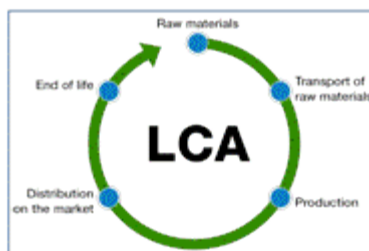




PROPOSAL LIFE 16-ENV-ES-000341

“DESALINATED SEAWATER FOR ALTERNATIVE AND SUSTAINABLE SOILLESS CROP PRODUCTION”



ACTION C1. MONITORING THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF IRRIGATION WITH DESALINATED SEAWATER

“Final report on the impacts of the treatments on energy consumption and carbon dioxide emission. Life Cycle Analysis”

“July 2020”



Universidad
Politécnica
de Cartagena

ÍNDICE

Abstract/Resumen	3
1. Introducción	4
2. Materiales y Métodos.....	4
3. Resultados y Discusión	10
4. Conclusiones/Conclusions.....	14
Referencias	16



Abstract

This report analyzed the environmental sustainability of irrigation with Desalinated Seawater (DSW) in hydroponic systems with drain reuse for tomato cultivation under greenhouse. Life Cycle Analysis (LCA) methodology was applied in accordance with ISO 14040. This methodology attributes to the final product all the environmental effects derived from the consumption of raw material and of energies necessary for its manufacture, the emission and residues generated in the process of production, as well as the environmental effects proceeding from the end of life of the product. The methodology has been applied with the data obtained from four cycles of tomato production carried out in the experimental greenhouse of the *Fundación Finca Experimental UAL-ANECOOP in Retamar (Almería)*. These trials analyzes the effects of (1) conventional water sources against irrigation with DSW, and (2) systems with drainage reuse versus systems that discharge drains into the subsoil. The environmental impacts analyzed have been the global warming potential, the acidification potential of soil and water, the eutrophication potential and the abiotic depletion of resources. Also one impact indicator of special relevancy in the agricultural production have been included in the analysis as water use efficiency. The main conclusions of the final report are, (1) the use of DSW increase of environmental impact in most of the impact categories analyzed; therefore, it is necessary to use renewable energy sources for its production; (2) collect drainages and recycling them reduces acidification, eutrophication and depletion of resources; however it is necessary a rational use of fertilizers; (3) it is necessary to improve the efficiency of water and fertilizers used in hydroponic cultivation, so that it is an environmentally friendly system compared to artificial soil called “enarenado”; and (4) the results about environmental footprint obtained in the project is greater than initially proposal of the project, as consequence to low yield caused by a short cultivation cycles and high doses of inputs; this produced an increase in the final value of all impact categories.

Resumen

En este informe se analiza la sostenibilidad medioambiental del riego con Agua Marina Desalinizada (AMD) en sistemas hidropónicos con reutilización de drenajes para el cultivo de tomate bajo invernadero. La metodología aplicada se basa en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de acuerdo con la normativa ISO 14040. Esta metodología atribuye al producto final todos los efectos ambientales derivados del consumo de materias primas y de energías necesarias para su manufactura, las emisiones y residuos generados en el proceso de producción, así como los efectos ambientales procedentes del fin de vida del producto. La metodología ha sido aplicada con los datos obtenidos del cuatro ciclos de cultivo de tomate realizado en el invernadero experimental de la *Fundación Finca Experimental UAL-ANECOOP en Retamar (Almería)* y analiza específicamente y de forma comparativa los efectos de (1) las fuentes de agua convencionales frente al riego con AMD, y (2) los sistemas con reutilización de drenajes frente a los sistemas que vierten los drenajes al subsuelo. Los impactos ambientales analizados han sido el agotamiento de recursos abióticos, el potencial de acidificación del suelo y el agua, el potencial de eutrofización y el potencial de calentamiento global. También se han incluido en



el análisis la eficiencia del uso del agua como indicador de especial relevancia en la producción agrícola. Como conclusiones del informe final cabe destacar que, (1) el riego con AMD supone un aumento del impacto ambiental en la mayoría de las categorías de impacto analizadas; por lo que es necesario emplear fuentes de energía renovables para su producción; (2) la reutilización de drenajes reduce la acidificación, eutrofización y agotamiento de recursos, pero es necesario un uso racional de los fertilizantes; (3) es necesario mejorar la eficacia del uso del agua y fertilizantes en el cultivo hidropónico, para que sea un sistema de cultivo medioambientalmente competitivo frente al cultivo enarenado; y (4) la huella ambiental obtenida en el proyecto es mayor de lo inicialmente previsto en la memoria, debido a una baja producción asociada a la realización de ciclos cortos de cultivo y un elevado uso de insumos, que ha repercutido en el incremento del valor de final de todas las categorías de impacto.

1. Introducción

Este entregable se enmarca dentro de la Acción C1. MONITORING THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF IRRIGATION WITH DESALINATED SEAWATER, y corresponde a las tareas C1.3.- Monitoring the impacts on the energy, y C1.4.- Monitoring the impacts on the CO₂ emissions.

Este trabajo analiza la sostenibilidad medioambiental del riego con AMD (Agua Marina Desalinizada) en sistemas hidropónicos con reutilización de drenajes para el cultivo de tomate bajo invernadero, a partir de los datos experimentales obtenidos en un ensayo realizado en la Fundación Finca Experimental UAL-ANECOOP, Retamar (Almería).

Se presentan los resultados correspondientes a los cuatro ciclos de cultivo de tomate realizados entre septiembre de 2018 y junio de 2020. La metodología aplicada se basa en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de acuerdo con la normativa ISO 14040, que permite analizar los indicadores de sostenibilidad ambiental del cultivo en los diferentes tratamientos.

2. Materiales y métodos

2.1. Análisis de ciclo de vida

Para el análisis se ha utilizado la metodología de ACV de acuerdo con la normativa ISO 14040. El ACV es un proceso objetivo que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto o cultivo agrícola, identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno, con el fin de determinar el impacto que ese uso de recursos y esos vertidos producen al medio ambiente. Además, permite evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental, así como brindar soporte para la toma de decisiones más rentables, sostenibles y eficientes. Para ello es necesario cuantificar los consumos de materias primas y energía junto con todos los residuos sólidos, emisiones a la atmósfera y vertidos al agua derivados de cada uno de los dos sistemas de producción estudiados. En el caso de los sistemas agrícolas la principal función es la producción de alimentos (Audsley et al., 1997), por tanto, se ha considerado como unidad funcional (FU) de referencia la producción comercial de tomate (1 kg de peso fresco).



2.2. Categorías de impacto

Las categorías de impacto analizadas (Tabla 1) han sido seleccionadas por su relevancia en los procesos agrícolas. Las emisiones relacionadas con procesos agrícolas, las infraestructuras y los fertilizantes son los principales contribuidores al cambio climático. Las emisiones de amonio y nitratos debido al empleo de fertilizantes nitrogenados contribuyen de forma significativa a las categorías eutrofización y acidificación. El agotamiento de recursos abióticos y energéticos naturales se encuentra relacionado con la extracción de minerales y combustibles fósiles, que se producen en la fabricación de los materiales empleados en los sistemas de producción agrícola. Por último, se ha considerado la eficiencia del uso del agua, que es un buen indicador del aprovechamiento de los recursos hídricos. Para la evaluación de las categorías de impacto (Tabla 2) se ha utilizado la metodología CML-IA (Guinée et al., 2002) con el software SimaPro 9.0 (PRe Consultants, 2020).

Tabla 1. Categorías de impacto consideradas en el análisis.

Categoría de impacto	Acrónimo	Unidad
Agotamiento de recursos (elementos minerales)	ADPe	kg Sb _{eq} /FU*
Agotamiento de recursos (combustibles fósiles)	ADPf	MJ/FU
Acidificación potencial	AP	kg SO ₂ eq/FU
Eutrofización potencial	EP	kg PO ₄ ⁻³ eq/FU
Calentamiento global	GWP	kg CO ₂ eq/FU
Eficiencia del uso del agua	WU	FU/m ³

*UF: Unidad Funcional (kg de tomate).

En la categoría de impacto de calentamiento global, que analiza el impacto del CO₂, se ha determinado el calentamiento global provocado por las emisiones de CO₂ propias del cultivo de tomate (Tabla 1), así como el balance de carbono considerando con signo positivo las emisiones de CO₂ provocadas por el cultivo (Tabla 1) y con signo negativo la fijación del carbono biogénico realizado por las plantas. El valor de la fijación de CO₂ por kg de tomate producido ha sido tomado de Victoria et al. (2010), que analiza los cultivos más importantes de la Región de Murcia.

2.3. Tratamientos de riego

En el informe se analiza específicamente y de forma comparativa los efectos de (1) las fuentes de agua convencionales frente al riego con AMD, y (2) los sistemas con reutilización de drenajes frente a los sistemas que vierten los drenajes al subsuelo. Para cuantificar el punto (1), *i.e.* las diferencias entre el uso de AMD y aguas salobres disponibles en la zona de estudio, se realizaron tres tratamientos con diferente salinidad: uno con AMD suministrada por la planta desaladora de Carboneras (T1), y otros dos con aguas de mayor conductividad (T2 y T3) obtenidos por mezcla de AMD y aguas salobres de pozo simuladas. Para cuantificar el punto (2), *i.e.* el impacto de la recirculación de drenajes frente a sistemas abiertos, se instaló un módulo de osmosis inversa alimentado por placas solares que permitió reutilizar parcialmente el agua de los drenajes.



En la Tabla 2 se muestran las fuentes de agua y la energía específica (kWh/m³) correspondiente a los tratamientos de riego utilizados en el ensayo experimental.

Tabla 2. Fuentes de agua utilizadas en el ensayo experimental y energía específica asociada a cada tratamiento de riego.

Código	Descripción	Energía específica (kWh/m ³) ^a	Conductividad eléctrica (ds/m)
T1	AMD procedente de desaladora marina de Carboneras	4.84	1
T2	Agua mezcla de pozo y AMD	3.69	2
T3	Agua mezcla de pozo y AMD	1.77	3

a: Energía específica de las fuentes de agua consideradas: 4.84 kWh/m³, agua procedente de desaladora de Carboneras (Martinez-Alvarez et al., 2019); 0.48 kWh/m³, agua extraída de pozo (Martin-Gorritz et al., 2014).

2.4. Inventario de entradas-salidas

Los ensayos se llevaron a cabo en un invernadero de raspa y amagado tipo Almería sin calefacción y con ventilación cenital natural automatizada. Se utilizaron dos sistemas de cultivo; (1) enarenado tradicional de la zona como sistema sin reutilización de drenajes; y (2) cultivo hidropónico en fibra de coco con sistema con reutilización de drenajes. Los resultados que se muestran en este estudio corresponden al cultivo con plantas de tomate (*Solanum lycopersicum L.*). Se realizaron dos ciclos de otoño-invierno y dos de primavera-verano, entre septiembre de 2018 y junio de 2020; los dos ciclos de otoño-invierno con cv. *Ramyle* y dos ciclos de primavera-verano con cv. *Racymo*.

Para poder realizar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los diferentes tratamientos de riego se ha realizado un inventario de todas las entradas y salidas de materiales y energía necesarias para el cultivo. El inventario permite cuantificar los consumos de materias primas y energía junto con todos los residuos sólidos, emisiones a la atmósfera y vertidos al agua y suelo (cargas medioambientales) derivados de todos los procesos que están dentro de los sistemas de producción del tomate considerados.

Para un estudio más detallado del proceso de producción, este se ha dividido en cuatro fases: (1) Estructura del invernadero, (2) Sistema de riego, (3) Fertilizantes y pesticidas y (4) Manejo del cultivo. En la Fig. 1 se muestra el diagrama de flujo para las fases consideradas en la producción de tomate.

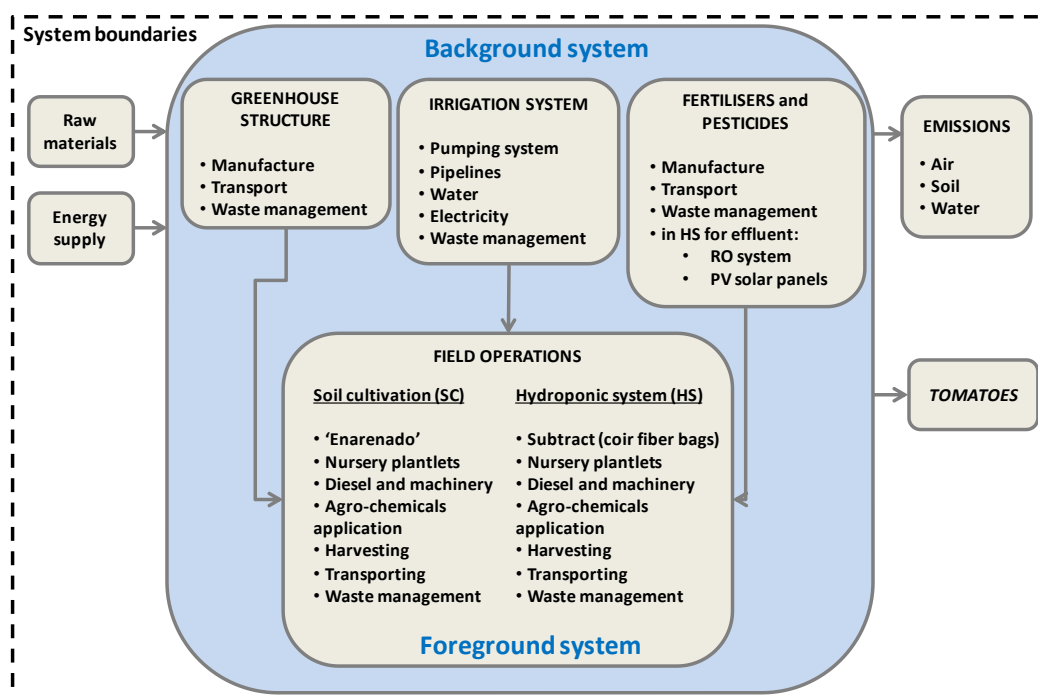


Figura 1. Diagrama de flujo para las fases consideradas en la producción de tomate.

En la *estructura del invernadero* se ha tenido en cuenta la fabricación y transporte del material necesario para crear la estructura y construcción del invernadero y material plástico de la cubierta, pared, etc. La información sobre los materiales para un invernadero tipo Almería ha sido obtenida de Torrellas et al. (2012a), invernadero de características similares al utilizado en los ensayos. Las emisiones producidas en la fabricación de los materiales empleados, su extracción y transporte hasta el lugar de producción; así como la gestión de todos los residuos generados al final de la vida útil de la estructura (15 años), incluyendo su transporte hasta planta gestora, ha sido obtenida de la base de datos Ecoinvent v3.6.

En el *sistema de riego* se han considerado todos los materiales y energía empleados en la fabricación de los elementos necesarios en el sistema de riego, así como el transporte de los mismos. Los materiales considerados han sido: bombas de riego e inyectores; tuberías, válvulas y depósitos de polietileno y PVC; y materiales y movimiento de tierra para la construcción de la balsa de riego. En esta fase también se ha incluido la energía eléctrica consumida en el riego, según la fuente de agua considerada; así como la energía eléctrica consumida para la ventilación (apertura y cierre de ventanas). De igual manera que en la fase de estructura del invernadero, se ha considerado la gestión de los residuos al final de la vida útil de todos los componentes; 10 años para cabezal de riego y tuberías de PVC, y 5 años para tuberías de PE.

En *pesticidas y fertilizantes* se ha incluido, para los pesticidas, su fabricación, transporte y el uso de la maquinaria empleada para su aplicación; así como el combustible. Respecto a los fertilizantes, su proceso de fabricación, las cantidades totales de nitrógeno (N), fósforo (P_2O_5) y potasio (K_2O) aplicadas durante el ciclo de cultivo, así como las emisiones de amoníaco (NH_3), monóxido de dinitrógeno (N_2O) y óxidos de nitrógeno (NO_x) al aire y lixiviación de nitratos

(NO₃) y fosfatos (PO₄) al agua y suelo. En esta fase también se han considerado, para el sistema de cultivo hidropónico, el prototipo de planta de osmosis con paneles fotovoltaicos, empleada para el tratamiento del lixiviado. El empleo de este sistema evita la contaminación de nitratos y fosfatos al agua y suelo. La planta de osmosis está instalada en el interior de un contenedor de transporte, próxima al invernadero, y para su funcionamiento se emplea energía eléctrica de origen renovable generada con paneles solares colocados en el techo del contenedor (Fig. 2). El agua producto de la osmosis se envía a la balsa de agua desalada de regulación de la finca, para utilizarla nuevamente en el riego del cultivo; y el agua rechazo se envía a la balsa de pluviales para emplearla en el riego de jardines. En el cultivo en enarenado se han considerado las emisiones producidas por el estiércol en el invernadero incluido el transporte desde la granja; emisiones de amoníaco (NH₃), monóxido de dinitrógeno (N₂O) y óxidos de nitrógeno (NO_x) al aire; lixiviación de nitratos (NO₃) y fosfatos (PO₄) al agua y suelo.



Figura 2. Planta de osmosis inversa alimentado por energía solar. Izquierda detalle de las placas solares en el tejado del contenedor. Derecha detalle del interior del módulo de osmosis inversa y depósito de lixiviado procedente del invernadero dispuesto para ser tratado.

En *manejo del cultivo*, para ambos sistemas de cultivo se han considerado las plántulas producidas en vivero, el plástico del suelo, cuerdas, etc. En el cultivo enarenado se ha incluido el tractor y maquinaria empleada para realizar el enarenado, incluido el combustible. En el cultivo hidropónico se ha incluido el transporte de la fibra de coco desde la zona de origen (Sri Lanka), su procesado y ensacado; así como las canaletas y otros materiales plásticos específicos para el riego en hidropónico. Una vez finalizado el ciclo de cultivo, se ha considerado el transporte de los sacos de fibra de coco y plásticos al centro de gestión; así como el transporte y gestión de los residuos de biomasa (40% humedad) al centro de gestión, para ambos tipos de sistemas de cultivo.

En la Tabla 3 se muestra el inventario de las principales entradas y salidas de inputs para cada uno de los sistemas de cultivo.



Tabla 3. Inventario de entradas y salidas en los sistemas de cultivo analizados (valor medio \pm desviación estándar).

Entradas / salidas	Unidades por ciclo	Sistema de cultivo					
		Suelo enarenado			Hidropónico		
		T1S	T2S	T3S	T1H	T2H	T3H
Riego	L/m ²	201 \pm 37	202 \pm 34	184 \pm 48	310 \pm 83	338 \pm 79	319 \pm 112
Drenaje en suelo ¹	L/m ²	30 \pm 6	30 \pm 5	28 \pm 7	-	-	-
Lixiviado en hidropónico ¹	L/m ²	-	-	-	62 \pm 17	68 \pm 23	64 \pm 17
Recuperado de la osmosis en hidropónico ¹	L/m ²	-	-	-	43 \pm 12	47 \pm 16	45 \pm 12
Agua usada	L/m ²	201 \pm 37	202 \pm 34	184 \pm 48	267 \pm 71	291 \pm 68	274 \pm 97
Energía consumida en riego	kWh/m ²	1.0 \pm 0.2	0.7 \pm 0.1	0.3 \pm 0.1	1.3 \pm 0.4	1.1 \pm 0.3	0.5 \pm 0.2
Fertilizantes: - N	g/m ²	25.7 \pm 4.8	25.4 \pm 9.2	21.9 \pm 17.1	42.1 \pm 9.4	45.8 \pm 18.7	40.6 \pm 33.1
- P ₂ O ₅	g/m ²	18.8 \pm 4.4	19.6 \pm 11.2	22.7 \pm 8.6	31.0 \pm 9.3	29.8 \pm 16.2	37.3 \pm 56.0
- K ₂ O	g/m ²	51.6 \pm 14.7	66.1 \pm 20.6	52.1 \pm 26.2	85.3 \pm 30.2	104.1 \pm 39.8	80.8 \pm 34.9
Pesticidas: insecticidas y fungicidas	g/m ²	25.5 \pm 4.9	22.5 \pm 7.1	26.5 \pm 8.3	25.0 \pm 5.8	24.8 \pm 5.4	27.0 \pm 5.9
Sustratos: - Estiércol para enarenado	Kg/m ²	2.5	2.5	2.5	-	-	-
- Fibra de coco	Kg/m ²	-	-	-	1	1	1
Producción	Kg/m ²	5.1 \pm 2.2	5.1 \pm 2.1	4.4 \pm 2.5	6.6 \pm 2.3	5.9 \pm 2.8	4.5 \pm 2.3

T1S: cultivo en enarenado regado con agua desalada; T2S: cultivo en enarenado regado con agua de pozo; T3S: cultivo en enarenado regado con agua mezcla; T1H: cultivo en fibra de coco regado con agua marina desalada; T2H: cultivo en fibra de coco regado con agua de pozo; T3H: cultivo en fibra de coco regado con agua mezcla.

¹Lixiviado en hidropónico: 20% y drenaje en suelo: 15% (Urresterazu, 2020); recuperado de la osmosis del lixiviado en H: 70% (valor medio obtenido en los ensayos con el prototipo del proyecto; Fig. 2).

Se ha considerado que el estiércol que se utilizó en el suelo enarenado aportó: 15.2 g/m² N, 5.1 g/m² P₂O₅ y 20.3 g/m² K₂O.

Densidad de plantación: 2 plantas/m². Duración del ciclo: 132 \pm 30 días.



Por último, hay que señalar que se han asumido las siguientes consideraciones:

- Los transportes de insumos hasta la parcela y de cosecha desde la parcela a la central hortofrutícola, se han realizado con vehículos que cumplen con la normativa de emisiones EURO 6 (Ecoinvent, 2020) para una distancia de 50 km.
- La energía específica de cada tratamiento de riego se ha obtenido a partir de la energía específica de cada una la fuente de agua y del porcentaje que supone en la mezcla de cada tratamiento de riego descrito en el apartado 2.3 (Tabla 2).
- Los datos necesarios para el cálculo de las emisiones se han obtenido de la base de datos Ecoinvent (2020), incluyendo los materiales empleados en la instalación del equipo de riego, la fabricación de fertilizantes y pesticidas, producción de electricidad, transporte de materiales y residuos de envases y embalajes. Por otra parte, las emisiones de N (NH₃; N₂O; NO₃) al aire, agua y suelo, y P (PO₄) al agua y suelo, durante el cultivo se han calculado siguiendo la metodología propuesta por Audsley (2000) y Brentrup et al. (2000).
- Las emisiones indirectas derivadas de las infraestructuras de riego externas a las explotaciones agrícolas, como canales, embalses colectivos, redes, plantas desalinizadoras, etc.) no se han considerado en este estudio, siguiendo las recomendaciones de Hospido et al. (2013). Si se ha considerado la planta de osmosis con paneles fotovoltaicos utilizado para recuperar el lixiviado del sistema hidropónico, por tratarse de un equipo específico utilizado solo en uno de los sistemas de cultivo.
- Las emisiones al suelo y agua (nitratos y fosfatos) provocadas por la aplicación de los abonos minerales en el sistema de cultivo hidropónico se han considerado nulas, puesto que al recuperar el lixiviado y tratarlo posteriormente en la planta de osmosis no se produce ninguna emisión de estos compuestos al medio ambiente.
- La fibra de coco es un subproducto de su cultivo (Van Dam and Bos, 2004), por lo que siguiendo las recomendaciones de Boulard et al. (2011) se han considerado exclusivamente las emisiones producidas por su transporte desde el origen, procesado y ensacado. Su sustitución se realiza cada 2 años o 4 ciclos.
- Se han considerado que el enarenado se realiza 1 vez cada 3 años (Valera et al., 2014); por lo que se ha establecido, para las labores, aporte de nutrientes (N-P₂O₅ K₂O) y sus emisiones, un aporte alícuota por ciclo.

3. Resultados y Discusión

En la Tabla 4 se muestran los impactos ambientales de la producción de 1 kg de tomate en los dos sistemas de cultivo y tres tratamientos de agua considerados. La progresiva reducción de AMD (T1>T2>T3) en el cultivo enarenado, produjo una ligera reducción muy similar de todas las categorías de impacto tanto en T2 como en T3 (entre un 1-8% en T2 versus T1 y un 1-9% en T3 vs T1, excepto en WU que prácticamente se mantuvo cte.; Fig. 3); sin embargo, en el cultivo hidropónico (H) se produjo un aumento todas las categorías de impacto; siendo el incremento progresivo en T2 y mayor en T3. Esta diferencia de tendencia en el comportamiento, entre el

cultivo enarenado e hidropónico se produjo porque en el cultivo enarenado prácticamente no hubo reducción de la producción al regar con agua de mayor conductividad (T2 y T3); siendo además el consumo de inputs muy similar en los tres tratamientos; sin embargo, en el cultivo hidropónico la producción se redujo un 30% en T3 respecto a T1 (Tabla 3), lo que provocó un mayor aumento del impacto ambiental, al estar medido en unidades de impacto ambiental por kg de tomate producido. El riego con agua de baja calidad; es decir, de alta conductividad eléctrica, perjudicó más al cultivo hidropónico, que es un sistema de cultivo más tecnificado, que al cultivo enarenado; porque no obtuvo una esperada mayor producción.

Tabla 4. Comparación de los impactos ambientales de la producción de 1 kg de tomate en los seis sistemas de cultivo considerados.

Categoría impacto	Unidad	T1S	T2S	T3S	T1H	T2H	T3H
ADPe	kg Sb _{eq} /FU	1.32E-05	1.26E-05	1.24E-05	1.24E-05	1.41E-05	1.52E-05
ADPf	MJ/FU	2.63	2.43	2.41	2.88	3.13	3.52
AP	kg SO ₂ eq/FU	2.10E-03	1.94E-03	1.90E-03	2.09E-03	2.29E-03	2.50E-03
EP	kg PO ₄ ⁻³ eq/FU	6.82E-04	6.47E-04	6.63E-04	6.28E-04	7.04E-04	8.04E-04
GWP	kg CO ₂ eq/FU	0.31	0.29	0.29	0.32	0.36	0.40
WU	FU/m ³	25	25	24	25	21	20

T1S: cultivo en enarenado regado con agua desalada; T2S: cultivo en enarenado regado con agua de pozo; T3S: cultivo en enarenado regado con agua mezcla; T1H: cultivo en fibra de coco regado con agua marina desalada; T2H: cultivo en fibra de coco regado con agua de pozo; T3H: cultivo en fibra de coco regado con agua mezcla.

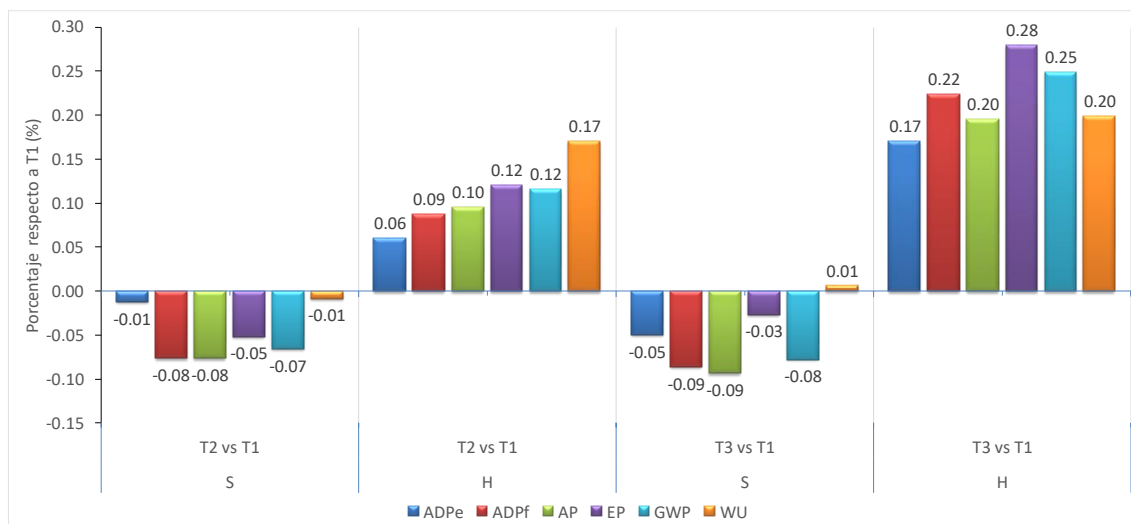


Figura 3. Variación de los indicadores de impacto de los tratamientos de agua T2 y T3 respecto a T1 para cultivo el enarenado (S) y el cultivo hidropónico (H).

Los indicadores de impacto (Tabla 4) no muestran una reducción de la huella ambiental por el uso del sistema hidropónico, a pesar de haber eliminado las emisiones de nitratos y fosfatos al agua y suelo que producían los lixiviados, reduciendo así la acidificación y eutrofización del medio ambiente. Estos se deben fundamentalmente al mayor consumo de inputs en el cultivo hidropónico que en el cultivo enarenado; se utilizó un 40% más de agua, 50% más de energía eléctrica, entre un 60-80% más de fertilizantes sintéticos y entre un 10-30% más de



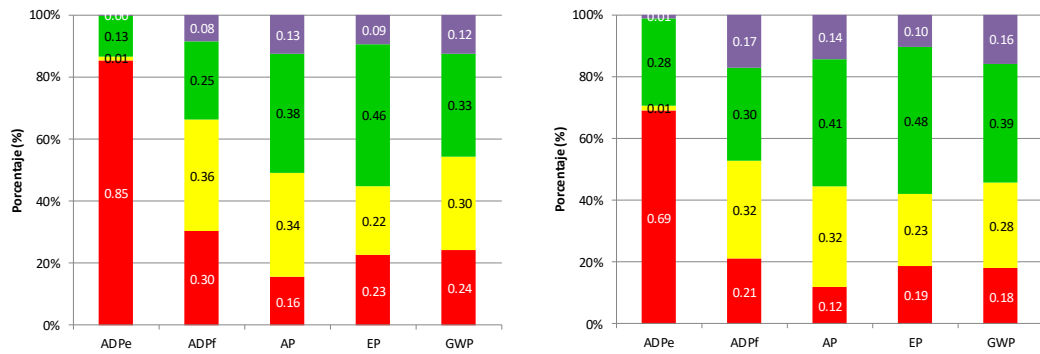
fertilizantes totales; para obtener una producción un 20% superior en el cultivo hidropónico que en el cultivo enarenado. Comparativamente, el escaso incremento de la producción en el cultivo hidropónico en relación con el consumo de inputs es un aspecto limitante en el resultado de los indicadores ambientales que se realiza en este informe.

En general, la intensificación de los sistemas agrícolas, como es el cultivo hidropónico, requiere de nuevos materiales y energía, lo que ha repercutido directamente en el aumento promedio de las categorías de impacto relacionadas como ADPf y GWP, de un 16% y 18% respectivamente. Estos resultados son similares a los obtenidos por otros autores (Castoldi et al., 2011; Martínez-Mate et al., 2018). Sin embargo, también se esperaba que la tecnificación produjese una reducción de otros indicadores de impacto como AP y EP, que no se ha producido por el mayor uso de inputs y principalmente por la baja producción obtenida en el cultivo hidropónico. En lo que respecta a la fertilización, hay que considerar que el estiércol que se ha utilizado en el cultivo enarenado aporta sus nutrientes orgánicos, permitiendo igualar prácticamente la fertilización total de ambos sistemas de cultivo; sin embargo, los nutrientes de origen sintético en el cultivo hidropónico fueron entre un 60-80% mayor que en el cultivo enarenado; lo que repercute negativamente en el cultivo hidropónico debido al impacto ambiental de su producción.

Por otra parte, como consecuencia de haber optado por realizar 2 ciclos cortos al año, en vez de 1 ciclo largo, la producción media anual obtenida ($9.8 \text{ kg/m}^2\text{-año}$) ha sido inferior a la producción media anual del cultivo enarenado en Almería ($19.0 \text{ kg/m}^2\text{-año}$; Valera et al., 2014); lo que ha influido en que los valores de los indicadores de impacto obtenidos en el ensayo hayan sido mayores a los proporcionados por otros autores; p.e. Torrellas et al. (2011) para un cultivo de ciclo largo de tomate en enarenado, obtuvo un valor de GWP un 17% inferior al obtenido en nuestro ensayo ($0.250 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg}$ frente a $0.300 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg}$).

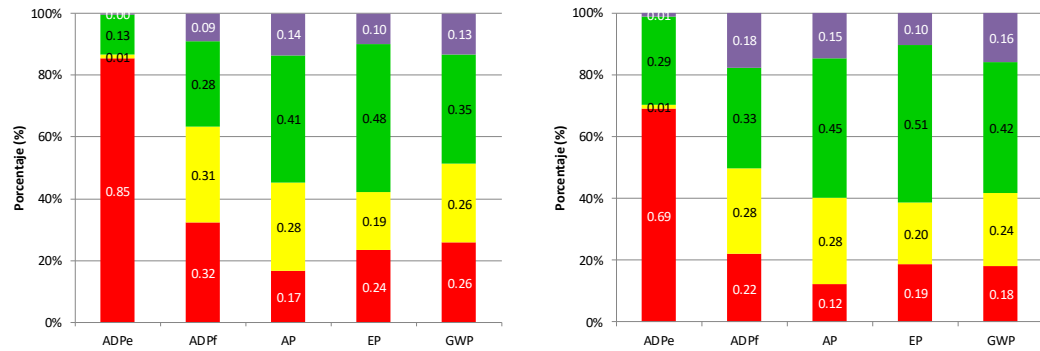
La eficiencia del uso del agua (WU) es otro indicador que también se ha visto afectado por la duración del ciclo. Para un ciclo largo de cultivo la eficiencia del uso del agua es mayor que para un ciclo corto. En las condiciones de Almería, el valor obtenido para un ciclo largo fue de 28.8 L/kg (Torrellas et al., 2012b), mientras que, en nuestros ensayos fue de 50 L/kg ; un 74% superior.

La Fig. 4 muestra la contribución de cada fase del proceso en las categorías de impacto seleccionadas, para cada uno de los seis sistemas de producción de tomate bajo invernadero considerados. La *estructura de invernadero* (barras rojas en Fig. 4) es la fase con mayor carga ambiental en la categoría de ADPf debido a la alta cantidad de materiales empleados, como acero en la estructura y plástico en la cubierta. Por otra parte, la fase de *manejo del cultivo* (barras lilas en Fig. 4) tiene menor importancia en todas las categorías de impacto; sin embargo, comparativamente tiene mayor impacto en el cultivo hidropónico que en el cultivo enarenado (sistemas *b*, *d* y *f* frente a sistemas *a*, *c* y *e* en Fig. 4), en ADPf (17-20% frente a 8-11%) y GWP (16-18% frente a 12-15%). Esto fue debido principalmente al elevado consumo de energía en la fabricación de los plásticos utilizados; y al procesado y transporte de la fibra de coco.



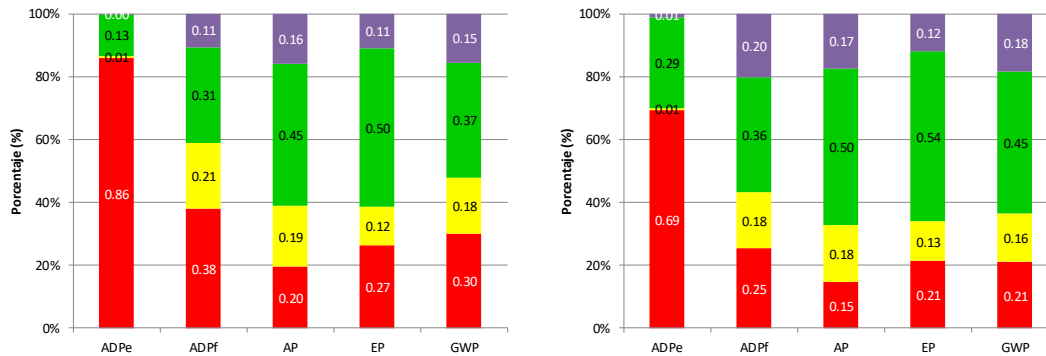
a) Cultivo en enarenado (S) regado con agua T1.

b) Cultivo en hidropónico (H) regado con agua T1.



c) Cultivo en enarenado (S) regado con agua T2.

d) Cultivo en hidropónico (H) regado con agua T2.



e) Cultivo en enarenado (S) regado con agua T3.

f) Cultivo en hidropónico (H) regado con agua T3.

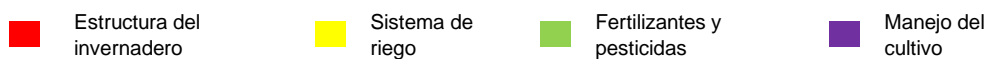


Figura 4. Contribución ambiental de cada fase (ver barras de colores) para las categorías de impacto consideradas (ADPe: agotamiento de recursos minerales; ADPf: agotamiento de combustibles fósiles; AP: acidificación; EP: eutrofización; GWP: calentamiento global) en las 6 estrategias de producción de tomate bajo invernadero combinación de 3 tratamientos de agua (T1: agua procedente de desaladora; T2 y T3 mezclas de agua de desaladora y agua de pozo) y 2 sistemas de cultivo (S: cultivo en suelo enarenado y H: cultivo hidropónico).

El sistema de riego (barras amarillas en Fig. 4), destaca por la reducción progresiva del impacto en las categorías ADPf, AP, EP y GWP al reducir el consumo de agua desalada (T1 → T2 → T3). Esto fue debido al menor consumo de energía eléctrica necesaria para su producción; tanto en el cultivo hidropónico como en cultivo enarenado. Por último, los *fertilizantes y pesticidas* (barras verdes en Fig. 4), destacan en las categorías de impacto de AP y EP, que representan alrededor del 50% de estas categorías; y proporcionalmente más en el cultivo hidropónico que en el cultivo enarenado, para el mismo tratamiento de riego. Esto fue debido a la mayor dosis de fertilizantes sintéticos empleados en el cultivo hidropónico, a pesar de que en este sistema de cultivo no se produce vertido del lixiviado al suelo y agua.

Finalmente, en la Fig. 5 se muestra el balance de CO₂ por unidad de superficie, considerando la remoción de CO₂ del cultivo. Se ha considerado una remoción media de 8120 CO₂ kg/ha; el 50% del valor anual proporcional por Victoria et al. (2010). Aplicando el balance se reducen, de promedio, un 48% las emisiones totales de CO₂ del cultivo. Como las emisiones de CO₂ generadas en el cultivo hidropónico fueron mayores que en el cultivo enarenado (Tabla 3), el resultado del balance es, de promedio, de 12250 CO₂ kg/ha para el cultivo hidropónico frente a 6416 CO₂ kg/ha para el cultivo enarenado.

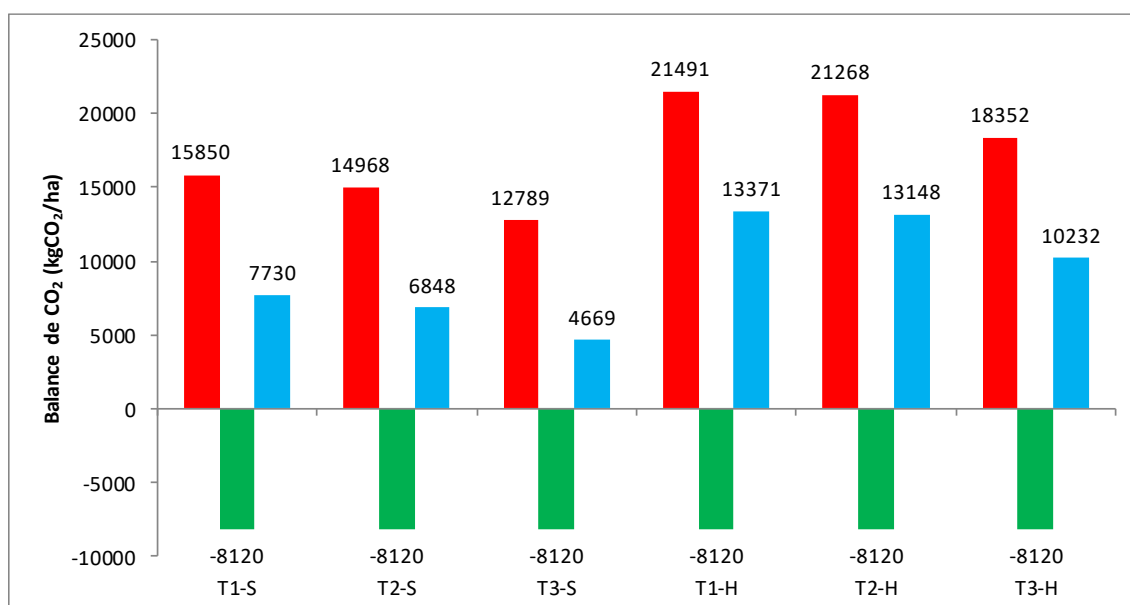


Figura 5. Emisiones de CO₂ (barras rojas), fijación de CO₂ (barras verdes) y balance neto de CO₂ (kg CO₂ eq/ha-ciclo) en las 6 estrategias de producción de tomate bajo invernadero. T1: agua procedente de desaladora; T2 y T3 mezclas de agua de desaladora y agua de pozo (S: suelo, H: hidropónico).

Como alternativas para reducir el impacto ambiental del cultivo de tomate en cultivo hidropónico se proponen: (1) reducir la dosis de fertilizantes; para que no afecte negativamente en categorías de impacto como AP, EP y GWP; (2) ampliar un 25% el uso de la fibra de coco, para reducir la huella ambiental de su transporte; o bien se propone como alternativa realizar el cultivo enarenado sobre una capa de plástico, lo que permitiría recoger y tratar el lixiviado que se produce en este sistema de cultivo, evitando así la contaminación del medio ambiente; y (3) emplear fuentes de energía renovables para la producción y manejo del



AMD, lo que reduciría las emisiones de gases de efecto invernadero, reduciendo el GWP. Según Torrellas et al. (2012a), se estima que una reducción de la fertilización de un 30% reduce un 10% GWP y un 15% EP; y un aumento del 40% de energías renovables produce un 25% AP y un 6% ADP.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones obtenidas respecto a la sostenibilidad medioambiental del riego con AMD en sistemas hidropónicos con reutilización de drenajes para el cultivo de tomate bajo invernadero son:

- El uso de AMD supone un aumento del impacto ambiental en la mayoría de las categorías de impacto analizadas; por lo que es necesario emplear fuentes de energía renovables para su producción y manejo.
- La reutilización de drenajes reduce la acidificación, eutrofización y agotamiento de recursos; pero, aun así, es necesario un uso racional de los fertilizantes.
- La huella ambiental obtenida en el proyecto es mayor de lo previsto inicialmente en la memoria. Estos resultados se han debido a una baja producción asociada a la realización de ciclos cortos de cultivo y un elevado uso de insumos; lo que ha repercutido en el incremento del valor de final de todas las categorías de impacto.
- Es necesario mejorar la eficacia del uso del agua y fertilizantes en el cultivo hidropónico, para que sea un sistema de cultivo competitivo frente al cultivo enarenado que se realiza tradicionalmente en la zona; y que presenta la ventaja de recuperar el lixiviado, evitando así la contaminación del medio ambiente; pero que no se ha podido cuantificar en este proyecto.

4. Conclusions

The main conclusions of the trials about the environmental sustainability of irrigation with Desalinated Seawater (DSW) in hydroponic systems with drain reuse for tomato cultivation under greenhouse are:

- The use of DSW increase of environmental impact in most of the impact categories analyzed; therefore, it is necessary to use renewable energy sources for its production.
- Collect drainages and recycling them reduces acidification, eutrophication and depletion of resources; however, it is necessary a rational use of fertilizers.
- It is necessary to improve the efficiency of water and fertilizers used in hydroponic cultivation, so that it is an environmentally friendly system compared to artificial soil called “enarenado”.
- The results about environmental footprint obtained in the project is greater than initially proposal, as consequence to low yield caused by a short cultivation cycles and high doses of inputs; this produced an increase in the final value of all impact categories.



Referencias

- Antón A., Montero J.I., Muñoz P., Castells F. 2005. LCA and tomato production in Mediterranean greenhouses, *Int. J. Agric. Resour. Gov. Ecol.* 2005, 4 (2), 102–112.
- 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, Reino Unido.
- Audsley E. 2000. Systematic procedures for calculating agricultural performance data for comparing systems. En: Weidema, B., Meeusen, M. (eds.). *Agricultural data for life cycle assessments*, 1, 35–46. Agricultural Economics Research Institute, La Haya, Países Bajos.
- Boulard T., Raeppele C., Brun R., Lecompte F., Hayer F., Carmassi G., Gaillard G. 2011. Environmental impact of greenhouse tomato production in France. *Agron. Sustain. Dev.* 31(4), 757–777.
- Brenttrup F., Küsters J., Lammel J., Kuhlmann H. 2000. Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. *Int. J. Life Cycle Assess.* 5(6), 349–357.
- Castoldi N., Bechini L., Ferrante A. 2011. Fossil energy usage for the production of baby leaves. *Energy*, 36, 86–93.
- Ecoinvent, 2020. Ecoinvent Data. Swiss Centre for Life Cycle Inventories [<http://www.ecoinvent.org>]
- Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M.A.J. 2002. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 692 p.
- Martin-Gorriz B., Soto-García M., Martínez-Alvarez V. 2014. Energy and greenhouse-gas emissions in irrigated agriculture of SE (southeast) Spain. Effects of alternative water supply scenarios. *Energy* 77, 478–488. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.031>
- Martinez-Alvarez V., Maestre-Valero J.F., Gonzalez-Ortega M.J., Gallego-Elvira B., Martin Gorriz B. 2019. Characterization of the agricultural supply of desalinated seawater in Southeastern Spain. *Water* 11, 1233. <https://doi.org/10.3390/w11061233>
- Martinez-Mate M.A., Martin-Gorriz B., Martínez-Alvarez V., Soto-García M., Maestre-Valero J.F. 2018. Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farm-productive proposal in water scarcity areas: energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain. *J. Clean. Prod.* 172, 1298–1310. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.275>
- PRe Consultants, 2020 [www.pre-sustainability.com]
- Torrellas M., Antón A., Montero J.I. Baeza E.J., López J.C., Pérez Parra J. 2011. Estudio del impacto ambiental del cultivo de tomate en un invernadero multitúnel. *Revista de Horticultura*. <http://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/47367-Estudio-del-impacto-ambiental-del-cultivo-de-tomate-en-un-invernadero-multitunnel.html> (accessed 24 Jun 2020).
- Torrellas M., Antón A., Ruijs M., García Victoria N., Stanghellini C., Montero J.I. 2012a. Environmental and economic assessment of protected crops in four European scenarios. *J. Clean. Prod.* 28, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.012>
- Torrellas M., Antón A., López J.C., Baeza E.J., Pérez Parra J., Muñoz P., Montero J.I. 2012b. LCA of a tomato crop in a multi-tunnel greenhouse in Almería. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 863–875. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0409-8>.
- Urresterazu M. 2020. Universidad de Almería. Comunicación Personal. Reunión del proyecto Deseacrop.
- Van Dam J.E.G., Bos H.L. 2004. The environmental impact of fibre crops in industrial applications. https://www.researchgate.net/publication/40110933_The_environmental_impact_of_fibre_crops_in_industrial_applications (accessed 05 Jun 2020).
- Valera D., Belmonte L.J., Molina F.D., López A. 2014. Los invernaderos de Almería: análisis de su tecnología y rentabilidad. *Cajamar Caja Rural*. 504 p.
- Victoria F. 2010. Etiquetado de carbono en las explotaciones y productos agrícolas. La iniciativa murciana como sumidero de CO₂. CARM. <http://www.lessco2.es/documentacion.htm> (accessed 24 Jun 2020).