i>	<i>Conventional/Organic</i>	<i>Total area (%)</i>	<i>Irrigation / Rainfed</i>	<i>Fertilization/No fertilization/Fertigation</i>	<i>Acronym</i>	<i>Density (trees ha-1)</i>	<i>Main cultivar</i>
TRADITIONAL	CONVENTIONAL	81.8	IRRIGATION	FERTILIZATION	TCIF	17-34	Chemlali
			RAINFED	FERTILIZATION	TCRF	17-34	
				NO FERTILIZATION	TCR	17-34	
	ORGANIC	13.6	IRRIGATION	FERTILIZATION	TOIF	17-34	Chemlali
			RAINFED	FERTILIZATION	TORF	17-34	
				NO FERTILIZATION	TOR	17-34	
INTENSIVE	CONVENTIONAL	4.6	IRRIGATION	FERTIGATION	ICIF1	204-278	Chemlali
				FERTIGATION	ICIF2	416-555	Arbosana
SUPER-INTENSIVE	CONVENTIONAL		IRRIGATION	FERTIGATION	SICIF	1250-1666	Arbequina

The olive life cycle of each system was divided into six cropping phases depending on fruit production (planting, young, growing, increasing production 1, increasing production 2 and full production) (De Gennaro et al., 2012; IO, 2017a; Larbi et al., 2017; Guarino et al., 2019).

The environmental impacts of the olive management systems in Tunisia were evaluated during their entire life cycle: 48 years for a functional unit of 1 t of olives and 50 years for a functional unit of 1 ha of cultivated olive growing area. The results per t included only the production phases (from growing phase to full production phase) and the results per ha included all phases (from planting phase to full production phase).

The system boundary consisted of the agricultural production “from cradle to farm gate”. The following sources of agricultural burdens for the olive crop were considered in terms of energy and material flows: agricultural machinery, lubricant and fuel consumed in the installation of the fertigation system, in soil management, in the pruning and harvesting operations, in the application of fertilizers and pesticides and in the removal of trees after final harvest; energy and water consumed by the irrigation system, manufacturing of fertilizers and pesticides, emissions of contaminating compounds from fertilizers and pesticides application, transport of plants for transplanting, manufacturing and transport of auxiliary materials for harvesting and transport of olives from the orchard to the mill.

2.2. Life cycle inventory

The Life Cycle Inventory (LCI) included input-output data collection from field agricultural practices of Tunisia and calculation procedures during the life cycle of each cropping phase of the nine olive growing systems studied. Data were representative of the most widespread situations of this country and collected from different sources, such as farmers, experts, and literature review (Table 2). Most data on field agricultural practices were collected from farmers and experts of the main olive growing regions (Sfax and Sidi Bouzid) following surveys of 250 detailed and specific face-to-face questionnaires, approximately, from February 2018 to February 2019.

Table 2. Data and methodological sources for the field agricultural practices applied in the olive systems

Stages	Inputs	Sources
PRODUCTIVITY		Field survey* Larbi et al., 2017 IO (2017)
SOIL MANAGEMENT	equipments (machinery, diesel, lubricant, time)	Field survey*, IO (2017)
	operations number	Field survey*, IO (2017)
	transport of plants to the production sites	Field survey*
PRUNING	equipments (machinery, diesel, lubricant, time)	Field survey*
	treatment of pruning residues	Field survey*
	operations number	Field survey*, IO (2017), Masmoudi-Charfi et al., 2016
FERTILIZERS	Doses	Masmoudi-Charfi et al. (2016), IO (2017) Field survey*
	application equipment (machinery, diesel, lubricant, time)	Field survey*
	agricultural machinery for the installation of fertigation system (diesel, lubricant, time)	Field survey* Masmoudi-Charfi et al. (2012)
	operations number	Field survey*
	emissions to air	EEA, 2013 IPCC, 2006
	water consumption	Field survey* Masmoudi-Charfi et al. (2012)
	electricity	Field survey*
PESTICIDES	Doses	Field survey* IO (2017)
	application equipment (machinery, diesel, lubricant, time)	Field survey*, IO (2017)
	operations number	Field survey*
	emissions to air	EEA, 2013
HARVESTING	equipment (machinery, diesel, lubricant, time)	Field survey*
	transport (plastic material + harvested olives + olives from the orchard to the mill)	Field survey*

*Personal communication to farmers and experts

Regarding the preliminary life cycle data, the inventories were collected and assessed over a 50 years period (average data for stakeholders), which corresponds to the expected life of the olive grove. Secondary data for the analysis were obtained from the Ecoinvent database v.3.2 (Ecoinvent 2016), including data on fertilizers and pesticides' manufacture, electricity production mix, agricultural machinery and diesel, and auxiliary materials for harvesting and transport. Field emissions to air from nitrogen fertilizers and from pesticides were calculated according to the literature (Table 2).

Fig. 1 shows a flow diagram for the different cropping phases of each one of the nine olive production systems considered to facilitate the inventory analysis, impact assessment and interpretation of results. The main characteristics for each cropping phase of the evaluated olive growing systems are shown in Table 3. This table include the duration of each cultivation phases.

2.2.1. Field agricultural practices of olive systems

The cropping phases of the evaluated systems were structured in five field agricultural practices, each one including the following processes and flows: soil management, fertilizers, pesticides, pruning and harvesting. The main quantitative data included in all systems for each cropping phase are summarized in Tables 4 to 9.

- Soil management: included the use of agricultural machinery needed for making the holes for planting and weed control (chisel, cultivator, disc harrow and mower). The number of operations, time (h ha⁻¹), the diesel and lubricant oil consumed by the agricultural machinery and transport of olive plants to the production sites were also included.
- Fertilizers: nitrogen, phosphate and potassium (N, P₂O₅ and K₂O) fertilizers manufacturing and application to the crop as well as emissions to air derived from nitrogen fertilizers (NH₃ and N₂O) were included in all phases and in all systems. Fertilization varied among systems due to the use of different products and methods used for their distribution (soil, spread on the leaves and/or fertigation). In the traditional systems, fertilizers were distributed on the soil with manure and compost. For intensive and super-intensive systems, the type of fertilizers and the method of their spreading differed between phases: during the planting phase, fertilizers were spread on the soil with manure, potassium sulphate and triple superphosphate (Masmoudi-Charfi et al., 2016; IO, 2017b). During the rest of phases, fertilizers were applied through the

irrigation system (fertigation, using ammonium nitrate, phosphoric acid, potassium and calcium nitrates, humic acid and biostimulant), as well as via foliar treatments including N, P, K and microelements (iron, manganese, zinc, copper, boron and molybdenum, in the ICIF2 and SICIF systems). The water and electricity consumed by the irrigation system were also considered. Tables 4 to 9 show the fertilizers doses applied and the water and electricity consumed by the irrigation system in each phase for most systems per ha of land. The NH₃ and N₂O emissions to air were calculated following IPCC (2006) and EEA (2013). The agricultural machinery used for the installation of the fertigation system, numbers of operations, time (h ha⁻¹), and the diesel and lubricant oil consumed were also included in the planting phase of the intensive and super-intensive systems.

- Pesticides: Table 3 shows the pesticides used. In the planting phase and organic systems, pesticides were not applied. In traditional systems, dimethoate was used as insecticide and in intensive and super-intensive systems, dimethoate and deltamethrin (insecticides). In the ICIF2 and SICIF systems, glyphosate (herbicide) and tiophanate-methyl and copper (fungicide) were also applied. The pesticides active ingredient doses are shown in tables 5 to 9. Emissions to air from pest control (glyphosate, dimethoate, tiophanate-methyl and deltamethrin) have been calculated using the methodology described in EEA (2013). The plant protection products were applied by irrigation water and field sprayer and the application equipment (machinery, diesel, lubricant, time) were also included.
- Pruning: in the full production phase of the super-intensive system, pruning was carried out with a disc pruning equipment and the pruned wood residues were crushed with mulchers. (Table 3). The number of operations, time (h ha⁻¹) and the diesel and lubricant oil consumed by the agricultural machinery were considered. In the rest of systems, pruning was manual, and the pruned wood was burnt, therefore, pruning in these systems was not included in the LCA.
- Harvesting: harvesting was performed with hand picking in the traditional and intensive systems. However, harvesting was mechanized in the super-intensive system, using an olive harvester. The number of operations, time, the diesel, and lubricant oil consumed by the harvester were considered. Plastic material used in the harvest, such as HDPE in nets and processes (i.e., plastic film extrusion) were also included. The transportation

by trailer and tractor of the nets, of the harvested olives and the transportation of olives from the orchard to the mill were also included., as well as, the use of agricultural machinery (time, the diesel and lubricant oil consumed) to remove the olive trees at the end of their life cycle.

2.2.2. Cropping phases

The life cycle of each system was divided in different cropping phases, such as, planting, young phase, growing phase, increasing production phase I, increasing production phase II and full production phase (Fig. 2). Tables 4 to 9 show the main inputs of all the systems during the different cropping phases, which are higher in the intensive and super-intensive systems than in the rest of systems. The reference period of the life cycle of the olive growth was 50 years, approximately, which corresponds to the assumed lifetime of the traditional systems and of the ICIF1 system, twice of the ICIF2 system and three times of the super-intensive system. Thus, each phase of the ICIF2 system and super-intensive system is repeated twice and three times, respectively. The total production cycle was 50 year for the traditional and ICIF1 systems, 25 year and 50 year for the ICIF2 system and 16, 32 and 48 years for the SICIF system. The years of each phase are shown in Table 3.

The cropping phases in the different systems and the main associated cultivation techniques are described below:

- Planting phase (Tables 3 and 4): this phase considered the transport of olive plants to the production sites. Soil preparation before planting included soil management with cultivator and disc harrow in all systems. Holes were dig with a chisel in ICIP2 and SICIF systems and with a backhoe tractor in the rest of systems, and the young trees planted. Organic fertilizer with manure was distributed in all systems. In addition, potassium sulphate and triple superphosphate were added in the intensive and super-intensive systems.
- Young phase (Tables 3 and 5): from planting to the 4th year of the trees in the traditional systems and to the second year of the trees in the ICIF and SICIF systems. During this phase, the olive trees are pruned by hand and no significant production is obtained.

From this phase onwards: Soil management included weed control with cultivator in the traditional and ICIF1 systems and with mower in the ICIF2 and SICIF systems. In the ICIF and SICIF systems, the distribution of the main chemical fertilizers is performed

through the fertigation system and in the ICIF2 and super-intensive systems, fertilizers were also applied with foliar treatments. The organic fertilization (manure or compost) is mixed into the soil through tillage in the traditional and ICIF1 systems. Pesticides were used in all systems except in the organics systems and herbicides and fungicides were applied in the ICIF2 and SICIF systems.

- Growing phase (Tables 3 and 6): from the 5th year to the 7th year of the trees in the traditional systems and from the 3rd year to the 6th, 8th and 5th year in the ICIF1, ICIF2 and SICIF systems, respectively. In this phase, the productivity of ICIF2 and SICIF was higher than the productivity in ICIF1, while the production in the traditional systems was minimum. From this phase to the end of the production cycle, pruning and harvesting were mechanized in SICIF and manual in the rest of systems.
- Increasing production phases (Tables 3, 7 and 8): these phases were included in the traditional and ICIF1 systems. During the phases, the production increase and the yield was optimum. The period of the phases varies between systems, depending on the agricultural practices used to achieve maximum yield (with or without irrigation and/or fertilization).
- Full production phase (Tables 3 and 9): During this phase, olive production can be considered constant and in the last years, yield starts to decrease. This phase is relatively short in the ICIF2 (17 years) and SICIF (11 years), mainly due to a greater competition between trees in each row, resulting in significant survival problems. Cultivation operations, doses of fertilizers and pesticides were higher in this phase. At the end of full production phase, the olive trees were removed.

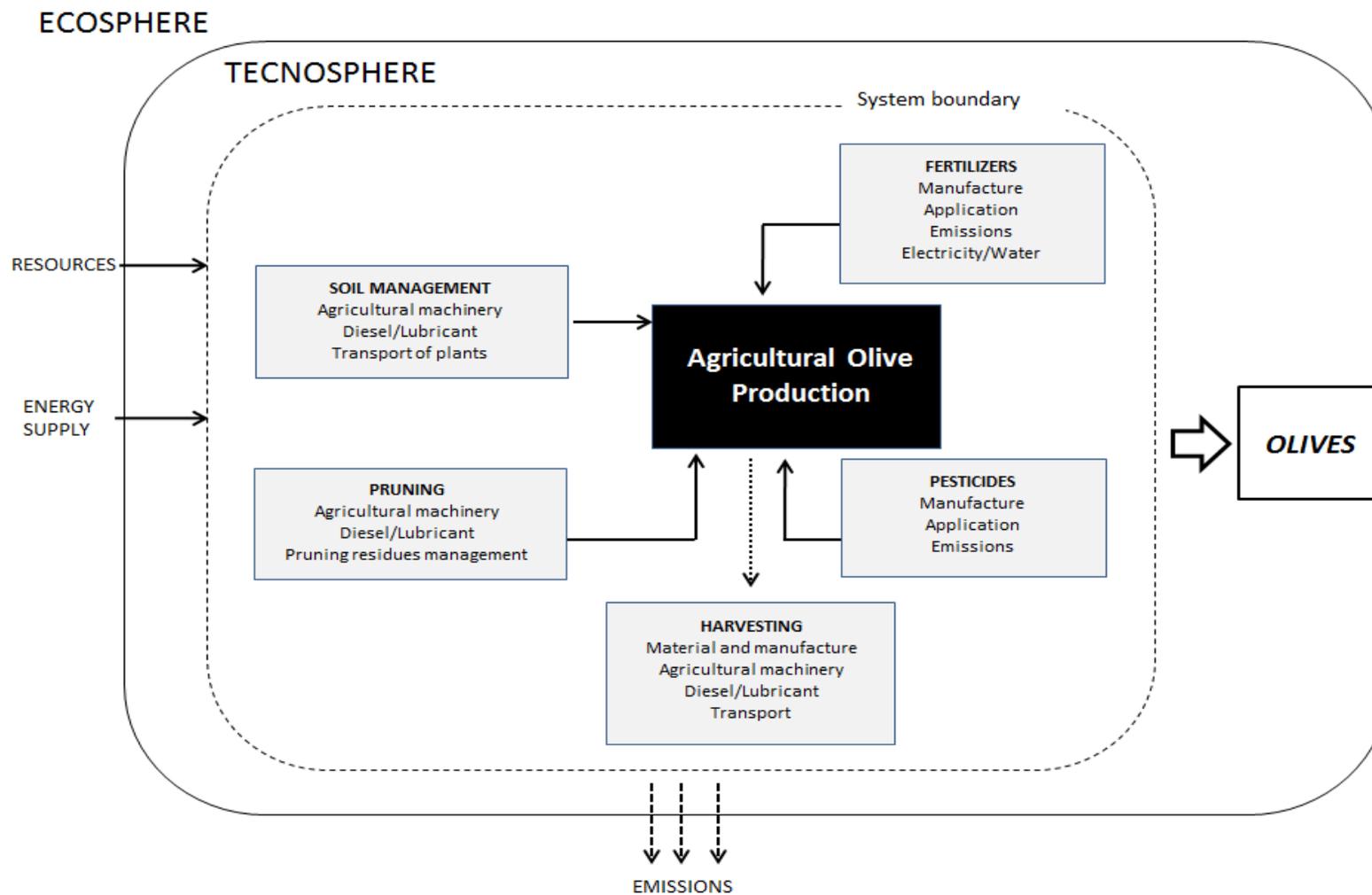


Fig. 1 General flow diagram for agricultural olive production in the nine cropping systems

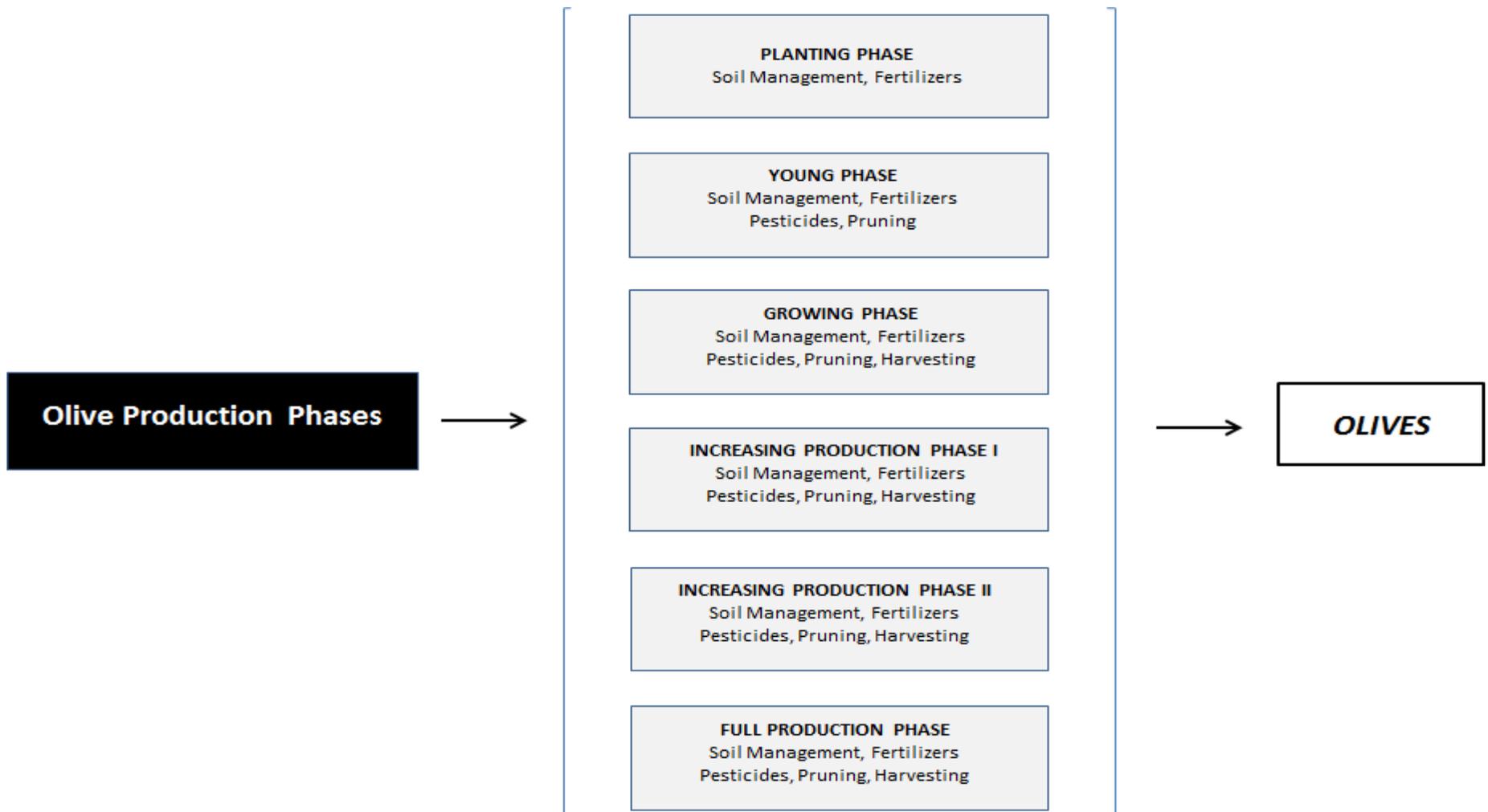


Fig. 2 Olive production phases and field agricultural practices included in the analysis

Table 3. Description of the field agricultural practices of the olive growing systems for each cropping phase

Cropping Phases and Systems	Years	Soil Management	Fertilizers	Pesticides	Pruning and management of residues	Harvesting
TCIF						
Planting phase		Use of cultivator, disc harrow and backhoe tractor	Distribution on the soil with manure	-	-	-
Young phase	4	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	-
Growing phase	3	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 1	4	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 2	5	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
Full production phase	34	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
TCRF						
Planting phase		Use of cultivator, disc harrow and backhoe tractor	Distribution on the soil with manure	-	-	-
Young phase	4	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	-
Growing phase	3	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 1	9	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 2	3	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
Full production phase	31	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
TCR						

Planting phase		Use of cultivator, disc harrow and backhoe tractor	Distribution on the soil with manure	-	-	-
Young phase	4	Use of cultivator	-	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	-
Growing phase	3	Use of cultivator	-	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 1	9	Use of cultivator	-	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 2	3	Use of cultivator	-	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
Full production phase	31	Use of cultivator	-	Insecticide (dimethoate)	Manual and burned of residues	Manual
TOIF						
Planting phase		Use of cultivator, disc harrow and backhoe tractor	Distribution on the soil with manure	-	-	-
Young phase	4	Use of cultivator	Distribution on the soil with compost	-	Manual and burned of residues	-
Growing phase	3	Use of cultivator	Distribution on the soil with compost	-	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 1	4	Use of cultivator	Distribution on the soil with compost	-	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 2	5	Use of cultivator	Distribution on the soil with compost	-	Manual and burned of residues	Manual
Full production phase	34	Use of cultivator	Distribution on the soil with compost	-	Manual and burned of residues	Manual
TORF						
Planting phase		Use of cultivator, disc harrow and backhoe tractor	Distribution on the soil with manure	-	-	-
Young phase	4	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	-	Manual and burned of residues	-
Growing phase	3	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	-	Manual and burned of residues	Manual

Increasing production phase 1	9	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	-	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 2	3	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	-	Manual and burned of residues	Manual
Full production phase	31	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure	-	Manual and burned of residues	Manual
TOR						
Planting phase		Use of cultivator, disc harrow and backhoe tractor	Distribution on the soil with manure	-	-	-
Young phase	4	Use of cultivator	-	-	Manual and burned of residues	-
Growing phase	3	Use of cultivator	-	-	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 1	9	Use of cultivator	-	-	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 2	3	Use of cultivator	-	-	Manual and burned of residues	Manual
Full production phase	31	Use of cultivator	-	-	Manual and burned of residues	Manual
ICIF1						
Planting phase		Use of cultivator, disc harrow and backhoe tractor	Distribution on the soil with manure, potassium sulphate and triple superphosphate	-	-	-
Young phase	2	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure + fertigation	Insecticides (dimethoate and deltamethrin)	Manual and burned of residues	-
Growing phase	4	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure + fertigation	Insecticides (dimethoate and deltamethrin)	Manual and burned of residues	Manual
Increasing production phase 1	5	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure + fertigation	Insecticides (dimethoate and deltamethrin)	Manual and burned of residues	Manual
Full production phase	39	Use of cultivator	Distribution on the soil with manure + fertigation	Insecticides (dimethoate and deltamethrin)	Manual and burned of residues	Manual

ICIF2						
Planting phase		Use of cultivator, disc harrow and chisel	Distribution on the soil with manure, potassium sulphate and triple superphosphate	-	-	-
Young phase	2	Use of mower	Foliar treatment with N,P,K and microelements + fertigation	Herbicide (glyphosate) and insecticides (dimethoate and deltamethrin) and fungicide (tiophanate-methyl)	Manual and burned of residues	-
Growing phase	6	Use of mower	Foliar treatment with N,P,K and microelements + fertigation	Herbicide (glyphosate) and insecticides (dimethoate and deltamethrin)	Manual and burned of residues	Manual
Full production phase	17	Use of mower	Foliar treatment with N,P,K and microelements + fertigation	Herbicide (glyphosate) and insecticides (dimethoate and deltamethrin)	Manual and burned of residues	Manual
SICIF						
Planting phase		Use of cultivator, disc harrow and chisel	Distribution on the soil with manure, potassium sulphate and triple superphosphate	-	-	-
Young phase	2	Use of mower	Foliar treatment with N,P,K and microelements + fertigation	Herbicide (glyphosate) and insecticides (dimethoate and deltamethrin) and fungicide (tiophanate-methyl)	Manual and burned of residues	-
Growing phase	3	Use of mower	Foliar treatment with N,P,K and microelements + fertigation	Herbicide (glyphosate), fungicide (copper) and insecticides (dimethoate and deltamethrin)	With disc pruning machine and crushed of residues with mulchers and soil mulching	With olive harvester
Full production phase	11	Use of mower	Foliar treatment with N,P,K and microelements + fertigation	Herbicide (glyphosate), fungicide (copper) and insecticides (dimethoate and deltamethrin)	With disc pruning machine and crushed of residues with mulchers and soil mulching	With olive harvester

Table 4. Main characteristics of the olives production systems during the planting phase

Fertilizers doses (kg ha⁻¹)	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
N	22	13	13	22	13	13	88	351	438
P2O5	7	4	4	7	4	4	56	201	229
K2O	8	5	5	8	5	5	64	231	264
Air emissions (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0.81	0.49	0.49	0.81	0.49	0.49	3.24	12.97	16.21
N ₂ O-N	0.22	0.13	0.13	0.22	0.13	0.13	0.88	3.51	4.38
Soil management (time h ha⁻¹)	11	11	11	11	11	11	19	19	19
Transport of plants (km ton)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.28	2.09	3.15

Table 5. Main characteristics of the olives production systems during the young phase (annual average)

Fertilizers doses (kg ha⁻¹)	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
N	4	4	0	5	4	0	30	50	57
P2O5	1	1	0	1	1	0	16	38	48
K2O	2	2	0	2	2	0	17	18	26
Air emissions (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0.16	0.16	0	0.20	0.16	0	1.11	1.85	2.11
N ₂ O-N	0.04	0.04	0	0.05	0.04	0	0.30	0.50	0.57
Water (m³ ha⁻¹)	275	0	0	250	0	0	577	1620	1800
Electricity (kWh ha⁻¹)	102.7	0	0	93.4	0	0	215.5	605.2	672.5
Pesticides application (kg ha⁻¹)									
Glyphosate	0	0	0	0	0	0	0	1.80	3.60
Dimethoate	0.05	0.05	0.05	0	0	0	0.20	0.20	0.40
Deltamethrin	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0.02
Tiophanate-methyl	0	0	0	0	0	0	0	2.1	2.1

Table 6. Main characteristics of the olives production systems during the growing phase (annual average)

	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Productivity (kg ha⁻¹)	375	250	175	280	238	175	3525	8000	8345
Fertilizers doses (kg ha⁻¹)									
N	4	4	0	5	4	0	55	82	107
P2O5	1	1	0	1	1	0	24	50	57
K2O	2	2	0	2	2	0	25	45	69
Air emissions (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0.16	0.16	0	0.20	0.16	0	2.04	3.03	3.96
N ₂ O-N	0.04	0.04	0	0.05	0.04	0	0.55	0.82	1.07
Water (m³ ha⁻¹)	275	0	0	250	0	0	993	2700	3000
Electricity (kWh ha⁻¹)	102.7	0	0	93.4	0	0	360.5	1008.7	1120.8
Pesticides application (kg ha⁻¹)									
Glyphosate	0	0	0	0	0	0	0	3.60	3.60
Dimethoate	0.05	0.05	0.05	0	0	0	0.20	0.40	0.80
Deltamethrin	0	0	0	0	0	0	0.02	0.03	0.03
Copper	0	0	0	0	0	0	0	0	1.25

Table 7. Main characteristics of the olives production systems during the increasing production phase 1 (annual average)

	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Productivity (kg ha⁻¹)	625	400	312	450	375	312	5500	-	-
Fertilizers doses (kg ha⁻¹)									
N	9	9	0	5	4	0	109	-	-
P2O5	3	3	0	1	1	0	36	-	-
K2O	3	3	0	2	2	0	45	-	-
Air emissions (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0.32	0.32	0	0.20	0.16	0	4.03	-	-
N ₂ O-N	0.09	0.09	0	0.05	0.04	0	1.09	-	-
Water (m³ ha⁻¹)	367	0	0	350	0	0	1630	-	-
Electricity (kWh ha⁻¹)	137.1	0	0	131.0	0	0	611.0	-	-
Pesticides application (kg ha⁻¹)									
Glyphosate	0	0	0	0	0	0	0	-	-
Dimethoate	0.05	0.05	0,05	0	0	0	0.40	-	-
Deltamethrin	0	0	0	0	0	0	0.02	-	-

Table 8. Main characteristics of the olives production systems during the increasing production phase 2 (annual average)

	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Productivity (kg ha⁻¹)	1250	625	437	875	500	437	-	-	-
Fertilizers doses (kg ha⁻¹)									
N	18	13	0	11	9	0	-	-	-
P2O5	6	4	0	2	3	0	-	-	-
K2O	7	5	0	3	3	0	-	-	-
Air emissions (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0.65	0.49	0	0.39	0.32	0	-	-	-
N ₂ O-N	0.18	0.13	0	0.11	0.09	0	-	-	-
Water (m³ ha⁻¹)	550	0	0	500	0	0	-	-	-
Electricity (kWh ha⁻¹)	205.5	0	0	168.5	0	0	-	-	-
Pesticides application (kg ha⁻¹)									
Glyphosate	0	0	0	0	0	0	-	-	-
Dimethoate	0.05	0.05	0.05	0	0	0	-	-	-
Deltamethrin	0	0	0	0	0	0	-	-	-

Table 9. Main characteristics of the olives production systems during the full production phase (annual average)

	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
Productivity (kg ha⁻¹)	2159	900	622	1657	850	622	7000	9500	10600
Fertilizers doses (kg ha⁻¹)									
N	18	13	0	11	9	0	119	119	145
P2O5	6	4	0	2	3	0	36	51	59
K2O	7	5	0	3	3	0	45	77	97
Air emissions (kg ha⁻¹)									
NH ₃ -N	0.65	0.49	0	0.39	0.32	0	4.40	4.40	5.37
N ₂ O-N	0.18	0.13	0	0.11	0.09	0	1.19	1.19	1.45
Water (m³ ha⁻¹)	550	0	0	500	0	0	2350	3240	3600
Electricity (kWh ha⁻¹)	205.5	0	0	168.5	0	0	878.0	1210.4	1345.0
Pesticides application (kg ha⁻¹)									
Glyphosate	0	0	0	0	0	0	0	3.60	7.20
Dimethoate	0.05	0.05	0,05	0	0	0	0.40	0.60	0.80
Deltamethrin	0	0	0	0	0	0	0.03	0.03	0.03
Copper	0	0	0	0	0	0	0	0	1.25

2.3. Life cycle impact assessment

The methodology used to evaluate the olives production impacts was the life cycle impact assessment (LCIA). This methodology was performed using a midpoint approach. ILCD 2011 Midpoint+ v. 1.08/EU27 2010, equal weighting (European Commission 2012) was the method used to classify, characterize, and normalize the inputs and outputs of the inventory. The simaPro software v. 8.5.2.0 (Pré Consultants, 2017) was used to calculate the environmental impacts. The most relevant impact categories evaluated in this study were: Climate Change (CC) in kg CO₂ eq, Acidification (AA) in molc. H⁺ eq, Freshwater Eutrophication (EU) in kg P eq and Freshwater Ecotoxicity (FE) in CTUe. CC is the Global Warming Potential giving the radiative forcing over a time horizon of 100 years (IPCC 2007). AA is the accumulated exceedance characterizing the change in critical load exceedance of sensitive area in terrestrial and freshwater ecosystems (Seppälä et al. 2006 and Posch et al. 2008). EU is the degree to which the emitted nutrients reaches the freshwater end compartment (considering phosphorus as limiting factor) (Struijs et al. 2009). FE expresses an estimate of the potentially affected fraction of species over time and volume per unit mass of a chemical emitted (Rosenbaum et al. 2008). The impact categories selected for the environmental assessment in this study, were chosen because of their relevance in the agriculture processes and according to the Product Category Rules (PCR) for olive oil of the International Environmental Product Declaration (EPD) System (Environdec, 2020).

These indicators were concluded through the characterization and normalization steps, according to the ISO 14040 standard (2006):

Characterization

After the impact categories were selected and defined, the relative contribution of each input and output within the product system to the environmental load was assigned to these impact categories and converted into indicators that represent the corresponding potential impacts on the environment. This is done by multiplying the results of the inventory obtained in the classification phase by the characterization factors of each substance within each impact category as presented in equation (1):

$$\text{Category Indicator} = \text{Characterization Factor (s)} \times \text{Emission Inventory (s)} \quad (1)$$

where S denotes the chemical.

The characterization factors of equation (1) linearly express the contribution of a unit mass (1 kg) of an emission to the environment.

Normalization

Normalization adds the benefits of placing the characterized impact indicator results in a broader context. It is expressed in a way that allows the impact indicators to be compared to each other, such that, the sum of each category indicator result is divided by a reference value according to equation (2) as follows:

$$N_k = S_k / R_k \quad (2)$$

Where k denotes the impact category, N is the normalized indicator, S is the category indicator from the characterization phase and R is the reference value, or the normalization factor.

3. Results

Figure 3 shows the contributions to the selected impact categories of the full production phase in the evaluated olive systems. Overall, fertilizers, soil management and harvesting were the field agricultural practices with major contributions to the impact categories studied. Pesticides and pruning resulted in low or negligible environmental burdens. Climate change was influenced by N₂O and CO₂ emissions to air caused by the application and manufacture of fertilizers and the field work carried out for the soil management. Acidification was determined by NH₃ emissions to the air due to the production of fertilizers and their application to the crop. The phosphate emissions to water due to the manufacture and application of fertilizers and the soil management were important pollutants in the Eutrophication category. Finally, Ecotoxicity was dominated by Cu emissions to water from the fertilizers production and application (Table 10).

Table 10. Most relevant flow elementary and field agricultural practices of olive growing systems

Impact category	Flow elementary	Compartment	Main agricultural practices
Climate Change	Carbon dioxide, CO ₂ , fossil Dinitrogen monoxide, N ₂ O	Air	Fertilizers Soil Management
Acidification	Ammonia, NH ₃	Air	Fertilizers
Freshwater Eutrophication	Phosphate	Water	Fertilizers Soil Management
Freshwater Ecotoxicity	Copper, Cu	Water	Fertilizers

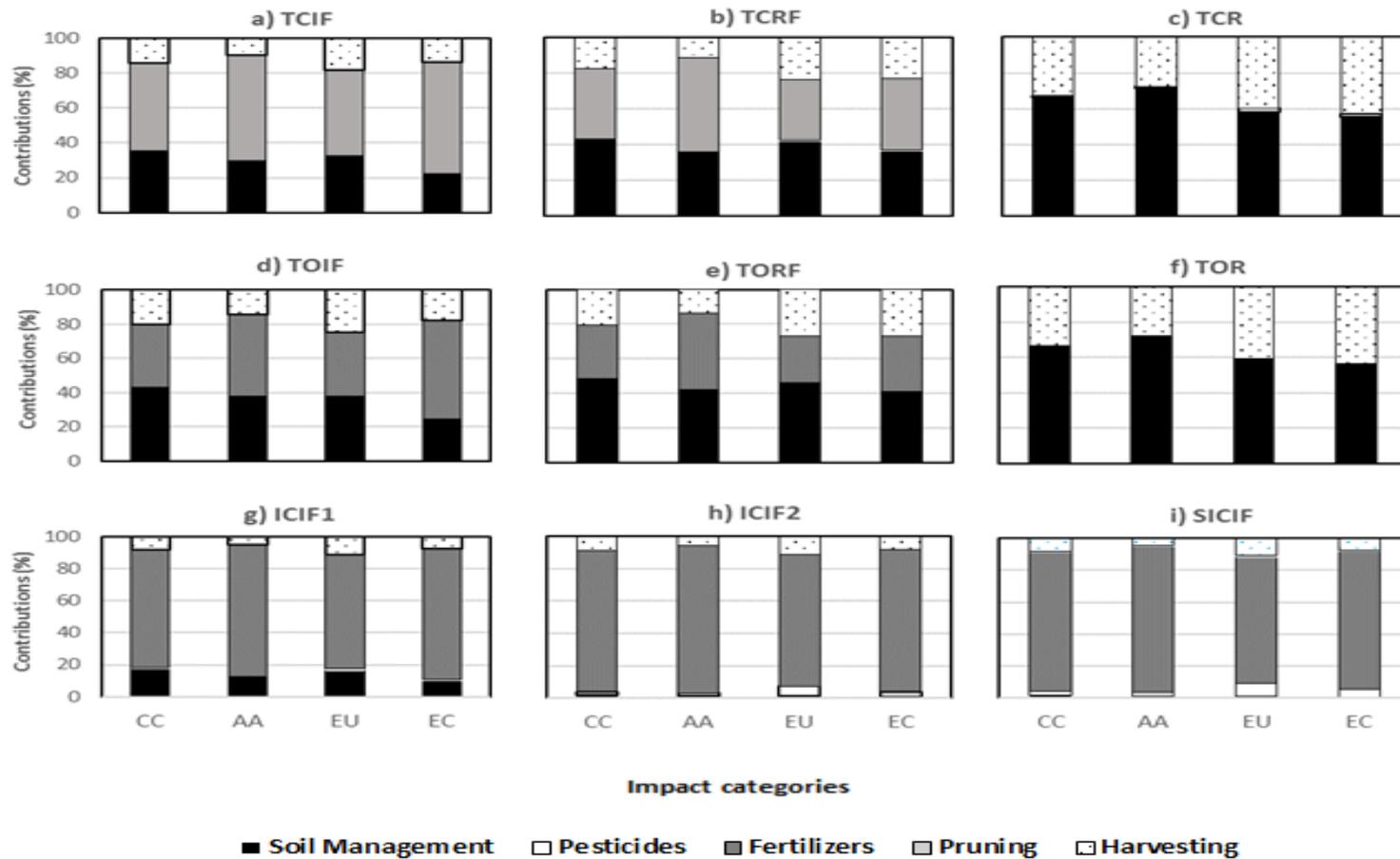


Fig. 3 Contributions to selected impact categories of the full production phase in the olive systems. CC = Change Climate, AA = Acidification, EU = Freshwater Eutrophication, EC = Freshwater Ecotoxicity

Fertilizers showed the highest contributions in all categories for the intensive and super-intensive systems and in the most of impact categories in the traditional systems with fertilization in the full production stage (Fig. 3). Specifically, the fertilizers acquired more importance in the AA category in the intensive and super-intensive systems, with maximum values of 92% and 91%, respectively (Fig. 3h and 3i). In the traditional systems with fertilization, the AA and EC categories were highest in the TCIF system (61% and 64%, respectively) (Fig. 3a).

Soil Management was the highest contributor in the rainfed and without fertilization systems (TCR and TOR) in all impact categories. The values were similar in both systems, varying between 55% in the EC category and 72% in the AA category (Fig. 3c and 3f). CC and EU categories were highest in the traditional systems with fertilization (up to 48% and 46%, respectively in TORF) (Fig. 3e).

Pesticides resulted in the lowest environmental contributions in the conventional systems, with a major impact in the EU category in the ICIF2 (6%) and SICIF (8%) systems (Fig. 3h and 3i). The environmental impacts in pruning were minimum (up to 1,4 % in the EU category) in the super-intensive system (Fig. 3i). Harvesting showed high contributions in the EU and EC categories in all systems, with maximum values of 40% and 43%, respectively, in the TCR and TOR systems (Fig. 3c and 3f).

Table 11 shows the environmental impacts of the evaluated olive management systems in Tunisia during their entire life cycle. The characterization and normalization results in all systems were different for all impact categories and for both FUs. EC was the category with the highest impacts in all production systems and for both FUs, followed by AA, EU, and CC (Table 11a and 11b).

In general, the *intensive and super-intensive systems* showed lower impacts per t (Table 11a) and higher impacts per ha (Table 11b) compared to the traditional systems. The ICIF2 and SICIF systems showed similar results and the lowest values for all categories per t (e.g., up to 59% in CC, 54% in AA, 52% in EU and 29% in EC categories, compared to the TCRF system), due to a higher productivity with respect to the rest of systems (Tables 4 to 9). However, the intensive and super-intensive systems showed the highest impacts for all categories per ha, especially the SICIF system (up to 92% in CC, 95% in AA, 93% in EU and 95% in EC categories, higher than in the TCR and TOR systems) caused by a major application of fertilizers and pesticides and a higher use of agricultural machinery and diesel in the soil,

pruning and harvesting management, compared to the rests of systems (Table 3 to 9). The low burdens in the systems without fertilization, water and energy consumed (TCR) in most of the phases and, also, without pesticides (TOR) (Table 11b), were caused by the absence of these inputs (Table 3 to 9).

Comparing the *conventional and organic systems* (TCIF and TOIF, TCRF and TORF, TCR and TOR), the organic systems presented lower environmental impacts in most categories per both FUs (Table 11a and 11b), despite having lower or similar productivity than the conventional systems (Table 4 to 9). These minor impacts were due to the absence of mineral fertilizers and pesticides.

In the *traditional conventional crop systems* (TCIF, TCRF and TCR), the highest burdens for all categories were obtained in TCRF per t (Table 11a) and in TCIF per ha (Table 11b). EC was the category with the highest impacts ($1.9E+05$ CTUe t⁻¹ in TCRF and $2.8E+05$ CTUe ha⁻¹ in TCIF) produced by a high dose of fertilizers and, also, due to the water applied and the electricity consumed in the case of the TCIF system (Table 4 to 9).

In the *organic systems* (TOIF, TORF and TOR), TOR showed the lowest impacts for all categories per both FUs, except for EU in kg P eq t⁻¹ (Table 11a and 11b), up to 21% and 64% lower values in EC for TOR compared category.

The productivity in the *irrigated systems* was higher than in the rainfed systems. However, the irrigation systems consumed water and electricity and a high amount of fertilizers in most phases with respect to the rainfed systems (Table 4 to 9). Therefore, the irrigated systems presented lower impacts per t and higher impacts per ha, compared to the rainfed ones; up to 35% less in TCIF than TCRF for the CC and AA categories and up to 32% less in TOIF than TORF for the CC and AA (Table 11a) and up to 50% higher in TCIF than TCRF and 43% higher in TOIF than TORF for the EC category (Table 11b).

Table 11. Characterization and normalization results of olive management systems in Tunisia during reference period: a) 48 years (FU = 1 t of olives) and b) 50 years (FU = 1 ha of cultivated olive growing surface). CC = Change Climate, AA = Acidification, EU = Freshwater Eutrophication, EC = Freshwater Ecotoxicity

a) 48 years

Impacts per t FU	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
<i>Characterization</i>									
CC (kg CO2 eq)	2.02E+04	3.07E+04	2.34E+04	1.95E+04	2.86E+04	2.32E+04	1.73E+04	1.23E+04	1.24E+04
AA (molc H+ eq)	2.09E+02	3.23E+02	1.92E+02	1.93E+02	2.84E+02	1.91E+02	2.15E+02	1.52E+02	1.54E+02
EU (kg P eq)	4.34E+00	6.16E+00	5.02E+00	4.22E+00	5.74E+00	4.91E+00	3.78E+00	3.01E+00	3.06E+00
EC (CTUe)	1.67E+05	1.86E+05	1.37E+05	1.70E+05	1.69E+05	1.34E+05	1.63E+05	1.32E+05	1.31E+05
<i>Normalization</i>									
CC	2.22	3.38	2.57	2.14	3.14	2.55	1.91	1.35	1.37
AA	4.41	6.82	4.05	4.07	6.00	4.02	4.54	3.20	3.26
EU	2.93	4.17	3.39	2.85	3.88	3.32	2.55	2.04	2.07
EC	19.07	21.21	15.58	19.40	19.28	15.28	18.60	15.08	14.97

b) 50 years

Impacts per ha FU	TCIF	TCRF	TCR	TOIF	TORF	TOR	ICIF1	ICIF2	SICIF
<i>Characterization</i>									
CC (kg CO2 eq)	3.30E+04	2.24E+04	1.23E+04	2.30E+04	1.95E+04	1.22E+04	1.17E+05	1.29E+05	1.57E+05
AA (molc H+ eq)	3.46E+02	2.38E+02	1.03E+02	2.32E+02	1.97E+02	1.03E+02	1.45E+03	1.61E+03	1.97E+03
EU (kg P eq)	7.13E+00	4.55E+00	2.68E+00	5.09E+00	3.98E+00	2.63E+00	2.54E+01	3.14E+01	3.82E+01
EC (CTUe)	2.76E+05	1.38E+05	7.40E+04	2.06E+05	1.18E+05	7.27E+04	1.10E+06	1.34E+06	1.57E+06
<i>Normalization</i>									
CC	3.63	2.47	1.35	2.53	2.15	1.35	12.82	14.14	17.23
AA	7.30	5.02	2.18	4.89	4.15	2.16	30.57	33.93	41.62
EU	4.82	3.07	1.81	3.44	2.69	1.78	17.20	21.25	25.80
EC	31.46	15.74	8.43	23.53	13.47	8.29	125.12	153.12	179.30

4. Discussion

4.1. Environmental impact of the olive growing systems per FU

The selection of the two functional units (mass unit of commercial product and area unit of cultivated olive) allowed the comparison of different olive growing systems in several cropping phases, with different crop management, degree of innovation and productivity.

4.1.1. Intensive and super-intensive systems

The most innovative systems (intensive and super-intensive) showed better results per t than the rest of systems. Especially ICIF2 and SICIF presented less environmental burdens for all categories and cropping systems (Table 11a) caused by a high productivity. The main objective of the agricultural systems is the production of food (Audsley et al. 1997), therefore, from a productive perspective, the most innovative olive fruit production systems in Tunisia resulted in less environmental impacts (Table 11a). However, the area of intensive and super-intensive olive systems cultivated in Tunisia occupies only a small part of the total surface (4.6%), mainly due to the large initial investment of these innovative systems, as well as limited land resources to optimally grow this crop (Jackson et al., 2015).

The environmental impacts in the innovative systems were worse compared to the rest of systems per area (Table 11b) due to a major level of mechanization of soil management, pruning and harvesting operations and major chemical inputs, especially in SICIF (Tables 3 to 9).

The ICIF2 system presented lower impacts in all categories, per t and per ha, than the SICIF system (Tables 11a and 11b), due to a lower use of electricity, water and chemical inputs with respect to SICIF and a higher olive productivity (Tables 7 to 9). These results agree with those from De Genaro et al. (2012), who reported that from an environmental and economic point of view, the intensive systems showed better results than the super-intensive systems for all categories per ha and per t, during the reference period (48 years) in olive crop.

4.1.2. Traditional systems

Overall, the traditional systems presented lower environmental impacts per ha than the intensive ones (Table 11b), due to low chemical input, low energy and water consumed and low crop management operations, but its productivity was also much lower (Tables 7 to 9). In this context, optimizing the productivity of traditional Tunisian olive systems (representing 95.4% of the olive growing area) should be a priority. In fact, this long-term objective will improve the olive yield and the competitiveness of the Tunisian olive oil sector compared to other olive

growing areas in the world. According to Larbi et al. (2017), the low productivity that characterizes traditional Tunisian olive systems probably seems behind the fourth rank that Tunisia occupies in terms of olive oil production (IOOC, 2020). Traditional systems in Tunisia are characterized by having a low density (20 to 25 trees per hectare) and therefore, a low productivity. Currently, the Tunisian government is designing strategies to increase planting density in traditional systems (Jackson et al., 2015).

4.1.3. Organic systems

The organic growing systems showed the lowest environmental impacts with respect to the traditional and conventional systems in all categories per both FUs (Tables 11a and 11b), due to lower amounts of fertilizers and absence of pesticides applied, but, overall, the productivity in the organic systems was also lower compared to the conventional systems (Tables 7 to 9). Similar results were obtained by Notarnicola et al. (2014) and Romero-Gómez et al. (2017), which reported that the organically grown olives should improve their productivity. Fernández-Hernández et al. 2014 proposed to increase the productivity and the oil content in organic olives, optimizing the use of compost. Mohamad et al. (2014), reported that a good option to increase yields and reduce the environmental impact could be an organic fertilization using the combination of biological foliar fertilizers and manure.

4.1.4. Conventional and traditional systems

Overall, conventional and traditional systems presented the highest burdens for all categories in both FUs (Table 11a and 11b) compared to organic systems, mainly due to use of chemical fertilizers and pesticides and a major number of operations for soil management. Mohamad et al. (2014), Guarino et al. (2019) and other LCA studies comparing organic and conventional management in olive cultivation in different countries, obtained similar results. Romero-Gómez et al. (2017) indicated that the integrated and traditional management was the best olive production system from an environmental and productive perspective, compared to the organic and conventional management. This was due to a high productivity, minor level of mechanization of pruning, harvesting and soil management operations than the rest of systems. De Luca et al. (2018) obtained also the best solution reducing the use of chemicals and operational machinery with respect to the conventional and organic farming systems, per ha and during a reference period of 50 years.

Integrated production aims for the application of more rational farming techniques, profitable, sustainable and healthy products (Hinojosa-Rodríguez et al., 2013). Parra-López et al. (2006)

showed that quality of olive products obtained with integrated management was higher than that obtained from conventional production. Therefore, integrated olive production could be an alternative to traditional and highly intensive systems, and to reduce problems from the use of chemicals in the conventional management in Tunisia. Thus, a guide for Good Practices should be a priority to be implemented for Tunisian farmers.

4.1.5. Irrigation systems

The irrigation systems generated high impacts in all categories per ha (Table 11b), due to the use of water and consumption of electricity by the irrigation systems. On the other hand, the productivity of the irrigated systems was higher than that of the rainfed systems and thus, the impacts in all categories were lower per t (Table 11a).

In the intensive and super-intensive systems, the water and energy consumed, and the high amount of fertilizers applied by fertigation were higher than that of the rest of systems and their productivity was also the highest (Tables 4 to 9). Therefore, from an overall productive point of view, the irrigation systems presented the best results, which agree with the results from Romero-Gómez et al. (2017).

4.2. Environmental impact of the field agricultural practices of the olive growing systems

Studies from Mohamad et al. (2014), De Luca et al. (2018), Guarino et al. (2019), among others, have shown that the agricultural phase in the olive oil production was the main responsible of most of the environmental impacts, especially, fertilizers and soil management, which agree with our study.

4.2.1. Fertilizers

Among all field agricultural practices in the production phases of the fertilized olive systems, fertilizers showed high contributions in most categories. In the full production phase, AA and EC were the categories with the highest contributions (Fig.3), especially in the intensive and super-intensive systems (Fig. 3g, 3h and 3i) caused by the high doses of fertilizers and air emissions of nitrogen fertilizers, as well as the production of electricity by the fertigation system (Table 3 to 9). These impacts in the AA and EC categories were mainly due to emissions of NH₃ to air and Cu to water, respectively (Table 10), with values up to 89% ammonia and 65% copper, in the ICIF2 system. Similar results can be found in Salomone and Ioppolo (2012), Mohamad et al. (2014), Romero-Gómez et al. (2017), De Luca et al. (2018), among others,

where the AA and EC categories presented high impacts due to crop fertilization and/or to consumed energy for irrigation or fertigation.

CC and EU were also categories with high impacts in the ICIF and SICIF systems produced by the agriculture practice “Fertilizers”, mainly caused by N₂O and CO₂ emissions to air and phosphate emissions to water, respectively (Table 10). Therefore, the innovative systems in Tunisia could be designed to mitigate the environmental impacts caused by the fertigation system by optimizing the use of fertilizers and by reducing the consumption of electricity, for example, using renewable energies (Torrellas et al., 2012).

4.2.2. Soil Management

The agricultural equipment and machinery needed for weed control were the main contributors of the impact obtained in the soil management in the traditional systems and in the CC (74% CO₂ emissions to air) and EU (83% phosphate emissions to water) categories (Fig. 3c and 3e). In several LCA studies on olive growing systems, weed control was the main contributor to environmental impacts, especially CO₂ emissions (Salomone and Ioppolo (2012); Iraldo et al. (2014); El Hanandeh and Gharaibeh (2016); De Luca et al. (2018), etc.). Reducing the level of mechanization in the weeding operations could be a solution to mitigate the impacts. De Luca et al. (2018) suggested the use of alternative herbicides and other mechanical weed control techniques to be implemented in these systems and included in future research.

4.2.3. Harvesting

Harvesting showed high contributions in the EU and EC categories in most systems (Fig. 3), caused by the transport of the nets used for olives harvesting and the transportation of olives from the orchard to the mill, as well as the use of machinery to remove the olive trees at the end of full production phase.

4.2.4. Pesticides and pruning

Pesticides and pruning resulted in low environmental impacts, with high contributions in the EU category. The agricultural machinery and consumed diesel for pruning caused high impacts in EU. In these cases, minimizing the wide use of diesel (using biodiesel), could improve the environmental impacts (Rinaldi et al., 2014; Romero-Gómez et al., 2017).

5. Conclusions

This work shows an evaluation of the environmental sustainability of the olive growing systems existing in Tunisia. To our knowledge, this is the first study that calculates the environmental footprint of the production process for all the olive oil growing systems existing in this country (nine systems), from the planting phase to the full production phase (up to six phases), during a period of 50 years and using two functional units.

Six traditional systems, two intensive systems and one super-intensive system were compared. Within these systems, the differences of type of production (conventional or organic), irrigation management (irrigation or rainfed) and fertilization management (with or without fertilization) were analysed. The olive life cycle of each system was divided into six cropping phases depending on fruit production (planting, young, growing, increasing production 1, increasing production 2 and full production).

The primary results obtained in this study are:

- From the productive perspective, the most innovative olive production systems (intensive and super-intensive), resulted in less environmental impacts for all categories with respect to the rest of systems, mainly the intensive system ICIF2 and the super-intensive system (SICIF). These results would support the need for technological innovations in the Tunisian olive oil sector, using an intensive management. However, the cultivated area of these systems currently occupies only a small part of the total area of the country.
- Optimizing the productivity of traditional Tunisian olive systems should also be a priority. The possibility of increasing the planting density on this region may be considered to increase crop production. The organic systems showed the lowest environmental impacts with respect to the traditional and conventional systems in all categories per both FUs. Optimizing the use of compost or using biological foliar fertilizers could be effective in improving the productivity in the organically grown olives.
- Fertilizers and soil management were the agricultural practices that presented the highest contributions in most of the categories evaluated. Especially, fertilizers presented high impacts in all categories in the innovative systems. Therefore, aiming to improve the environmental performance of olives production in Tunisia, the

implementation of an integrated management, as well as good practice guides and training programs for farmers, should be considered a priority.

A sensitivity and uncertainty analysis of the data used in the LCA studies, as well as an exergoenvironmental analysis for evaluating the technical and environmental aspects simultaneously, would be quite interesting for future research works.

Acknowledgements

This work was supported by the Olive Tree Institute of Tunisia (IO) as part of postgraduate studies at the University of Córdoba (Spain). We are grateful to International Olive Oil Council (IOOC) and to Institute of Agricultural and Fisheries Research and Training (IFAPA) (Granada, Spain) for their support in this research.

References

- Accorsi, R., Cascini, A., Ferrari, E., Manzini, R., Pareschi, A., Versari, L., 2013. Life cycle assessment of an extra-virgin olive oil supply chain. In: Presented at the XVIII Summer School Francesco Turco - Industrial Mechanical Plants, Senigallia (AN), Italy.
- AgriDATA, 2019. Statistics of the Tunisian Agricultural Ministry. <http://agridata.tn/>
- Audsley, E., Alber, S., Clift, R., Cowell, S., Crettaz, P., Gaillard, G., Hausheer, J., Jolliet, O., Kleijn, R., Mortensen, B., Pearce, D., Roger, E., Teulon, H., Weidema, B., van Zeijts, H., 1997. Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture. Final Report, Concerted Action AIR3-CT94-2028. European Commission, DG VI Agriculture, 139.
- Avraamides, M., Fatta, D., 2008. Resource consumption and emissions from olive oil production: a life cycle inventory case study in Cyprus. *J. Clean. Prod.* 16, 809-821.
- Beaufoy, G., 2000. The Environmental Impact of Olive Oil Production in the European Union: Practical Options for Improving the Environmental Impact European Commission Directorate-General for Agriculture. <http://www.ec.europa.eu/environment/agriculture/pdf/oliveoil>
- Ben Abdallah, S., Elfkhi, S., Parra-López, C., 2018. A sustainability comparative assessment of Tunisian organic and conventional olive growing systems based on the AHP methodology. *NEW MEDIT N.* 3, 51-68.
- Bernardi, B., Falcone, G., Stillitano, T., Benalia, S., Strano, A., Bacenetti, J., De Luca, A.I., 2018. Harvesting system sustainability in Mediterranean olive cultivation. *Sci. Total Environ.* 625, 1446-1458.
- Busset, G., Belaud, J.P., Clarens, F., Espi, J.J., Montréjaudvignoles, M., Sablayrolles, C., 2012. Life Cycle Assessment of olive oil production in France. 4 th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation. September 10-13, 2012 – Porto, Portugal.
- Chatzisyneon, E., Foteinis, S., Mantzavinos, D., Tsoutsos, T., 2013. Life cycle assessment of advanced oxidation processes for olive mill wastewater treatment. *J. Clean. Prod.* 54, 229–234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.013>.
- Christoforou, E.A., Fokaides, P.A., 2016. Life cycle assessment (LCA) of olive husk torrefaction. *Renew. Energy* 90, 257–266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.022>

- De Gennaro, B., Notarnicola, B., Roselli, L., Tassielli, G., 2012. Innovative olivegrowing models: and environmental and economic assessment. *J. Clean. Prod.* 28, 70-80.
- De Luca, A.I., Falcone, G., Stillitano, T., Iofrida, N., Strano, A., Gulisano, G., 2018. Evaluation of sustainable innovations in olive growing systems: A Life Cycle Sustainability Assessment case study in southern Italy. *J. Clean. Prod.* 171, 1187-1202.
- DGEDA, 2019. Statistics of the General Direction of Studies and Agricultural Development in Tunisia.
- DGPA, 2019. Statistics of the General Direction of Agricultural Production in Tunisia.
- Ecoinvent (2016) Ecoinvent database v.3.2. Swiss Centro for Life Cycle Inventories. www.ecoinvent.org/database/
- EEA (2013) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013. Technical guidance to prepare national emission inventories EEA Technical report No 12/2013 European Environmental Agency.
- El Hanandeh, A., Gharaibeh, M.A., 2016. Environmental efficiency of olive oil production by small and micro-scale farmers in northern Jordan: Life cycle assessment. *Agricultural Systems.* 148, 169-177.
- Environdec, 2020. Product Category Rules Virgin Olive Oil and its Fractions. PCR 2010:07 Version 3.0 2020-03-31. The International EPD® System. www.environdec.com
- European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability (2012) Characterization factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Database and Supporting Information. First edition. February 2012. EUR 25167. Luxembourg. Publications office of the European Union.
- Fernández-Hernández, A., Roig, A., Serramiá, N., García-Ortiz Civantos, C., Sánchez-Monedero, M.A., 2014. Application of compost of two-phase olive mil waste on olive grove: Effects on soil, olive fruit and olive oil quality. *Waste Manage.* 34, 1139-1147.
- Guarino, F., Falcone, G., Stillitano, T., De Luca, A.I., Gulisano, G., Mistretta, M., Strano, A., 2019. Life cycle assessment of olive oil: A case study in southern Italy. *J. Environ. Manage.* 238, 396-407.
- Guiso, A., Parenti, A., Masella, P., Guerrini, L., Baldi, F., Spugnoli, P., 2016. Environmental impact assessment of three packages for high-quality extra-virgin olive oil. *Agric. Eng.* 47, <http://dx.doi.org/10.4081/jae.2016.515>
- Helga, W., Lemoud, J., 2019. The world of organic agriculture. Statistics and emerging trends 2019. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick and IFOAM- Organics International, Bonn. <https://shop.fibl.org/chen/mwdownloads/download/link/id/1202/>
- Hinojosa-Rodríguez, A., Parra-López, C., Carmona-Torres, C., Sayadi, S., Gallardo-Cobos, R., 2013. Certified quality systems and farming practices in olive growing: The case of integrated production in Andalusia. *Renew. Agr. Food Syst.* 29 (4), 291-309.
- IO, 2017a. Guide pratique de l'huile d'olive. Ed. Olive Tree Institute (IO). <http://www.iosfax.agrinet.tn/index.php/news/item/112-guide-pratique-de-l-huile-d-olive>
- IO, 2017b. Techniques de plantation d'olivier. Ed. Olive Tree Institute (IO). <http://www.iosfax.agrinet.tn/index.php/news/item/106-2017-10-30-09-45-07>
- IOOC, 2020. Statistics of the International Olive Oil Council.
- IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 10, Authors: Dong H, Mangino J, Mcallister TA, Hatfield JL, Johnson DE, Lassey KR, de Lima MA, Romanovskaya, A. Emissions from Livestock and Manure Management. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC, 2007. IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>

- Iraldo, F., Testa, F., Bartolozzi, I., 2014. An application of Life Cycle Assessment (LCA) as a green marketing tool for agricultural products: the case of extra-virgin olive oil in Val di Cornia, Italy. *J. Environ. Planning Mgmt.* 57(1), 78-103.
- ISO-14040, 2006. Environmental management—life cycle assessment—principles and framework. International Organization for Standardization ISO, Geneva.
- Jackson, D., Paglietti, L., Ribeiro, M., 2015. Tunisie: Analyse de la filière oléicole. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2015. <http://www.fao.org/3/a-i4104f.pdf>
- Larbi, A., Msallem, M., Sai, M.B., 2017. L'intensification des oliviers en Tunisie: les avantages, les problèmes et les perspectives. Ed. Olive Tree Institute (IO).
- Masmoudi-Charfi, C., Gargouri, K., Habaieb, H., Daghari, H., Abid-Karray, J., Rhouma, A., 2012. Manuel d'irrigation de l'Olivier. Techniques et Applications. 110 p. Ed. Olive Tree Institute (IO).
<http://www.iosfax.agrinet.tn/index.php/news/item/95-manuel-d-irrigation-de-l-olivier>
- Masmoudi-Charfi, C., Msallem, M., Larbi, A., Sai, B., Siala, S., Kchaou, M., 2016. Mise en place et conduite d'une plantation intensive d'oliviers. 115 Diapos. CD. Ed. Olive Tree Institute (IO).
<http://www.iosfax.agrinet.tn/index.php/news/item/99-mise-en-place-et-conduite-d-une-plantation-intensive-d-oliviers>
- 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? *Journal of Environmental Management* 149, 193-208.
- Mohamad, R.S., Verrastro, V., Cardone, G., Bteich, M.R., Favia, M., Moretti, M., Roma, R., 2014. Optimization of organic and conventional olive agricultural practices from a life cycle assessment and life cycle costing perspectives. *J. Clean. Prod.* 70, 78-89.
- Navarro, A., Puig, R., Martí, E., Bala, A., Fullana-i Palmer, P., 2018. Tackling the relevance of packaging in life cycle assessment of virgin olive oil and the environmental consequences of regulation. *Environ. Manage* 62, 277–294. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-018-1021-x>.
- Notarnicola, B., Tassielli, G., Nicoletti, G.M., 2004. Environmental and economic analysis of the organic and conventional extra-virgin olive oil. *New Medit*, vol 3, n.2, 28-34.
- Parascanu, M.M., Sanchez, P., Soreanu, G., Valverde, J.L., Sanchez-Silva, L., 2018. Environmental assessment of olive pomace valorization through two different thermochemical processes for energy production. *J. Clean. Prod.* 186, 771-781.
- Parra-López, C., Calatrava-Requena, J., De Haro-Giménez, T., 2006. A multi-criteria evaluation of the environmental performances of conventional, organic and integrated olive-growing systems in the south of Spain based on experts' knowledge. *Renew. Agr. Food Syst.* 22 (3), 189-203.
- Pattara, C., Salomone, R., Cichelli, A., 2016. Carbon footprint of extra virgin olive_a comparative and driver analysis of different production processes in Centre Italy. *J. Clean. Prod.* 127, 533–547.
- Posch, M., Seppälä, J., Hettelingh, J.P., Johansson, M., Margni, M., Jolliet, O., 2008. The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. *Int J Life Cycle Assess* 13: 477–486. <http://doi.org/10.1007/s11367-008-0025-9>
- Pré Consultants bv 2017. SimaPro 8.5.2.0. Amersfoort. The Netherlands.
- Proietti, S., Sdringola, P., Desideri, U., Zepparelli, F., Brunori, A., Ilarioni, L., Nasini, L., Regni, L., Proietti, P., 2014. Carbon footprint of an olive tree grove. *Appl. Energy.* 127, 115-124.

- Rajaeifar, M.A., Akram, A., Ghobadian, B., Rafiee, S., Heidari, M.D., 2014. Energy-economic life cycle assessment (LCA) and greenhouse gas emissions analysis of olive oil production in Iran. *Energy*, 66, pp. 139-149.
- Rinaldi, S., Barbanera, M., Lascaro, E., 2014. Assessment of carbón footprint and energy performance of the extra virgin olive oil chain in Umbria Italy. *Sci. Total Environ*, 482–483, pp. 71-79.
- Romero-Gámez, M., Castro-Rodríguez, J., Suárez-Rey, E.M., 2017. Optimization of olive growing practices in Spain from a life cycle assessment perspective. *J. Clean. Prod.* 129, 25-37.
- Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Köhler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., Hauschild, M.Z., 2008. USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. *Int J Life Cycle Assess* 13(7): 532-546. <http://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>
- Sai, M.B., Larbi, A., Mestaoui, S., Bayouhd, C., Msallem, M., 2012. Le système hyper intensif de L'olivier a huile en Tunisie après 10 ans: une évaluation technico-economique. *Revue Ezzaitouna* 13.
- Salomone, R., Ioppolo, G., 2012. Environmental impacts of olive oil production: a Life Cycle Assessment case study in the province of Messina (Sicily). *J. Clean. Prod.* 28, 88-100.
- Seppälä, J., Posch, M., Johansson, M., Hettelingh, J.P., 2006. Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator. *Int J Life Cycle Assess* 11(6): 403-416. <http://doi.org/10.1065/lca2005.06.215>
- Struijs, J., Beusen, A., van Jaarsveld, H., Huijbregts, M.A.J., 2009. Aquatic Eutrophication. Chapter 6 in: Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts MAJ, De Schryver A, Struijs J, Van Zelm R (2009) ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation factors, first edition.
- Taxidis, E.T., Menexes, G.C., Mamolos, A.P., Tsatsarelis, C.A., Anagnostopoulos, C.D., Kalburtji, K.L., 2015. Comparing organic and conventional olive groves relative to energy use and greenhouse gas emissions associated with the cultivation of two varieties. *Appl. Energy*, 149, 117-124.
- Tilman, D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R.L., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671-77.
- Torrellas, M., Antón, A., López, J.C., Baeza, E.J., Pérez-Parra, J., Muñoz, P., Montero, J.I., 2012. LCA of a tomato crop in a multi-tunnel greenhouse in Almería. *Int. J. of Life Cycle Assess.* 17(7), 863-875.
- Tsarouhas, P., Achillas, Ch., Aidonis, D., Folinas, D., Maslis, V., 2015. Life Cycle Assessment of olive oil production in Greece. *J. Clean. Prod.* 93, 75-83.
- UN Environment/MAP., 2017. Regional Action Plan On Sustainable Consumption And Production In The Mediterranean. Athens, Greece. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/20731/unepmap_SCPAP_eng_web.p-df?sequence=1&isAllowed=y
- Weiser, C., Zeller, V., Reinicke, F., Wagner, B., Majer, S., Vetter, A., Thraen, D., 2014. Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany. *Applied Energy*, 114, 749-762.

