



Universidad
Politécnica
de Cartagena



Grupo de Trabajo de Planificación Hidrológica

Análisis agronómico, económico y ambiental de distintos escenarios de sustitución de aguas del trasvase Tajo-Segura por agua marina desalinizada

Autores:

Dr. Ing. Victoriano Martínez Álvarez

Dr. Ing. Bernardo Martín Górriz



Universidad Politécnica de Cartagena



Grupo de Trabajo de Planificación Hidrológica

Sobre este informe

Este informe ha sido promovido por la Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente de la Región de Murcia, a través de su Grupo de Trabajo de Planificación Hidrológica. El trabajo se enmarca en la línea nº 4 de actuación de este Grupo, cuya finalidad es el estudio de los impactos del recorte o paralización del trasvase Tajo-Segura sobre la cuenca del Segura.

El objetivo del informe es analizar por primera vez, desde una perspectiva multidisciplinar (agronómica, económica y ambiental), el impacto sobre los principales cultivos de la cuenca del Segura de la progresiva sustitución de aguas del trasvase Tajo-Segura (u otras fuentes continentales) por agua marina desalinizada. Para ello, se han definido distintos escenarios representativos de la situación actual y de posibles situaciones futuras de suministro en los regadíos asociados al Trasvase Tajo-Segura, así como indicadores específicos para la caracterización agronómica, económica y ambiental bajo estos escenarios. Además, se pretende extrapolar los valores obtenidos a los regadíos de las Zonas regables del trasvase Tajo-Segura, considerando una desagregación especial por Unidades de Demanda Agrícola (UDAs).

Sobre los autores

Los autores de este informe, Drs. Victoriano Martínez Álvarez y Bernardo Martín Górriz, son catedráticos de la Universidad Politécnica de Cartagena y forman parte del Grupo de Investigación “Diseño y Gestión en Agricultura de Regadío”. Durante la elaboración del informe también se ha contado con la colaboración del Dr. José Francisco Maestre Valero y la Dra. Belén Gallego Elvira en materia de agronomía del riego y fertirrigación, respectivamente.

Este grupo comenzó a trabajar en distintos aspectos relacionados con la incorporación de agua marina desalinizada al riego de cultivos en el sureste español en 2014, habiendo desarrollado en los últimos 5 años proyectos de ámbito nacional y europeo en esta temática. Entre estos destacan el Proyecto Life “Desalinated Seawater for alternative and sustainable soilless crop production – DESEACROP”; el proyecto Retos Sociedad “Sostenibilidad agro-fisiológica, ambiental y económica del riego con agua marina desalinizada en cítricos y sistemas hidropónicos cerrados”; y el proyecto Retos Colaboración “Nuevos avances tecnológicos para un manejo sostenible del riego con agua marina desalinizada”. Fruto de estos estudios son distintas publicaciones en revistas científicas indexadas en las primeras posiciones de la base de datos JCR (Web of Science) e informes técnicos específicos para distintas instituciones, cuyos resultados avalan la experiencia y posición de liderazgo del grupo de trabajo en la temática objeto de este estudio, tanto a escala nacional como internacional.

Informe presentado en diciembre de 2021

Índice

Página

Resumen Ejecutivo	1
1. Introducción y objetivos	7
2. Metodología y alcance del estudio.....	10
2.1. Aguas de referencia consideradas en el estudio.....	11
2.2. Justificación de los escenarios considerados	14
2.3. Justificación de los cultivos considerados.....	18
2.4. Análisis agronómico.....	21
2.5. Análisis ambiental.....	29
2.6. Análisis económico	35
2.7. Extrapolación de resultados a las Zonas Regables del TTS	36
3. Resultados.....	39
3.1. Análisis agronómico por cultivos y escenarios.....	39
3.2. Análisis ambiental por cultivos y escenarios	49
3.3. Análisis económico por cultivos y escenarios	60
3.4. Extrapolación de resultados a las Zonas Regables del TTS.....	73
4. Síntesis y Conclusiones	105
Referencias.....	118

Resumen Ejecutivo

La persistente escasez de recursos hídricos en la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS) ha impulsado la utilización de recursos hídricos no convencionales en el regadío, como el Agua Marina Desalinizada (AMD). Los efectos del cambio climático y las actuaciones de planificación hidrológica anunciadas hacen prever una disminución de los recursos hídricos convencionales disponibles, tanto en la propia cuenca del Segura como en las aportaciones recibidas a través del Trasvase Tajo-Segura (TTS). Como consecuencia, es previsible una progresiva sustitución de los recursos hídricos del TTS, u otras fuentes continentales, por AMD.

El objetivo de este informe es disponer, por primera vez y desde una perspectiva multidisciplinar (agronómica, ambiental y económica), de un análisis del impacto de la progresiva sustitución de aguas del TTS, u otras fuentes continentales, por AMD en los principales cultivos de regadío de la cuenca del Segura. Además, se han extrapolado los resultados a las zonas regables asociadas al TTS, como ámbito geográfico cuya principal fuente de suministro es el TTS, y donde ya se está produciendo el mayor aporte de AMD. Esta extrapolación ha permitido analizar la variabilidad espacial de los impactos y conocer sus magnitudes características para dicha zona de estudio.

La metodología seguida ha consistido en la identificación de distintos indicadores de impacto agronómico (3), ambiental (5) y económico (2). Estos indicadores se han evaluado, a partir de datos procedentes de fuentes oficiales (administraciones públicas) y artículos científicos, para los 10 cultivos de regadío que más superficie ocupan en la Región de Murcia, y bajo 3 escenarios de suministro de agua de riego, donde se contempla la sustitución progresiva de aguas del TTS y otras fuentes disponibles por AMD.

En el análisis agronómico se han considerado 3 indicadores de impacto: el valor económico de la producción (**VEP**, €/ha), para evaluar los efectos de la salinidad del agua en la producción agrícola; las necesidades totales de riego (**N_t**, m³/ha) para evaluar los efectos de la salinidad del agua en las necesidades de lavado de sales, y consecuentemente en las necesidades totales de riego; y el coste de los fertilizantes (**CF**, €/ha) que evalúa el efecto de la escasez de nutrientes en el AMD en las necesidades de fertilización. Respecto al análisis ambiental, se han considerado 5 indicadores de impacto, que coinciden con las principales categorías de impactos resultantes de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV): agotamiento abiótico de materias primas (**ADe**, kg Sb_{eq}/ha), agotamiento abiótico de combustibles fósiles (**ADf**, MJ/ha), acidificación (**AC**, kg SO_{2 eq}/ha), eutrofización (**EU**, kg PO_{4 eq}/ha) y

calentamiento global (**GW**, kg CO₂ eq/ha). Finalmente, en el análisis económico, los indicadores de impacto han sido el margen bruto estándar (**MBE**, €/ha) y un indicador de efecto económico relativo (**IEER**, €/ha).

Los cultivos seleccionados se han organizado en cuatro grupos, siguiendo la misma clasificación recogida en la Propuesta de Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2022/27 (PPHDS 2022/27): hortícolas al aire libre (alcachofa, brócoli, lechuga y melón), cítricos (limonero, mandarino y naranja), frutales no cítricos (albaricoquero y melocotonero) y almendro (almendro). Estos grupos representan el 90,23% de los cultivos implantados en el conjunto de las zonas regables asociadas al TTS, lo que pone de manifiesto la representatividad de los resultados obtenidos para la zona de estudio.

Se han definido 3 escenarios de suministro de agua de riego, que se consideran representativos de la situación inicial en las zonas regables asociadas al TTS y de posibles situaciones futuras: escenario de referencia (0% AMD), que se corresponde con un suministro de distintas fuentes de agua (superficiales, subterráneas, regeneradas y TTS) proporcional a los derechos de riego reconocidos en la PPHDS 2022/27 para las zonas regables del TTS, sin considerar las concesiones recientes de desalación; escenario de uso conjunto (50% AMD), donde se considera un 50% del suministro con AMD, mientras que el 50% restante procede del resto de fuentes disponibles de forma proporcional a los derechos de riego reconocidos en la PPHDS 2022/27 para las zonas regables del TTS; y escenario de riego con AMD (100% AMD), donde se sustituyen todos suministros de agua de riego por AMD.

Los resultados por indicadores de impacto agronómico ponen de manifiesto que el valor económico de la producción (VEP, €/ha) aumenta para todos los grupos de cultivos conforme aumenta el porcentaje de AMD, incremento que es más relevante para los frutales no cítricos (albaricoquero y melocotón) por ser los más sensibles a la salinidad. Además, el incremento del VEP entre los escenarios con 0% y 50% de AMD es bastante más importante que entre los escenarios con 50% y 100% de AMD, por lo que se observa una saturación de este beneficio agronómico conforme se incrementa la proporción de AMD. Las necesidades totales de riego (Nt, m³/ha) disminuyen para todos los grupos de cultivo conforme aumenta el porcentaje de AMD al disminuir las necesidades de lavado de sales, sin diferencias significativas de comportamiento entre ellos. Se trata de una pequeña disminución que se comporta de forma prácticamente lineal con el porcentaje de AMD en el suministro, y que representa un pequeño beneficio agronómico para el agricultor. Respecto al coste de la fertilización (CF, €/ha)

aumenta para todos los grupos de cultivo conforme aumenta el porcentaje de AMD, incremento que es más importante entre los escenarios con 50% y 100% de AMD que entre los escenarios con 0% y 50% de AMD, es decir, bajo el escenario de uso conjunto se consigue mitigar parcialmente el sobrecoste por la escasez de nutrientes en el AMD. Para todos los grupos de cultivos los incrementos de CF conforme se incorpora AMD son bastante menores que los incrementos de VEP.

Por lo que se refiere a los indicadores de impacto ambiental, su variación entre escenarios presenta el mismo comportamiento en todos ellos, por lo que se analizan de forma conjunta. Los 5 indicadores incrementan sus valores de conforme se incrementa la proporción del AMD, lo que representa un incremento de la carga ambiental y cuestiona la sostenibilidad de sustituir el suministro del TTS u otras fuentes de agua por AMD. La magnitud del valor de los indicadores ambientales y de su variación entre escenarios resulta proporcional a las necesidades de riego de los cultivos, ya que dichos indicadores están muy influenciados por el consumo energético asociado al suministro del agua de riego, que es la fase del ACV que produce mayor impacto ambiental según todos los indicadores.

Respecto a los indicadores de impacto económico, el margen bruto estándar (MBE, €/ha) muestra un comportamiento heterogéneo por grupos de cultivos: los hortícolas al aire libre disminuyen el MBE conforme aumenta la proporción de AMD; los cítricos presentan un incremento para el escenario con 50% de AMD y una disminución para el escenario con 100% de AMD; y los frutales no cítricos y el almendro incrementan su valor en ambos escenarios de incorporación de AMD, pero resulta económicamente más interesante el escenario de uso conjunto (50% AMD). El indicador de impacto económico relativo (IEER, €/ha) muestra comportamientos similares al MBE, pero su valor refleja el impacto económico con relación al escenario de referencia (0% AMD) en los distintos grupos de cultivos. En términos absolutos, los hortícolas al aire libre presentan unas pérdidas relativas de rentabilidad de 921 €/ha en el escenario con 50% de AMD, y de 2.433 €/ha con 100% de AMD. En cítricos, el escenario con 50% de AMD produce unas ganancias relativas de 458 €/ha, mientras que con 100% de AMD se obtienen pérdidas relativas de 267 €/ha. Los frutales no cítricos presentan beneficios relativos de 3.695 y 3.452 €/ha para los escenarios con 50% y 100% de AMD, respectivamente, y el almendro de 529 y 133 €/ha para dichos escenarios, también respectivamente. En todos los casos, resulta necesario destacar que estas cifras de rentabilidad relativa están muy condicionadas por los datos de productividad y del valor de la cosecha en el último año con datos publicados por el MAPA (2016), siendo especialmente favorable en esa campaña para los frutales no cítricos.

La extrapolación del valor de los indicadores de impacto para cada uno de los cultivos y escenarios considerados a las zonas regables asociadas al TTS se ha realizado adoptando como unidad territorial de cálculo las Unidades de Demanda Agrícola (UDAs) definidas en la PPHDS 2022-2027. A continuación, se recoge el valor de los indicadores obtenidos para el conjunto de las zonas regables del TTS en cada escenario, así como su variación con respecto al escenario de referencia. La magnitud total de cada impacto se puede obtener multiplicando los valores de la tabla por la superficie neta de las zonas regables del TTS (95.599 ha).

Valor de los indicadores para el conjunto de las zonas regables del TTS en cada escenario y variación con respecto al escenario de referencia.

Indicador	Unidad	Referencia (0% AMD)	Uso Conjunto (50% AMD)	Riego con AMD (100% AMD)
VEP	€/ha	11.456	13.520 (+18,0%)	14.084 (+22,9%)
N _t	m ³ /ha	7.490	7.177 (-4,2%)	6.890 (-8,0%)
CF	€/ha	1.571	1.653 (+5,2%)	1.838 (+17,0%)
ADe	kg Sb _{eq} /ha	0,174	0,212 (+21,8%)	0,234 (+34,5%)
ADf	MJ/ha	115.929	161.427 (+39,2%)	194.016 (+67,4%)
AC	kg SO _{2 eq} /ha	64,57	92,33 (+43,0%)	113,35 (+75,6%)
EU	kg PO _{4 eq} /ha	31,00	37,82 (+22,0%)	41,98 (+35,4%)
GW	kg CO _{2 eq} /ha	9.937	13.817 (+39,01%)	16.606 (+67,1%)
MBE	€/ha	6.451	6.860 (+6,3%)	5.910 (-8,4%)
IEER	€/ha	0	409	-541

Indicadores de impacto: valor económico de la producción (VEP); necesidades totales de riego (N_t), coste de la fertilización (CF); agotamiento abiótico de materias primas (ADe); agotamiento abiótico de combustibles fósiles (ADf); acidificación (AC); eutrofización (EU); calentamiento global (GW); margen bruto estándar (MBE); indicador de efecto económico relativo (IEER).

La adopción de las UDAs como unidad territorial de cálculo también permite analizar la variabilidad espacial de los indicadores. El valor de los indicadores en las distintas UDAs está condicionado por los cultivos dominantes en cada una de ellas, pudiéndose diferenciar, de forma general, tres zonas: la zona con predominio de cultivos hortícolas al aire libre, situadas fundamentalmente en el Valle del Guadalentín y Campo de Cartagena (UDAs 52, 58, 61, 65, 66, 70 y 71); las zonas con predominio de cítricos, situadas en la Vega Baja y sus inmediaciones (UDAs 53, 54, 56, 59 y 72); y las zonas con predominio de frutales no cítricos y almendro, que se sitúan en la Vega Media-Alta (UDAs 26, 37, 38, 40, 41 y 73). Así, los indicadores de impacto agronómico (VEP, N_t y CF) y ambiental (ADe, ADf, AC, EU, y GW) no muestran diferencias significativas en su comportamiento espacial entre escenarios, ya que muestran las mismas tendencias

de variación para todos los grupos de cultivos. Únicamente se observan variaciones espaciales en la magnitud del indicador cuando existen diferencias importantes en la magnitud de dicho indicador entre los grupos de cultivos. Sin embargo, los indicadores de impacto económico sí presentan diferencias espaciales de comportamiento: en las UDAs con dominio de hortícolas al aire libre siempre se produce una pérdida económica, bastante más intensa para el escenario de riego con AMD (100% AMD) que para el escenario de uso conjunto (50% AMD); en las UDAs con dominio de cítricos se produce un pequeño beneficio en el escenario de uso conjunto (50% AMD), que prácticamente desaparece cuando se alcanza el 100% de AMD; y en las UDAs con predominio de los frutales no cítricos, siempre se produce una ganancia económica, más favorable en el escenario de uso conjunto (50% AMD) que en el de riego con AMD (100% AMD).

Los resultados de este informe deben considerarse como una primera aproximación a la problemática estudiada, donde los recursos disponibles para su desarrollo se han destinado a desarrollar una visión global de la cuestión, en lugar de a profundizar en aspectos concretos. Se considera, por tanto, que los resultados presentan suficiente robustez para valorar de forma general la magnitud y relevancia de los impactos identificados, pero deben ser tratados con cautela porque: (1) están condicionados por las singularidades agroclimáticas y de mercado durante el año en se han obtenido los datos económicos y productivos (2016, último año publicado por el MAPA a través del ECREA), y (2) no son representativos de casos concretos, sino de escenarios generales obtenidos a partir de la enorme diversidad de la zona de estudio. Las principales conclusiones que se derivan de los resultados del informe son:

1. Los resultados reflejan una variabilidad importante en la magnitud de los impactos para los cultivos considerados, aunque la variación de los indicadores entre escenarios con suministro creciente de AMD sigue las mismas tendencias para todos los grupos de cultivo, excepto en el caso de los indicadores de tipo económico (MBE y IEER), donde se observan comportamientos diferentes por grupos de cultivo.
2. El impacto agronómico es favorable, y más relevante cuanto mayor es la sensibilidad del cultivo a la salinidad del agua de riego. La progresiva sustitución de los recursos hídricos disponibles por AMD conlleva mejoras en la productividad de los cultivos y reducciones en las necesidades de riego, cuya valorización económica supera holgadamente a los sobrecostes en la fertilización por la baja mineralización del AMD. La mejora en la productividad de los cultivos se reduce

notablemente conforme disminuye la salinidad del agua, por lo que el sentido favorable del impacto agronómico presenta cierta saturación cuando se supera el 50% de AMD.

3. El impacto ambiental es desfavorable e importante. La progresiva sustitución de los recursos hídricos disponibles por AMD implica un incremento creciente de la carga ambiental asociada a la producción agrícola, lo que cuestiona la sostenibilidad de la agricultura de regadío en las zonas regables asociadas al TTS bajo escenarios con un elevado porcentaje de suministro de AMD. Esta circunstancia se debe al notable incremento del consumo energético asociado al suministro de AMD, y podría mitigarse mediante el empleo de energías renovables.
4. El impacto económico ofrece resultados heterogéneos entre los grupos de cultivos, ya que integra la valoración económica de los efectos agronómicos junto al efecto de la incorporación de AMD en el coste del agua. Sin embargo, en todos los casos resulta más beneficioso para el agricultor el escenario de uso conjunto (50% AMD) que el de riego con AMD (100% AMD). Resulta conveniente indicar que el impacto económico está muy condicionado por los datos de productividad y valor de la cosecha considerados (datos del ECREA en 2016), y por el coste del AMD (0,6 €/m³ en este estudio), variables sujetas a una gran variabilidad interanual. En este sentido, el incremento del coste de la energía eléctrica en los últimos meses ya está comenzando a trasladarse al precio del AMD. Se ha estimado que por cada 0,1 €/m³ de incremento en el precio del AMD se produce un descenso medio de 682 €/ha en los indicadores de impacto económico para el escenario de con 100% AMD.
5. Se puede afirmar que el escenario de uso conjunto (50% AMD) resulta más interesante que el de riego con AMD (100% AMD) desde las distintas perspectivas consideradas en este estudio: los impactos agronómicos (favorables) presentan saturación para porcentajes de AMD por encima del 50%; los impactos ambientales (desfavorables) aumentan de forma prácticamente lineal con el porcentaje de AMD, y los impactos económicos (favorables o desfavorables en función del cultivo) siempre resultan mejores en el escenario de uso conjunto que en el de riego con AMD.
6. En la zona de estudio (zonas regables asociadas al TTS), desarrollar un escenario de uso conjunto del AMD con otras fuentes sólo parece viable manteniendo aportes importantes del TTS, ya que representa el 55,5% de los derechos de riego reconocidos por la PPHDS 2022/27 en las zonas regables asociadas al TTS.

1. Introducción y objetivos

La persistente escasez de recursos hídricos en el sureste español ha impulsado la utilización de fuentes no convencionales, como la reutilización de aguas regeneradas y la desalinización de agua de mar, especialmente en la agricultura de regadío. Como consecuencia, en la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS) ya se está reutilizando cerca del 100% del volumen de agua regenerada para riego (aproximadamente 100 hm³/año) y, además, se están incorporando en torno a 150 hm³/año de Agua Marina Desalinizada (AMD) al regadío. Mientras que la reutilización ya ha alcanzado su máximo potencial en la región, la incorporación de AMD todavía presenta una capacidad inmediata de crecimiento en la DHS, hasta alcanzar la máxima prevista en las plantas actualmente disponibles, así como una disponibilidad creciente a medio y largo plazo mediante la construcción de nuevas plantas desaladoras. Como resultado, se está produciendo una progresiva sustitución de los recursos hídricos convencionales, cuya disponibilidad se reduce conforme se intensifican los impactos del cambio climático, por recursos hídricos no convencionales, cuya disponibilidad se ha incrementado notablemente en el último lustro, y que continuará haciéndolo. En consecuencia, tanto el origen y condiciones del suministro al regadío como las características fisicoquímicas del agua de riego están sufriendo cambios continuos. Estos cambios están siendo especialmente significativos en las zonas regables del Trasvase Tajo-Segura (TTS), ya que los recursos trasvasables desde la cabecera del Tajo se están viendo afectados, además de por el cambio climático, por distintas actuaciones de planificación hidrológica en la cuenca cedente, mientras que simultáneamente son las zonas regables donde se está concentrando el aporte de AMD.

El estudio y análisis del riego con AMD es una cuestión reciente, ya que se ha desarrollado principalmente durante la última década. En los trabajos más relevantes sobre esta cuestión (Beltrán y Koo-Oshima, 2006; Yermiyahu et al., 2007; Martínez Álvarez et al., 2016; Bar-Tal et al., 2017; Arahuetes et al., 2018; Martínez- Álvarez et al., 2020) se identifica como principal ventaja del AMD su condición de recurso hídrico inagotable y no sujeto a variaciones climáticas, por lo que estratégicamente resulta idónea para aumentar la disponibilidad de recursos hídricos para riego agrícola en zonas deficitarias. Además, su empleo facilita la mejora de las masas de agua continentales y el desarrollo sostenible de aquellas zonas donde la escasez hídrica es un factor limitante (MAGRAMA, 2015). Como principales inconvenientes se destaca el elevado consumo energético asociado a su producción y transporte hasta las zonas

regables, así como el elevado precio resultante para los usuarios finales, los agricultores. Estos precios son muy superiores a los que presentan otras fuentes de agua de riego y pueden generar un importante impacto en los costes de producción de los cultivos, comprometiendo su viabilidad económica. El elevado consumo energético asociado a la producción de AMD también conlleva unas importantes emisiones de gases de efecto invernadero, circunstancia que suele destacarse en los análisis desde una perspectiva ambiental o relativa al cambio climático.

Desde el punto de vista agronómico, el AMD tiene una composición química singular, caracterizada por su escasa mineralización y el desequilibrio en su composición química en relación con otras fuentes de agua naturales. Así, el AMD presenta baja salinidad, que puede dar lugar a mejoras en las producciones agrícolas y también permitir poner en valor otros recursos marginales, mezclándolos en las proporciones adecuadas. A pesar de esta baja salinidad, el AMD se caracteriza por sus altas concentraciones relativas de los iones sodio, cloro y boro, mientras que la concentración de iones calcio, magnesio y sulfato es notablemente menor a la de las aguas de riego convencionales en el sureste español. Esta singularidad en la composición debe ser considerada por el regante, adaptando el manejo del riego y la fertirrigación con el fin de evitar posibles afecciones a la productividad de los cultivos y a la conservación de los suelos agrícolas, adaptaciones que también pueden tener efectos significativos en los costes de operación de los cultivos. Además, la elevada concentración relativa de boro en el AMD se identifica habitualmente como un riesgo de fitotoxicidad, que puede ser importante en el caso de especies/variedades sensibles en explotaciones con un alto aporte de AMD, aunque en la actualidad no se han descrito afecciones de este tipo en explotaciones comerciales del sureste español. Como se ha expuesto, la progresiva sustitución de recursos hídricos convencionales (aguas subterráneas, aguas superficiales, agua del TTS) por AMD puede generar distintos impactos agronómicos, ambientales y económicos, cuya valoración a nivel local o regional resulta de gran interés. Abordar esta cuestión mediante un análisis de gabinete a nivel de la DHS constituye un reto de gran complejidad debido a una serie de cuestiones, entre las que se pueden destacar: (1) el incipiente estado del conocimiento científico-técnico sobre las cuestiones agronómicas a considerar, muchas de las cuales se están estudiando en la actualidad; (2) la enorme variabilidad local de los factores a considerar, ya sea relativos a los cultivos implantados o la situación de suministro de agua de riego y su evolución; (3) la variabilidad de los consumos energéticos y precios asociados al suministro actual y al suministro de AMD en distintas zonas de la DHS, y (4) la singularidad de los factores económicos en las

distintas explotaciones agrarias y los distintos periodos productivos, con grandes variaciones de los precios entre campañas e incluso dentro de la misma campaña.

Siendo conscientes de las dificultades comentadas y del reducido tiempo disponible para el desarrollo de este informe, se han considerado planteamientos y metodologías sencillas, pero de reconocida utilidad en los distintos ámbitos del estudio, recurriendo a fuentes de datos oficiales siempre que ha sido posible, y adoptando soluciones pragmáticas en aquellas cuestiones de mayor incertidumbre. Por estos motivos, los resultados de este informe deben considerarse como una primera aproximación a la problemática estudiada, con la suficiente validez para valorar de forma general la magnitud y relevancia de los impactos identificados, pero que deben ser tratados con cautela al no ser representativos de casos concretos, sino de escenarios generales que se han considerado representativos de la enorme diversidad de la zona de estudio. En este sentido, se identifican las fuentes de datos y se justifican las hipótesis, metodologías y escenarios considerados, con el fin de que un lector con conocimiento en la materia pueda realizar la mejor valoración posible de los resultados obtenidos.

Por tanto, el objetivo de este informe es disponer, por primera vez y desde una perspectiva multidisciplinar (agronómica, ambiental y económica), de un análisis del impacto sobre los principales cultivos de la cuenca del Segura de la progresiva sustitución de aguas del TTS (u otras fuentes continentales) por AMD. Para ello, se han identificado diversos indicadores de impacto para la caracterización agronómica, económica y ambiental de la producción agrícola, cuyos valores se han estimado bajo tres escenarios de suministro de agua de riego, que son representativos de la situación inicial y de posibles situaciones futuras en los regadíos asociados al TTS. Además, se han extrapolado los valores obtenidos por cultivos a las distintas Unidades de Demanda Agrícola (UDAs) de las zonas regables del TTS, con el fin de disponer de información sobre la variabilidad espacial y sobre la magnitud de los indicadores de impacto en dicha zona de estudio.

Finalmente, se quiere destacar que para la realización del informe se ha partido del conocimiento de los autores en la materia y en la zona de estudio, adquirida mediante el desarrollo durante el último de distintos proyectos relacionados con el riego con AMD, y donde ya se han aplicado planteamientos y metodologías similares a los aquí propuestos. Así, en el proyecto LIFE-DESEACROP (Agua marina desalinizada para la producción sostenible de cultivos sin suelo), financiado por la UE, se ha analizado el riego con AMD en sistemas hidropónicos con tratamiento y reutilización de drenajes. Otro proyecto, denominado RIDESOST (Sostenibilidad agro-fisiológica, ambiental y económica del riego con agua marina desalinizada en cítricos y sistemas hidropónicos

semicerrados) y financiado por el MINECO y el FEDER, ha tenido como principales objetivos generar y transferir conocimiento científico sobre la respuesta agrofisiológica de los cultivos regados con AMD, y de los impactos económicos y medioambientales de distintas alternativas de gestión. En el proyecto SEARRISOST (Nuevos avances tecnológicos para un manejo sostenible del riego con agua marina desalinizada), financiado también por el MINECO y el FEDER, se ha colaborado con distintas empresas en el desarrollo de tecnología para la fertirrigación inteligente de cultivos de cítricos regados con AMD. Finalmente, los autores están iniciado el proyecto SEA4CROP (Mejora integral de la viabilidad y sostenibilidad del fertirriego con agua marina desalinizada), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y FEDER, y donde se pretende ampliar el conocimiento científico y práctico del riego con AMD.

2. Metodología y alcance del estudio

En este epígrafe se exponen las distintas cuestiones metodológicas consideradas en la elaboración del informe. En primer lugar, se describen y caracterizan las distintas fuentes de agua de riego de la zona analizada, que se circunscribe a las UDAs de las zonas regables del TTS, definiendo las principales características fisicoquímicas de cada una de ellas. Seguidamente, se justifican y describen los tres escenarios de suministro hídrico considerados, que consisten en un escenario de referencia, sin suministro de AMD, y dos escenarios con sustitución progresiva del resto de recursos por AMD (50% y 100% de sustitución).

A continuación, se justifican los cultivos seleccionados para el análisis, que son los 10 cultivos de regadío que más superficie ocupan en la Región de Murcia, y como se han organizado para facilitar la extrapolación de resultados a las UDAs vinculadas a las zonas regables del TTS.

Posteriormente, se describen las metodologías aplicadas en el análisis agronómico, donde se han definido tres indicadores de impacto con el fin de evaluar en los distintos cultivos y escenarios considerados: (1) los efectos de la salinidad en la producción (**valor económico de la producción, VEP**); (2) los efectos de la salinidad en las necesidades totales de riego (**necesidades totales de riego, N_r**); y (3) los efectos de la escasez de nutrientes en las necesidades de fertilizantes (**coste de los fertilizantes, CF**). Respecto al análisis ambiental, se presenta brevemente la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), describiendo tanto sus objetivos y alcance como aportando los datos utilizados para elaborar el inventario requerido. Se han considerado 5 indicadores de impacto, que coinciden con las principales

categorías de impactos resultantes del ACV: **agotamiento abiótico de materias primas (ADe)**, **agotamiento abiótico de combustibles fósiles (ADf)**, **acidificación (AC)**, **eutrofización (EU)** y **calentamiento global (GW)**. En el análisis económico, se ha recurrido a los datos y metodologías empleadas por el MAPA en los “Estudios de costes y rentas de las explotaciones agrarias (ECREA)”, definiéndose dos indicadores impacto para analizar el impacto en el balance económico de las explotaciones (**margen bruto estándar, MBE**) y el efecto económico respecto al escenario de referencia atribuible a la incorporación de AMD (**indicador de efecto económico relativo, IEER**).

2.1. Aguas de referencia consideradas en el estudio

El origen del agua suministrada es un factor especialmente relevante a la hora de definir distintos escenarios en este informe. En este sentido, se ha seguido la misma clasificación recogida en la Propuesta de Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2022/27 (PPHDS 2022/27, CHS 2021), obteniéndose como se expone a continuación los valores característicos de sus propiedades fisicoquímicas, la energía específica asociada a su suministro y el coste final para el regante como se expone a continuación:

Aguas superficiales

Se trata de recursos propios de la cuenca, que se toman principalmente del río Segura, tanto en la Vega Alta, como principalmente en la Vega Media y la Vega Baja. Es una fuente de agua muy variable en cuanto a calidad (salinidad), ya que suele empeorar conforme nos aproximamos a la desembocadura. Se han considerado representativos de su calidad fisicoquímica los datos correspondientes a la Vega Baja, por encontrarse en esta zona las UDAs con mayor cantidad de derechos de riego de origen superficial. Concretamente, se han considerado los datos correspondientes al punto de toma de la Zona Regable Riegos de Levante Margen Izquierda (UDA 53), recogidos en la publicación del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación “Evaluación de la Zona Regable de Riegos de Levante Margen Izquierda del Segura (Alicante)” (MAPA, 2004). Los datos se muestran en la Tabla 1.

Respecto al consumo de energía específica asociado a este suministro, se ha considerado el valor de 0,06 kWh/m³, que es el estimado por Soto-García et al. (2013) como valor medio para un periodo de 10 años en la zona de estudio. La tarifa en alta de estas aguas en las Zonas Regables del Trasvase Tajo-Segura suele coincidir con el

peaje del postravase para riego ($0,0217 \text{ €/m}^3$), a los que habría que sumar los costes específicos a nivel de comunidad de regantes, generalmente en torno a $0,04 \text{ €/m}^3$. Por tanto, se ha considerado un valor representativo del precio final para el agricultor de $0,06 \text{ €/m}^3$.

Aguas subterráneas

Al igual que las aguas superficiales, las aguas subterráneas de la cuenca del Segura presentan una gran variabilidad en cuanto a su composición fisicoquímica (AQUALOGY, 2016). Concretamente, en la mayoría de las zonas regables del Trasvase Tajo-Segura (TTS) los acuíferos se encuentran sobreexplotados como consecuencia del pertinaz déficit de recursos hídricos a que se han visto sometidas durante las últimas décadas, presentando generalmente valores de salinidad y contenidos de nitratos elevados. Como valor representativo de estas aguas, se han considerado los valores de los parámetros fisicoquímicos recogidos en Martínez-Álvarez et al. (2017), donde se han completado algunos parámetros con datos representativos recogidos en el estudio “Valoración del estado químico de las aguas en la cuenca del Segura” (AQUOLOGY, 2016). Los datos se muestran en la Tabla 1. Respecto al consumo de energía específica asociado a este suministro, se ha considerado el valor de $0,95 \text{ kWh/m}^3$, que es el estimado por Soto-García et al. (2013) como valor medio para un periodo de 10 años en la zona de estudio. Se trata de un valor representativos para extracciones en pozos con profundidades entre 150 y 200 m. El precio final para el agricultor, tras consultar a varios gestores de comunidades de regantes de las Zonas Regables del Trasvase Tajo-Segura, se ha establecido en $0,18 \text{ €/m}^3$, como valor representativo para la zona de estudio.

Aguas regeneradas

El estudio “The role of reclaimed water for crop irrigation in southeast Spain” (Maestre Valero et al., 2019a) muestra la importante variabilidad en la composición fisicoquímica de las aguas regeneradas producidas en la zona de estudio, que está especialmente influenciada por la proximidad a la costa, donde suelen ser frecuentes valores elevados de salinidad, cloruro y sodio, como consecuencia de infiltraciones de agua marina o salobre. Como valor representativo de estas aguas, se han considerado los valores medios de los parámetros en las 7 EDARs estudiadas en el trabajo “Revaluing the nutrition potential of reclaimed water for irrigation in southeastern Spain” (Maestre Valero et al., 2019b), ubicadas en la DHS. Los datos se muestran en la Tabla 1.

Respecto al consumo de energía específica asociado a este suministro, se ha considerado el valor de $0,78 \text{ kWh/m}^3$, que es el estimado por Soto-García et al. (2013) como valor medio para un periodo de 10 años en la zona de estudio. Las aguas regeneradas suelen ponerse a disposición de los regentes de forma gratuita, pero la necesidad de realizar infraestructuras específicas para el suministro, cuya amortización se incluye en el precio final, y unos gastos de explotación significativos, dadas las numerosas analíticas requeridas para garantizar el cumplimiento de la normativa reguladora, suelen resultar en precios finales para el agricultor en torno a $0,10 \text{ €/m}^3$.

Aguas desaladas

La composición fisicoquímica de las aguas producidas en las IDAMs que abastecen al regadío en la cuenca del Segura es bastante homogénea (Martínez-Álvarez et al., 2017), ya que toman agua del mismo origen y emplean la tecnología de osmosis inversa en todos los casos. Según se indica en la PPHDS 2022/27 (CHS, 2021), la dotación de agua marina desalinizada a las Zonas Regables del TTS está prevista principalmente desde la IDAM de Torrevieja, que es la más moderna y la de mayor capacidad de la DHS. Por este motivo, se han considerado los valores de parámetros fisicoquímicos proporcionados para esta IDAM en Martínez-Alvarez et al., (2017). Los datos se muestran en la Tabla 1.

Se ha considerado un consumo de energía específica asociado a este suministro agrícola desde la IDAM de Torrevieja de $3,49 \text{ kWh/m}^3$ (Martínez-Alvarez et al., 2019), mientras que el precio final para el agricultor asciende a $0,60 \text{ €/m}^3$ (Martínez-Alvarez et al., 2019). Este precio es ligeramente superior al considerado en el “Anexo 3.III. caracterización económica del regadío” de la PPHDS 2022/27 para las UDAs vinculadas a las zonas regables del TTS ($0,5332 \text{ €/m}^3$ actualmente y $0,5704 \text{ €/m}^3$ futuros) por incluir una estimación del coste adicional de distribución en las comunidades de regantes ($0,04 \text{ €/m}^3$).

Aguas del trasvase tajo-Segura (TTS)

Se han considerado los parámetros fisicoquímicos recogidos en (Martínez-Álvarez et al., 2017), que fueron obtenidos a partir del análisis de 18 muestras de agua de esta fuente de suministro. Los datos se muestran en la Tabla 1.

Se ha considerado un consumo de energía específica asociado a este suministro de $1,21 \text{ kWh/m}^3$ (Melgarejo y Montaña, 2009). El precio considerado corresponde a la tarifa actual del trasvase para riego ($0,117893 \text{ €/m}^3$) más el peaje del postravase

(0,02317 €/m³) y el coste adicional de distribución en las comunidades de regantes, estimado en 0,04 €/m³. Por tanto, asciende a un total aproximado de 0,18 €/m³.

Tabla 1. Principales características fisicoquímicas de las distintas fuentes de suministro de agua consideradas en el estudio.

Parámetro	Superficial	Subterránea	Regenerada	Desalada	TTS
pH	7,5	7,4	7,7	8,3	8,4
CE (dS/m)	2,41	4,51	1,80	0,46	0,86
Ca ²⁺ (mg/L)	158	229	97	29	97
Mg ²⁺ (mg/L)	98	99	39	4,3	40
Na ⁺ (mg/L)	257	573	235	86	41
K ⁺ (mg/L)	18,8	16,6	28,3	3,9	2,2
NH ₄ ⁺ (mg/L)	7,2	1,7	3,16	0,05	0,16
B ³⁺ (mg/L)	0,45	1,36	0,40	0,56	0,1
Cl ⁻ (mg/L)	344	972	272	147	59
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	514	980	205	6,6	233
CO ₃ H ⁻ (mg/L)	318	475	295	71	180
NO ₃ ⁻ (mg/L)	10,6	60,6	14,7	1	1,7
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	2,65	0,3	1,23	0,2	0,1
SAR	4,0	8,0	5,4	3,0	1,1

Datos elaborados a partir de las referencias indicadas en el texto.

Tabla 2. Consumo específico (kWh/m³) y precio final (€/m³) para el agricultor de las distintas fuentes de suministro de agua consideradas en el estudio.

	Superficial	Subterránea	Regenerada	Desalada	TTS
Consumo específico (kWh/m ³)	0,06	0,95	0,78	3,49	1,21
Precio (€/m ³)	0,06	0,18	0,10	0,60	0,18

Datos elaborados a partir de las referencias indicadas en el texto.

2.2. Justificación de los escenarios considerados

Los volúmenes de derechos de riego reconocidos en la PPHDS 2022/27 (CHS, 2021) para las UDAs vinculadas a las Zonas Regables del TTS, según las fichas de caracterización incluidas en su Anexo 03.III, se recogen en la Tabla 3:

Tabla 3. Volúmenes de derechos de concesión de las UDAs vinculadas a las Zonas Regables del TTS en la Demarcación del Segura.

UDAs	Superficial (hm ³ /año)	Subterránea (hm ³ /año)	Regenerada (hm ³ /año)	Desalada (hm ³ /año)	TTS (hm ³ /año)	Total
UDA 26	1,88	0,01	0,00	0,00	13,49	15,38
UDA 37	3,87	4,40	0,79	0,00	8,00	17,06
UDA 38	7,22	2,77	2,22	0,00	9,04	21,25
UDA 39	16,09	0,58	0,46	0,00	25,04	42,16
UDA 40	1,76	0,00	1,73	0,00	9,43	12,92
UDA 41	0,00	0,22	0,00	0,00	4,00	4,22
UDA 52	12,33	1,60	0,89	0,00	5,50	20,32
UDA 53	40,88	4,77	0,37	0,00	34,18	80,20
UDA 56	6,92	15,58	14,68	0,00	14,50	51,68
UDA 58	2,78	35,16	12,72	1,58	122,00	174,25
UDA 61	4,21	17,89	3,12	11,51	29,06	65,79
UDA 65	0,49	29,72	1,64	0,26	29,78	61,89
UDA 66	0,01	0,29	1,23	0,04	6,16	7,72
UDA 71	0,30	2,48	0,00	1,14	1,93	5,85
UDA 72	3,53	5,57	0,34	0,00	26,93	36,37
UDA 73	5,28	6,76	0,00	0,00	4,00	16,03
TOTAL:	107,55	127,77	40,18	14,54	343,04	633,09

Nota: No se han considerado las UDAs 54 y 70 por encontrarse fuera de la Demarcación del Segura y no aparecer información detallada sobre las mismas en la PPHDS 2022-2027, ni en sus respectivos planes de cuenca. Datos elaborados a partir de la PPHDS 2022/27 (CHS, 2021).

Dado que en este informe se pretende analizar el impacto agronómico, ambiental y económico de distintos niveles de incorporación de AMD a los regadíos de las zonas regables del TTS, se ha considerado un primer escenario de referencia sin suministro de AMD (0% AMD), mientras que los dos escenarios restantes representan la sustitución progresiva (50% y 100%) de otros recursos por AMD. Estos escenarios se describen a continuación.

Escenario de riego sin AMD o de referencia (0% AMD)

Se corresponde con un suministro de distintas fuentes de agua proporcional a los derechos de riego reconocidos en la PPHDS 2022/27 para las zonas regables del TTS, sin considerar las concesiones recientes de desalación (14,52 hm³/año). Por tanto, consiste en una mezcla de agua superficial, subterránea, regenerada y del TTS, según las proporciones recogidas en la Tabla 4 y la Figura 1. Las propiedades fisicoquímicas, el coste para el regante y la energía específica representativas del

suministro en este escenario se muestran en las Tablas 5 y 6. Se referirá a lo largo del informe como **escenario de referencia (0% AMD)**.

Escenario de uso conjunto de AMD con otras fuentes (50% AMD)

Se corresponde con un suministro del 50% de AMD, mientras el 50% restante procede de otras fuentes (superficiales, subterráneas, regeneradas y TTS) según su proporción en los derechos de riego reconocidos en la PPHDS 2022/27 para las zonas regables del TTS. Por tanto, consiste en una mezcla de agua superficial, subterránea, regenerada, desalada y del TTS según las proporciones recogidas en la Tabla 4 y la Figura 1. Las propiedades fisicoquímicas, el coste para el regante y la energía específica representativas del suministro en este escenario se muestran en las Tablas 5 y 6. Se referirá a lo largo del informe como **escenario de uso conjunto (50% AMD)**.

Escenario de riego con AMD (100% AMD)

En este escenario se sustituye el suministro de agua de riego de las distintas fuentes consideradas en la PPHDS 2022/27 para las zonas regables del TTS por AMD. Por tanto, el 100% del agua de riego es AMD (Tabla 4 y Figura 1), e implica la supresión del suministro del TTS. Las propiedades fisicoquímicas, el coste para el regante y la energía específica representativas del suministro en este escenario se muestran en las Tablas 5 y 6. Se referirá a lo largo del informe como **escenario de riego con AMD (100% AMD)**.

Tabla 4. Porcentaje de las distintas fuentes en los escenarios considerados.

Escenario	Superficial (%)	Subterránea (%)	Regenerada (%)	Desalada (%)	TTS (%)
Referencia (0% AMD)	17,39	20,66	6,50	0	55,46
Uso conjunto (50% AMD)	8,69	10,33	3,25	50,00	27,73
Riego con AMD (100% AMD)	0	0	0	100,00	0

Datos elaborados a partir de la PPHDS 2022/27 (CHS, 2021).

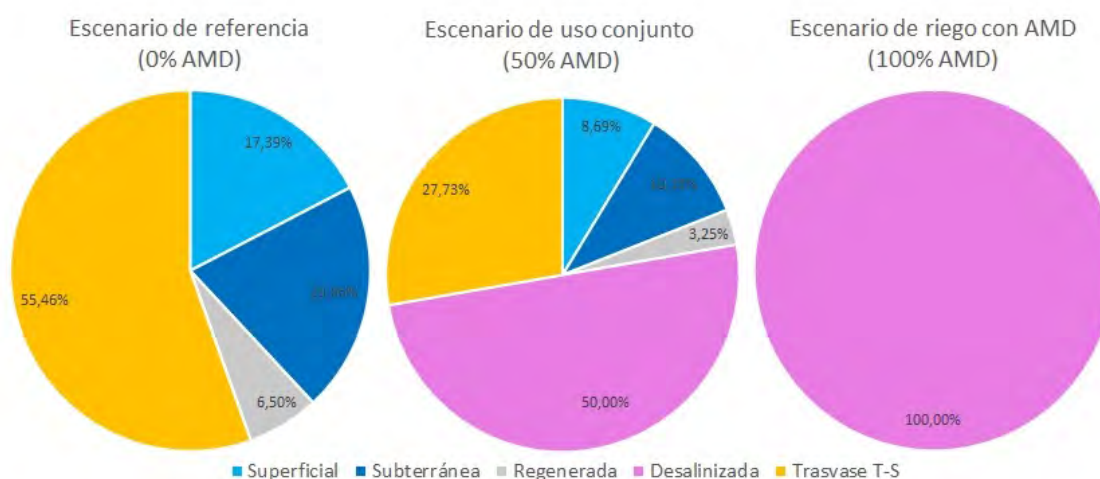


Figura 1. Porcentaje de las distintas fuentes de agua en los escenarios considerados.

Tabla 5. Características fisicoquímicas del agua en los tres escenarios considerados.

Parámetro	Referencia (0% AMD)	Uso conjunto (50% AMD)	Riego con AMD (100% AMD)
pH	8,0	8,15	8,3
CE (dS/m)	1,95	1,20	0,46
Ca ²⁺ (mg/L)	135	82	29
Mg ²⁺ (mg/L)	62	33	4,3
Na ⁺ (mg/L)	201	144	86
K ⁺ (mg/L)	9,8	6,8	3,9
NH ₄ ⁺ (mg/L)	1,9	0,9	0,0
B ³⁺ (mg/L)	0,44	0,50	0,56
Cl ⁻ (mg/L)	311	229	147
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	434	220	6,6
CO ₃ H ⁻ (mg/L)	272	172	71
NO ₃ ⁻ (mg/L)	16	8,6	1
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	0,7	0,4	0,2
SAR	3,6	3,4	3,9

Datos elaborados a partir de las referencias indicadas en el texto.

Tabla 6. Consumo específico (kWh/m³) y precio final (€/m³) del agua de riego en los tres escenarios considerados.

	Referencia (0% AMD)	Uso conjunto (50% AMD)	Riego con AMD (100% AMD)
Consumo específico (kWh/m ³)	0,93	2,21	3,49
Precio (€/m ³)	0,154	0,377	0,60

Datos elaborados a partir de las referencias indicadas en el texto.

2.3. Justificación de los cultivos considerados

La estimación de los impactos agronómicos, ambientales y económicos en la producción de un determinado cultivo es una actividad que requiere disponer de un elevado nivel de información sobre diversos aspectos del cultivo y la explotación (repuesta a la salinidad del agua de riego, necesidades de fertilización, necesidades hídricas, labores de cultivo e insumos aportados, costes de producción, rendimientos, infraestructuras necesarias en parcela, etc.). No es sencillo disponer de toda esta información para la multitud de cultivos que se desarrollan en las zonas regables del TTS, pero sí suele ser accesible para los más relevantes. Por este motivo, se han seleccionado los 10 cultivos que más superficie ocupan en la Región de Murcia en 2020 (CREM, 2020), como marco geográfico más próximo a la DHS, de la que no se dispone de información específica por cultivos.

Los cultivos seleccionados se han organizados en cuatro grupos: hortícolas al aire libre, cítricos, frutales no cítricos (frutos carnosos) y almendro. Esta organización tiene como finalidad ajustarse a la clasificación de cultivos que sigue la PPHDS 2022/27 (CHS, 2021), lo que facilitará la extrapolación de resultados a las UDAs de las zonas regables del TTS y a su conjunto.

Hortícolas al aire libre

Dentro de este grupo se han considerado los cultivos de alcachofa, brócoli, lechuga y melón. En la Tabla 7 se muestra el porcentaje que estos cultivos representan respecto al total de cultivos hortícolas al aire libre en la Región de Murcia en 2020, considerando la información sobre la evolución de la superficie y producción según tipo de cultivo y sistema de cultivo proporcionada por el Portal Estadístico de la Región de Murcia (CREM, 2020). En su conjunto, los 4 cultivos hortícolas al aire libre seleccionados representan el 80,08% de la superficie de este tipo de cultivos en la Región de Murcia.

Cítricos

Dentro de este grupo se han considerado los cultivos de limonero, mandarino y naranjo. En la Tabla 8 se muestra el porcentaje que estos cultivos representan respecto al total de cítricos en la Región de Murcia en 2020 (CREM, 2020). En su

conjunto, los tres cítricos seleccionados representan el 97,37% de la superficie de este tipo de cultivos en la Región de Murcia.

Tabla 7. Principales cultivos hortícolas al aire libre en la Región de Murcia en 2020 (CREM, 2020). Se resaltan los cultivos seleccionados.

Cultivo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
<u>Alcachofa</u>	<u>5.605</u>	<u>11,50</u>
Apio	1.206	2,55
<u>Brócoli</u>	<u>13.261</u>	<u>27,20</u>
Espinaca	1.245	2,47
<u>Lechuga</u>	<u>15.380</u>	<u>31,55</u>
<u>Melón</u>	<u>4.795</u>	<u>9,84</u>
Sandía	3.059	6,27
Total seleccionados:		80,08%

Datos elaborados a partir de CREM (2020).

Tabla 8. Cultivos cítricos en la Región de Murcia en 2020 (CREM, 2020). Se resaltan los cítricos seleccionados.

Cultivo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Limonero	<u>25,721</u>	<u>65,32</u>
Mandarino	<u>5.789</u>	<u>14,70</u>
Naranja	<u>6.835</u>	<u>17,36</u>
Pomelo	1014	2,57
Limero y otros cítricos	20	0,06
Total seleccionados:		97,37%

Datos elaborados a partir de CREM (2020).

Frutales no cítricos (frutos carnosos)

Dentro de este grupo se han considerado los cultivos de albaricoquero y melocotonero. En la Tabla 9 se muestra el porcentaje que estos cultivos representan respecto al total de frutales no cítricos en la Región de Murcia en 2020 (CREM, 2020). En su conjunto, los 2 cultivos seleccionados representan el 84,78% de la superficie de este tipo de cultivos en la Región de Murcia.

Almendra

El cultivo del almendra en regadío ocupa una superficie de 7.034 ha en la Región de Murcia en 2020 (CREM, 2020), siendo el único cultivo incluido en esta categoría.

Tabla 9. Principales cultivos frutales no cítricos en la Región de Murcia en 2020 (CREM, 2020). Se resaltan los cultivos seleccionados.

Cultivo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
<u>Albaricoquero</u>	<u>7.889</u>	<u>31,96</u>
Cerezo y guindo	342	1,39
Ciruelo	737	2,99
Granado	471	1,91
<u>Melocotonero</u>	<u>13.037</u>	<u>52,82</u>
Total seleccionados:		84,78%

Datos elaborados a partir de CREM (2020).

La Tabla 10 muestra la superficie neta por grupos de cultivo del conjunto de las UDAs vinculadas a las zonas regables del TTS. Se puede observar como la superficie de hortalizas al aire libre representa el 32,94% del total, la superficie de cítricos el 39,24%, la superficie de frutales no cítricos el 12,79%, y la superficie de almendro 5,26% del total. Por tanto, los grupos de cultivos seleccionados representan el 90,23% de los cultivos implantados en el conjunto de las UDAs de las zonas regables del TTS, y para cada uno de estos grupos se han seleccionado cultivos que representan el 80,08%, 97,37%, 84,78 y 100% de la superficie de hortalizas al aire libre, cítricos, frutales no cítricos, y almendro, respectivamente. Estas cifras ponen de manifiesto la representatividad regional de los resultados de este estudio.

Tabla 10. Superficie neta por grupos de cultivo del conjunto de las UDAs de las zonas regables del TTS, según la PPHDS 2022/27 (CHS, 2021). Se resaltan los cultivos seleccionados.

Cultivo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Cereales invierno	1.303,3	1,52
Cereales Primavera (maíz)	23,0	0,03
Tubérculos (patata)	2240,5	2,61
Algodón	50,3	0,06
Oleaginosas (girasol)	94,9	0,11
Flores y ornamentales	77,3	0,09
Forrajes	160,5	0,19
Alfalfa	26,1	0,03
Hortalizas protegido	1.502,0	1,75
<u>Hortalizas aire libre</u>	<u>28.261,4</u>	<u>32,94</u>
<u>Cítricos</u>	<u>33.661,0</u>	<u>39,24</u>

<u>Frutales no cítricos (frutos carnosos)</u>	<u>10.971,4</u>	<u>12,79</u>
<u>Almendro</u>	<u>4.516,5</u>	<u>5,26</u>
Viñedo vino	19,0	0,02
Viñedo mesa	3,8	0,00
Olivar	2.877,2	3,35
Total seleccionados:		90,23%

Nota: No se han considerado las UDAs 54 y 70 por encontrarse fuera de la Demarcación del Segura y no aparecer información detallada sobre las mismas en la Propuesta de Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2022-2027 ni en sus respectivos planes de cuenca. Datos elaborados a partir de la PPHDS 2022/27 (CHS, 2021).

2.4. Análisis agronómico

La calidad del agua de riego es una cuestión importante a la hora de plantear la sustitución de unos suministros por otros, especialmente cuando se trata de recursos de muy diferente origen y composición fisicoquímica. Como se observa en la Tabla 1, la composición del AMD es bastante diferente al resto fuentes de suministros en la DHS, circunstancia de la que se pueden derivar efectos en la respuesta de los cultivos que conviene cuantificar si se pretende caracterizar los impactos que la progresiva sustitución de aguas del TTS (u otras fuentes continentales) por AMD, especialmente porque estos impactos agronómicos pueden derivar en impactos económicos, como se evaluará posteriormente. En el estudio “Antecedentes y problemática de la aplicación de agua marina desalinizada al riego agrícola” (Martínez-Álvarez y Martín-Górriz, 2014), se identifican las principales cuestiones agronómicas a considerar cuando se incorpora AMD al riego agrícola, cuestiones que posteriormente también fueron analizadas en el marco de la DHS en (Martínez-Alvarez et al., 2017). Se exponen a continuación los principales efectos agronómicos identificados y la metodología con la que serán evaluados en este informe.

2.4.1. Efectos de la salinidad en la producción

La productividad de los cultivos se ve limitada por la salinidad del agua de riego (Maas y Hoffman, 1977), cuestión que ha sido ampliamente estudiada y tratada en las distintas versiones del Manual Técnico de la FAO *Water Quality for Agriculture* (Ayers y Westcot, 1985) y subsecuentes trabajos de otros autores (ej. Maas y Grattan, 1999). El rendimiento relativo de un cultivo en función de la salinidad del extracto de saturación del suelo (CE_{es}) se expresa habitualmente como la producción del cultivo obtenida en condiciones de salinidad dividida por la producción obtenida en ausencia

salinidad. En las referencias anteriores se constata que el rendimiento relativo de los cultivos se mantiene constante a medida que aumenta la salinidad del suelo hasta llegar a un determinado valor (umbral de CE_{es}), a partir de la cual el rendimiento relativo desciende de modo aproximadamente lineal con la salinidad, según se representa en la Figura 2.

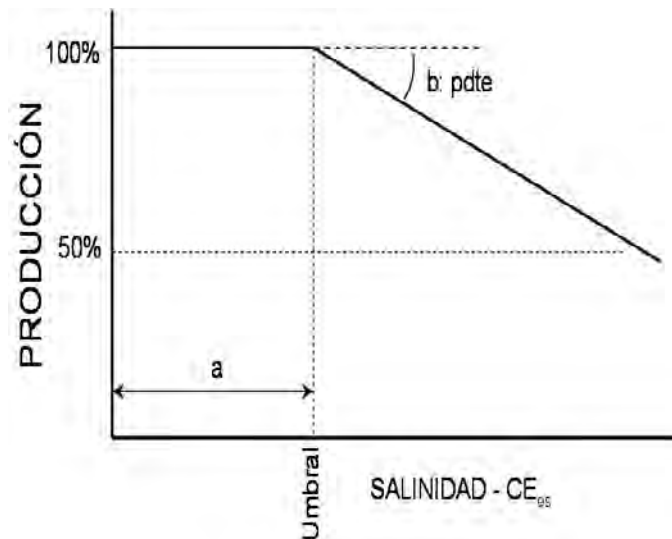


Figura 2. Función de producción de los cultivos en función de la salinidad.

Esta función se expresa matemáticamente mediante la expresión:

$$Y_r = 100 - b (CE_{es} - a)$$

Donde Y_r es la producción relativa respecto a la productividad característica del cultivo en ausencia salinidad, a es el umbral de conductividad eléctrica del suelo a partir de la cual el cultivo comienza a perder producción por salinidad, y b es la pendiente de la recta, que indica el porcentaje de pérdida de producción del cultivo en función del aumento de la salinidad del suelo. El valor de CE_{es} se estima habitualmente como 1,5 veces el valor de la conductividad eléctrica del agua de riego (EC_a). La mayoría de los cultivos herbáceos y leñosos tienen tabulados estos parámetros con los que se evalúa su tolerancia a la salinidad (Maas y Hoffman, 1977; Ayers y Westcot, 1985, Maas y Grattan, 1999).

La Tabla 5, donde se recogen las características fisicoquímicas del agua de riego en los tres escenarios analizados, pone de manifiesto una progresiva disminución de la salinidad del agua de riego conforme aumenta la proporción de AMD, pasando de una $CE_a = 1,95$ dS/m en el escenario de referencia (0% AMD) hasta $CE_a = 0,46$ dS/m en el escenario de riego con AMD (100% AMD). Por estos motivos, se considera que es un

factor agronómico importante para evaluar el impacto de la progresiva sustitución de aguas del TTS (u otras fuentes continentales) por AMD.

Los valores de los parámetros a y b de la función de producción en función de la salinidad para los 10 cultivos considerados en este informe se recogen en la Tabla 11:

Tabla 11. Parámetros de la función de producción en función de la salinidad de los cultivos seleccionados.

Cultivo	a (umbral de CE_{es} , dS/m)	b (pendiente, %)
Alcachofa	6,1	11,5
Brócoli	2,8	9,2
Lechuga	1,3	13
Melón	1,0	8,4
Limonero	1,5	12,8
Mandarino	1,7	13,1
Naranja	1,7	13,1
Albaricoquero	1,6	24
Melocotonero	1,7	21
Almendra	1,5	19

Datos elaborados a partir de Ayers y Westcot (1985) y Maas y Grattan (1999).

En el Epígrafe 3.1.1. se calculan los valores de producción relativa, así como su variación entre escenarios, para cada cultivo. Sin embargo, el indicador seleccionado para analizar el impacto ha sido el **valor económico de la producción (VEP, €/ha)**, calculado tras asignar los valores de producción publicados por el MAPA en los Estudios de Costes y Rentas de las Explotaciones Agrícolas (ECREA) al escenario de referencia (0% AMD), y calculando el valor para el resto de escenarios mediante la aplicación de las variaciones esperables en la productividad de los cultivos como consecuencia del efecto de la salinidad del agua de riego. De esta manera, se maneja una unidad de impacto (€/ha) que es independiente del cultivo considerado, facilitando las tareas de agregación entre cultivos y la extrapolación espacial.

2.4.2. Efectos de la salinidad en las necesidades totales de riego (N_t)

Las necesidades totales de riego de los cultivos (N_t) son superiores a sus necesidades consuntivas o netas (N_n), ya que hay otras cantidades adicionales de agua que son necesarias para compensar las pérdidas producidas por las condiciones en que se desarrolla el cultivo (Doorenbros y Pruitt, 1977). Estas pérdidas se pueden producir por

percolación en profundidad fuera de zona radicular, por la falta de uniformidad de reparto del agua en la parcela de riego y por los requerimientos de lavado de sales cuando se emplea agua de riego con media o alta salinidad. Todas estas pérdidas se cuantifican en un término denominado eficiencia de aplicación (Ef_a), de forma que:

$$N_t = N_n / Ef_a$$

Con el fin de centrar el análisis en el factor de la calidad de agua, evitando otras consideraciones locales o particulares sobre la textura del suelo o la uniformidad de emisión del sistema de riego, en este estudio se considera únicamente la relación de la eficiencia de aplicación (Ef_a) con los requerimientos de lavado (RL), de forma que:

$$N_t = N_n / Ef_a = N_n / (1 - RL)$$

Donde el mínimo requerimiento de lavado para controlar las sales en la zona circular (RL) se determina mediante la siguiente expresión en sistemas de riego localizado de alta frecuencia (Doorenbros y Pruitt, 1977, Pizarro, 1996), que son los generalizados en la zona de estudio:

$$RL = CE_a / maxCE_{es}$$

Donde $maxCE_{es}$ es la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo para un descenso de la producción de un 100%, valor que se encuentra tabulado en distintos manuales de referencia (Ayers y Westcot, 1985; Baille, 2002). Los valores de $maxCE_{es}$ para los cultivos considerados en este informe se recogen en la Tabla 12:

Tabla 12. Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo para un descenso de la producción de un 100% en los cultivos seleccionados.

Cultivo	$maxCE_{es}$ (dS/m)
Alcachofa	14,8
Brócoli	14
Lechuga	9
Melón	12,9
Limonero	9,3
Mandarino	8
Naranja	8
Albaricoquero	5,8
Melocotonero	6,5
Almendro	6,8

Datos elaborados a partir de Ayers y Westcot (1985) y Baille (2002).

Por tanto, las necesidades totales de agua de riego también se ven afectadas por la conductividad eléctrica del agua de riego (CE_a), y son de esperar diferencias entre los

tres escenarios considerados. El indicador seleccionado para evaluar este efecto son las propias **necesidades totales de riego (N_t , m^3/ha)**.

2.4.3. Efectos de la escasez de nutrientes en las necesidades de fertilizantes

El AMD se caracteriza por una muy baja concentración de nutrientes esenciales para el desarrollo de los cultivos, como calcio y magnesio (Martínez-Álvarez et al., 2017). Estos nutrientes habitualmente tienen un papel secundario en los programas de fertilización aplicados en la cuenca del Segura, ya que son abundantes tanto en las aguas superficiales de la cuenca, como en los suministros externos (TTS) o en la práctica totalidad de aguas subterráneas, de forma que su contenido en las aguas de riego y los suelos normalmente satisface las necesidades de los cultivos. Además, el conjunto de aguas actualmente utilizado en muchas comunidades de regantes también contienen concentraciones significativas de otros nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio como consecuencia de su abundancia en algunas de las fuentes de agua (subterránea y regeneradas principalmente), como se observa en la Tabla 1.

Todas estas consideraciones, que se tratan detalladamente en trabajos como los publicados por Maestre-Valero et al. (2019b) o Martínez-Álvarez et al. (2020), pueden dar lugar a una mayor necesidad de fertilizantes según se produce la progresiva sustitución de aguas del TTS (u otras fuentes continentales) por AMD, con el consecuente encarecimiento de los programas de fertilización.

Para evaluar este efecto se han calculado los requerimientos de fertilizantes y el coste asociado para cada uno de los cultivos seleccionados, considerando las características fisicoquímicas del suministro de agua para cada uno de los escenarios, recogidas en la Tabla 5. Esta evaluación se ha realizado mediante un modelo que calcula la combinación óptima de fertilizantes para satisfacer los requerimientos totales de nutrientes de cada cultivo al menor coste económico, considerando los nutrientes que ya están presentes en el agua de riego para cada uno de los escenarios. Este modelo, que ya ha sido utilizado con anterioridad en un estudio similar (Martínez-Álvarez et al. (2020), es el precursor del modelo Irriblend-DSW (Gallego-Elvira et al., 2021), que combina la funcionalidad de optimizar la fertilización simultáneamente a la mezcla de aguas de distinto origen y calidad. La Figura 3 presenta un esquema del modelo utilizado para evaluar los requerimientos de fertilizantes y el coste asociado.

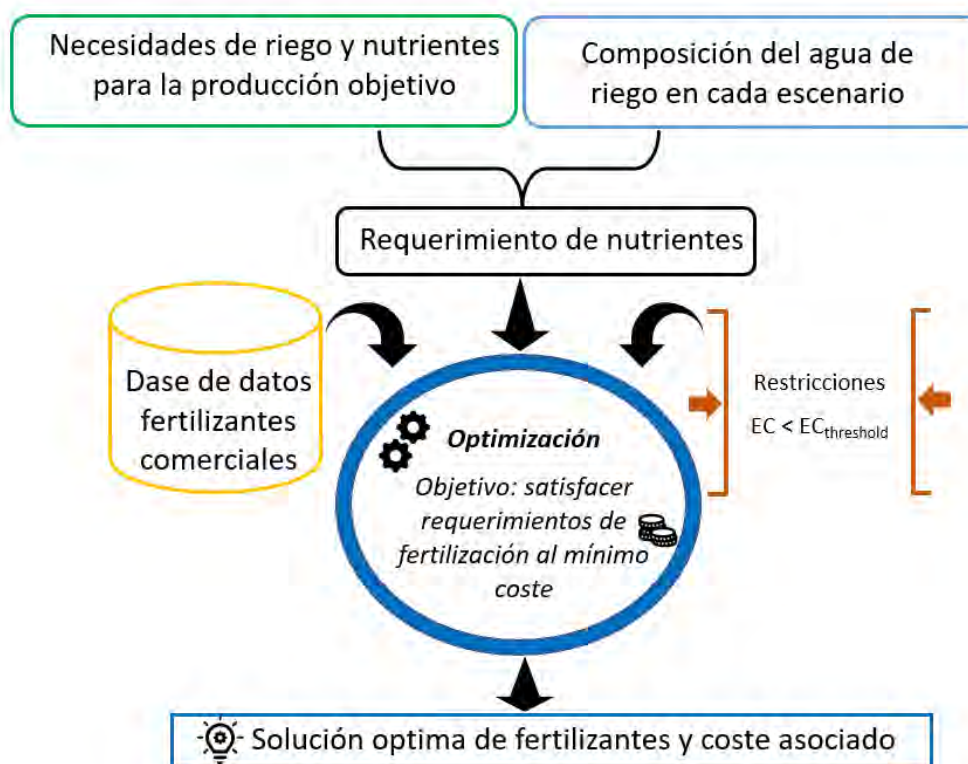


Figura 3. Esquema del modelo utilizado para evaluar los requerimientos de fertilizantes y el coste asociado (Martínez-Alvarez et al., 2020).

Las necesidades de riego y nutrientes para la producción objetivo se han obtenido de la publicación del MAPA “Estudios de Costes y Rentas de las Explotaciones Agrícolas” (ECREA), en el último año publicado (2016), para el conjunto de los cultivos considerados en el informe (ECREA, 2016). Estos valores se han completado con las necesidades de calcio y magnesio de los cultivos recomendadas por el Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA) a través del Servicio de Información Agraria de Murcia (SIAM) de la Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente (SIAM, 2021). Los valores considerados se recogen en la Tabla 13:

Tabla 13. Necesidades de riego y de nutrientes de los cultivos seleccionados.

Cultivo	Riego (m ³ /ha)	Producción (kg/ha)	N (kg/ha)	P ₂ O ₅ (kg/ha)	K ₂ O ₅ (kg/ha)	CaO (kg/ha)	MgO (kg/ha)
Alcachofa	10.570	17.748	249	99	171	80	20
Brócoli	6.967	13.700	190	64	117	80	40
Lechuga	4.926	48.874	211	47	152	40	20

Melón	4.500	45.284	165	58	172	165	85
Limonero	5.930	30.267	182	36	132	20	11
Mandarino	6.608	15.214	214	43	95	8	17
Naranja	4.993	39.735	197	40	125	8	17
Albaricoquero	5.643	20.457	106	33	124	10	0
Melocotonero	5.776	19.569	129	55	161	12	0
Almendra	3.806	3.182	120	60	100	20	16

Datos elaborados a partir de las referencias indicadas en el texto.

La composición fisicoquímica del agua de riego en cada uno de los escenarios se recoge en la Tabla 5, incluyendo las concentraciones aportadas de cada uno de los nutrientes. La base de datos de fertilizantes comerciales (Tabla 14) está constituida por productos habitualmente disponibles en la zona de estudio y se ha obtenido a partir de los valores proporcionados por tres empresas suministradoras.

Tabla 14. Base de datos de fertilizantes, pureza y precios considerados.

Cultivo	Precio (€/kg)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O ₅ (%)	CaO (%)	MgO (%)
Ácido Fosfórico (85%)	0,70	0	52,0	0	0	0
Ácido Nítrico (59%)	0,52	12,5	0	0	0	0
Nitrato Potásico	1,24	13,0	0	46,6	0	0
Nitrato Amónico	0,41	33,5	0	0	0	0
Sulfato Amónico	0,28	21,0	0	0	0	0
Sulfato Potásico	0,82	0	0	52,0	0	0
Sulfato Magnésico	0,38	0	0	0	0	16,0
Fosfato monoamónico	1,24	12,0	61,2	0	0	0
Fosfato monopotásico	1,65	0	52,6	33,7	0	0
Nitrato Magnésico	0,70	11,0	0	0	0	15,7
Nitrato Cálcico	0,55	15,5	0	0	26,6	0
Complejo Microelementos (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo)	9,88	0	0	0	0	0

Datos elaborados a partir de datos proporcionados por tres empresas en la zona de estudio.

El indicador seleccionado para evaluar el efecto de la escasez de nutrientes en las necesidades de fertilizantes es el **coste de los fertilizantes (CF, €/ha)** obtenido del modelo.

2.4.4. Otros efectos agronómicos

Como se ha mencionado en la introducción, en las principales revisiones sobre aspectos agronómicos el riego con AMD se describen otros posibles efectos agronómicos que pueden afectar a la producción agrícola, además de los considerados anteriormente.

En primer lugar, existe un riesgo por problemas de fitotoxicidad en cultivos sensibles al boro, dada su alta concentración relativa en el AMD en comparación con las aguas continentales (Hilal et al., 2011; Martínez-Álvarez et al., 2016). Este problema afecta principalmente a las especies leñosas, ya que la fitotoxicidad se produce por acumulación en los tejidos vegetales. Por tanto, es un problema que podría afectar a especies muy abundantes en la zona de estudio, como los cítricos y los frutales carnosos, que se encuentran entre los cultivos muy sensibles (naranja, pomelo, melocotonero, albaricoquero) y los extremadamente sensibles (limonero) (Eaton, 1940; Maas, 1990). Teniendo en cuenta esta circunstancia, el Anexo VIII del Anexo 03 de la PPHDS 2022727 (CHS, 2021) consiste en un “Estudio del CEDEX sobre el límite impuesto al boro en las aguas del Post-trasvase”, donde se revisa el límite impuesto al boro en las aguas a aplicar en las zonas regables del TTS redotadas con AMD, fijándolo en 0,4 mg/L, con ciertas consideraciones complementarias. Este valor debería garantizar, de forma general, la ausencia de efectos por una elevada concentración de boro en las producciones agrícolas regadas con AMD en las zonas regables asociadas al TTS. Asumiendo la implementación de esta medida, no se ha considerado efecto agronómico relativo a posibles problemas de fitotoxicidad por boro. De forma similar, se podría plantear un posible riesgo de fitotoxicidad por la relativamente alta concentración de cloruro y sodio presente en el AMD, especialmente en cultivos sensibles como los cítricos. Esta cuestión fue analizada en base a numerosas publicaciones científicas por Maestre-Valero et al. (2018), poniendo de manifiesto que los contenidos del AMD en las IDAMs de la DHS presentan valores sensiblemente por debajo del umbral que podría representar un riesgo de daño en los cultivos regados con AMD.

Finalmente, también suele identificarse un riesgo de alcalinización o sodificación de suelos, cuya principal causa es una mala relación entre las concentraciones de los cationes Na^+ vs Ca^{2+} y Mg^{2+} . El AMD se caracteriza por unas concentraciones bajas de Ca^{2+} y Mg^{2+} (prácticamente nulos antes del pos-tratamiento de remineralización) y valores relativamente altos de Na^+ . En general, se puede afirmar que este riesgo es moderado si solo se aplica AMD al riego, y disminuye o desaparece cuando se maneja

de forma conjunta con otros recursos superficiales o subterráneos. Dado que no son unos efectos fácilmente evaluables y no se tiene constancia de que se hayan presentado problemas en la zona de estudio, tampoco se han considerado.

2.5. Análisis ambiental

Para realizar el análisis ambiental se ha utilizado la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que tiene en cuenta los procesos de forma global y permite estudiar las cargas ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o de una actividad.

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. La complejidad del ACV requiere un protocolo al cual deberá ajustarse todo estudio de ACV. Dicho protocolo se encuentra establecido en la normativa elaborada por *International Standards Organisation*, ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006), que conlleva cuatro fases: objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario, análisis del impacto e interpretación. Las dos primeras fases forman parte de la metodología, y se exponen a continuación, en los Epígrafes 2.5.1 y 2.5.2; y el análisis del impacto e interpretación forman parte de los resultados, y se tratan en el Epígrafe 3.2.

2.5.1. Objetivos y alcance del análisis de Ciclo de Vida

Mediante el ACV se ha cuantificado el impacto ambiental producido por los siguientes cultivos hortícolas (alcachofa, brócoli, lechuga y melón) y leñosos (naranja, mandarina, limonero, albaricoquero, melocotonero y almendro) en las condiciones propias de producción de las zonas regables del TTS bajo los tres escenarios de suministro de agua considerados. Para presentar los resultados de los diferentes impactos ambientales se han utilizados dos unidades funcionales (UF): 1 hectárea de superficie cultivada y 1 kilogramo de cosecha. El análisis se ha realizado entre la cuna y la puerta de la parcela (*from “crade to gate”*), por lo que se han estudiado las fases de extracción de materias primas, transporte a la explotación, utilización en el cultivo y transporte de residuos (plásticos, etc.) al gestor correspondiente.

Las categorías de impacto analizadas (Tabla 15) 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 elementos minerales y combustibles fósiles, que se producen en la fabricación de los materiales empleados en los sistemas de producción agrícola. Para la evaluación de las categorías de impacto se ha utilizado la metodología CML-IA (Guinée et al., 2002) con el software SimaPro 9.2.0.2 (PRe Consultants, 2021).

Tabla 15. Indicadores de impacto considerados en el análisis ambiental.

Categoría de impacto	Acrónimo	Unidad
Agotamiento de recursos (materias primas)	ADe	kg Sb _{eq}
Agotamiento de recursos (combustibles fósiles)	ADf	MJ
Acidificación potencial	AC	kg SO ₂ _{eq}
Eutrofización potencial	EU	kg PO ₄ _{eq}
Calentamiento global	GW	kg CO ₂ _{eq}

2.5.2. Análisis de Inventario

Los datos utilizados para elaborar el inventario de ciclo de vida de los diferentes cultivos (Tablas 16 y 17) se han tomado de las siguientes fuentes:

- Los datos de producción, fertilizantes y agroquímicos (dosis, número de aplicaciones, etc.) se han obtenido de los Estudios de Costes y Rentas de las Explotaciones Agrarias (MAPA, 2018; MAPA, 2020).
- Las necesidades de agua de los cultivos se han obtenido del Servicio de Información Agrometeorológica de la Región de Murcia (SIAM, 2021).
- El uso de la maquinaria se ha calculado siguiendo la metodología propuesta por Audsley et al. (1997), adaptándola a las condiciones de uso y vida media de la maquinaria estimada para España (Márquez, 2004).
- Los componentes del sistema de riego en las explotaciones agrarias se han determinado para una explotación tipo de tamaño medio (13 ha, CARM, 2018) con un embalse de 25.000 m³ de capacidad (Martínez-Álvarez et al., 2008). Se consideró una vida media de 10 años para las tuberías de PE, 20 años para las

tuberías de PVC, y 40 años para el embalse y cabezal de riego. El uso de las infraestructuras de riego se ha prorrateado en función de la longitud del ciclo de cultivo de cada especie hortícola (2 años para alcachofa, 6 meses para brócoli y 4 meses para lechuga y melón) y leñosa (15 años para cítricos, frutales de hueso y almendro).

Otros 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 agroquímicos, maquinaria agrícola, producción de electricidad, transporte de materiales y residuos a planta de procesado, etc.

Para poder realizar una evaluación ambiental detallada, el ACV se ha dividido en seis fases, que se detallan a continuación:

1. *Producción de fertilizantes:* incluye la extracción de materias primas, producción, envasado, transporte y distribución hasta la parcela de los fertilizantes (N, P_2O_5 y K_2O), así como el transporte y gestión de los envases hasta la planta gestora.
2. *Producción de agroquímicos:* incluye la síntesis de materias activas, envasado, transporte y distribución hasta la parcela de los agroquímicos, así como el transporte y gestión de los envases hasta la planta gestora.
3. *Producción de la maquinaria:* incluye la manufactura, transporte, mantenimiento, reparación y reciclado de la maquinaria utilizada en la parcela para realizar las labores de campo de los cultivos.
4. *Producción de plántulas y plantones en vivero:* incluye la producción de plantas de vivero (plántulas de hortícolas y plantones arbóreos) y el transporte hasta la parcela.
5. *Sistema de riego:* incluye la fabricación de la infraestructura de riego de la parcela (cabezal de riego, filtros, tanques de abonos, programador y tuberías de PE y PVC), la construcción del embalse, el agua y la energía eléctrica necesaria para el riego; así como el transporte y gestión de los residuos hasta la planta gestora, al final de la vida útil.
6. *Operaciones de campo:*
 - En cultivos hortícolas comprenden: laboreo, siembra, trasplante, aplicación de agroquímicos, recolección y transporte hasta central hortofrutícola. Para el melón incluye también el plástico utilizado para el acolchado.

- En cultivos leñosos comprenden: plantación, laboreo, poda y manejo de restos de poda, aplicación de agroquímicos, recolección y transporte hasta central hortofrutícola. La labor de plantación se ha prorrateada considerando una vida media del cultivo de 15 años.

En esta fase se han considerado las emisiones al aire producidas por la combustión del diésel utilizado para realizar las labores; así como las emisiones de N (NH_3 ; N_2O ; NO_3^-) al aire y agua producidas por la aplicación de fertilizantes nitrogenados minerales y orgánicos en la parcela. La metodología utilizada ha sido la propuesta por Audsley (2000) y Brentrup et al. (2000). Para los cultivos hortícolas se ha considerado que un 30% de la fertilización se aporta en forma de materia orgánica.

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 5 (Ecoinvent, 2020) para una distancia de 50 km; excepto para los esquejes de alcachofa que se considera una distancia de 700 km desde el norte de España.
- La energía específica de cada escenario de riego se ha obtenido a partir de la energía específica de cada fuente de agua y del porcentaje que supone en el mix de cada escenario considerado descrito en el Epígrafe 2.2: (0,93 kWh/m³ en el escenario de referencia (0% AMD), 2,21 kWh/m³ en el escenario de uso conjunto (50% AMD) y 3,49 kWh/m³ en el escenario de riego con AMD (100% AMD).
- 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).

Tabla 16. Inventario de ciclo de vida de los cultivos hortícolas analizados.

Inputs/Outputs	Unidades	Cultivos hortícolas				Fuente de datos
		Alcachofa	Brócoli	Lechuga	Melón	
Duración del ciclo	meses	12	6	4	4	a
Densidad de plantación	Ud/ha-ciclo	7.400	38.074	65.576	10.554	a
Diesel	L/ha-ciclo	380	310	310	335	a
Maquinaria	h/ha-ciclo	76	62	62	67	a
Fertilizantes:						a
• N	kg/ha-ciclo	249	190	211	165	a
• P ₂ O ₅	kg/ha-ciclo	99	64	47	58	a
• K ₂ O	kg/ha-ciclo	171	117	152	172	a
Compost*	t/ha-ciclo	7,5	7,5	7,5	7,5	a
Agroquímicos:						
• Fungicidas e insecticidas	kg/ha-ciclo	13	8	8	9	b
• Herbicidas	kg/ha-ciclo	4	3	7	5	b
Plástico para acolchado	kg/ha-ciclo	-	-	-	120	a
Suministro de agua escenario de referencia	m ³ /ha-ciclo	10.570	6.967	4.926	4.500	c
Energía específica	kWh/m ³	SE	SE	SE	SE	d
Producción escenario de referencia	kg/ha-ciclo	17.748	13.700	48.874	45.284	a

* Composición media del compost por tonelada: 6 kg de N, 2 kg de P₂O₅, y 8 kg de K₂O (MARM, 2010), riqueza en nutrientes de 1,5% N, 0,5% P₂O₅ y 2% K₂O considerando un 40% de materia seca). (a) MAPA (2020); (b) Segura et al. (2006); (c) SIAM (2021); (d) Según escenario: 0,93 kWh/m³ en el escenario de referencia, 2,21 kWh/m³ en el escenario de uso conjunto y 3,49 kWh/m³ en el escenario de riego con AMD.

Tabla 17. Inventario de ciclo de vida de los cultivos leñosos considerados.

Inputs/Outputs	Unidades	Cítricos			Frutales de hueso		Almendra regadío	Fuente de datos
		Limonero	Mandarino	Naranja	Albaricoquero	Melocotonero		
Duración del ciclo	años/ha	1	1	1	1	1	1	a
Densidad de plantación	árboles/ha	278	667	333	204	571	260	a
Marco de plantación	m x m	6 x 6	6 x 2,5	6 x 5	7 x 7	5 x 3,5	7 x 5,5	a
Diesel	L/ha-año	535	520	535	430	430	100	a
Maquinaria	h/ha-año	107	104	107	86	86	20	a
Fertilizantes:								a
• N	kg/ha-año	182	214	197	106	129	120	a
• P ₂ O ₅	kg/ha-año	36	43	40	33	55	60	a
• K ₂ O	kg/ha-año	132	95	125	124	161	100	a
Agroquímicos:								
• Fungicidas e insecticidas	kg/ha-año	9	13	7	13	20	12	b
• Herbicidas	kg/ha-año	4	6	5	6	9	4	b
Suministro de agua escenario de referencia	m ³ /ha-año	5.930	6.608	4.993	5.643	5.776	3.806	c
Energía específica	kWh/m ³	SE	SE	SE	SE	SE	SE	d
Producción escenario de referencia	kg/ha-año	30.267	15.214	39.735	20.457	19.569	3.182	a

(a) MAPA (2018); (b) Segura et al. (2006); (c) SIAM (2021); (d) según escenario: 0,93 kWh/m³ en el escenario de Referencia, 2,21 kWh/m³ en el escenario de uso conjunto y 3,49 kWh/m³ en el escenario de riego con AMD.

2.6. Análisis económico

Para realizar el análisis económico se ha partido de los datos de caracterización de los distintos sistemas productivos agrarios publicados en ECREA (2016), que proceden de la información suministrada por las explotaciones. El MAPA realiza estudios sobre la economía de los sistemas de producción, analizando los costes y rentabilidad de diversas actividades agrícolas en varias comunidades autónomas, permitiendo mediante su comparación extraer la evolución de sus producciones, productividad, rentabilidad y características estructurales de las explotaciones encuestadas. En nuestro caso, se han tomado los valores de caracterización económica más recientes para los cultivos en la Región de Murcia, adaptando la ficha del ECREA para cada cultivo de manera que dentro de los costes directos se diferencie el “agua de riego” de “otros suministros”. Además, al final de cada ficha se han incluido los dos indicadores económicos que se han utilizado para analizar el impacto económico en los escenarios considerados:

- **Margen bruto estándar (MBE, €/ha).** Es la diferencia entre los ingresos de la explotación derivados del conjunto de las actividades productivas, incluidas las subvenciones de explotación, y todos los gastos variables, excepto los atribuidos a la retribución de la mano de obra familiar y eventual, así como los derivados del alquiler de maquinaria.
- **Indicador de efecto económico relativo (IEER, €/ha).** Este indicador se ha obtenido a partir de la combinación de varias variables primarias (ingreso de la cosecha, costo de fertilización y costo del agua) y permite valorar la variación de los ingresos de la cosecha, el costo de la fertilización y agua de riego en los escenarios de uso conjunto (50% AMD) y de riego con AMD (100% AMD) respecto al escenario de referencia (0% AMD); de modo que para el escenario de referencia toma el valor “0”, y para los otros dos escenarios–se calcula como:

$$\text{IEER}_i (\text{€/ha}) = [(\text{Ingresos de la cosecha})_i - (\text{Ingresos de la cosecha})_0] - [(\text{costo fertilización})_i - (\text{costo fertilización})_0] - [(\text{costo agua})_i - (\text{costo agua})_0]$$

Indicando “0” el escenario de referencia y “i” el escenario analizado.

La metodología seguida para analizar el impacto económico de los distintos escenarios en los indicadores de impacto económico ha sido la incorporación del

efecto económico de la evaluación de los impactos agronómicos sobre la producción, sobre las necesidades totales de riego y sobre el coste de los fertilizantes a las fichas de caracterización de los distintos cultivos en la Región de Murcia y, subsecuentemente, sobre los indicadores económicos MBE y IEER. Del mismo modo, se ha considerado la variación del coste del agua de riego en cada escenario.

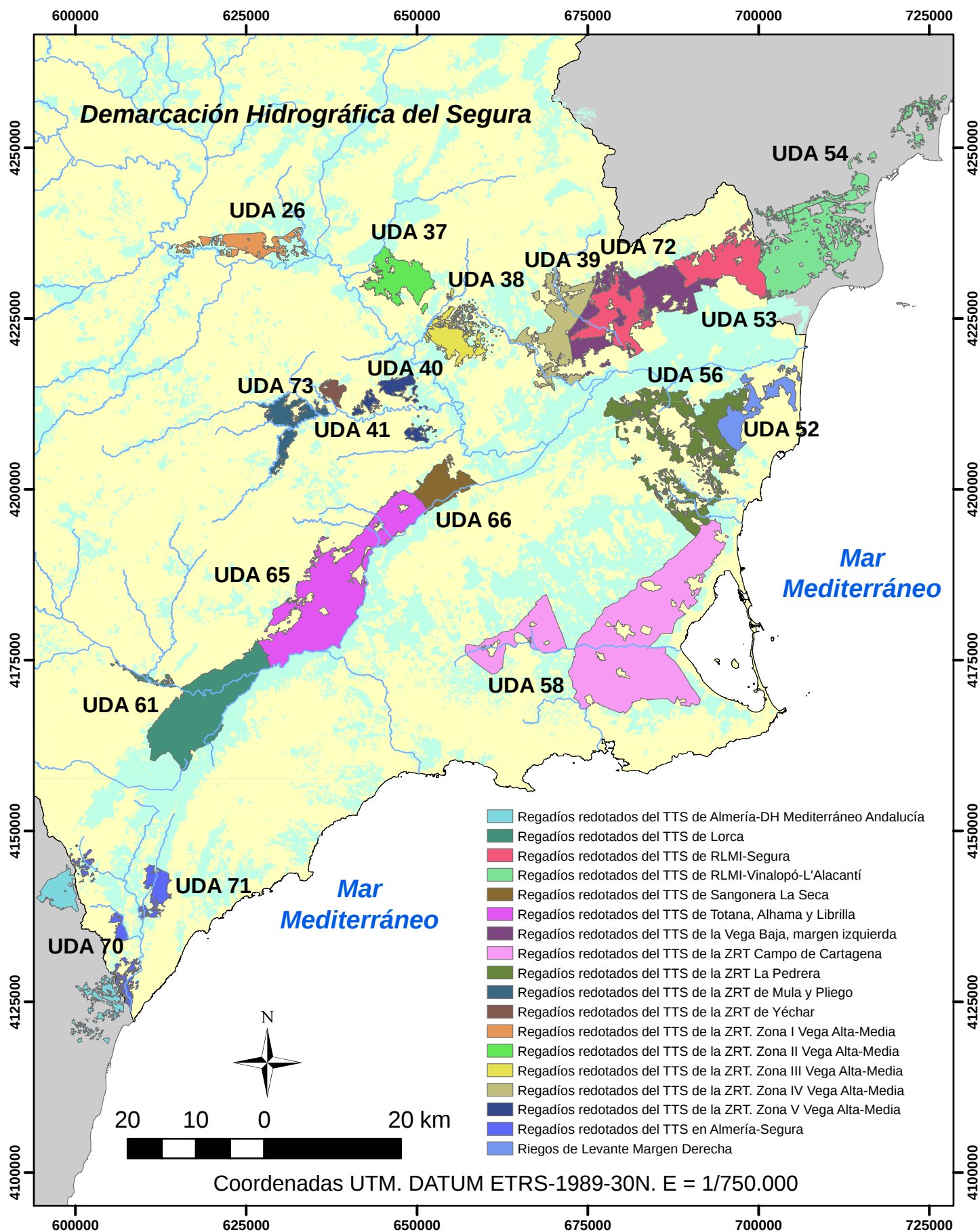
2.7. Extrapolación de resultados a las Zonas Regables del TTS

La extrapolación de valores de los indicadores de impacto calculados para cada uno de los cultivos y escenarios a las zonas regables asociada al TTS se ha realizado adoptando como unidad territorial de cálculo las Unidades de Demanda Agrícola (UDAs) definidas en la PPHDS 2022/27 (CHS, 2021). La Tabla 18 recoge la denominación y la superficie neta de cada una de las UDAs con suministro de agua de riego del TTS, y el Mapa 1 su localización.

Tabla 18. UDAs con suministro de agua de riego del TTS (CHS, 2021)

UDA	Denominación	Superficie neta (ha)
UDA26	Regadíos redotados del TTS de la ZRT I Vega Alta-Media	2.747
UDA37	Regadíos redotados del TTS de la ZRT II Vega Alta-Media	3.483
UDA38	Regadíos redotados del TTS de la ZRT III Vega Alta-Media	2.429
UDA39	Regadíos redotados del TTS de la ZRT IV Vega Alta-Media	5.268
UDA40	Regadíos redotados del TTS de la ZRT V Vega Alta-Media	1.828
UDA41	Regadíos redotados del TTS de la ZRT Yéchar	763
UDA52	Riegos de Levante Margen Derecha	2.886
UDA53	Riegos redotados del TTS de RLMI-Segura	8.713
UDA54	Riegos redotados del TTS de RLMI-Vinalopó-L'Alacantí	8.638
UDA56	Regadíos redotados del TTS de la ZRT La Pedrera	9.411
UDA58	Regadíos redotados del TTS de la ZRT Campo de Cartagena	18.947
UDA61	Regadíos redotados del TTS de Lorca	7.109
UDA65	Regadíos redotados del TTS de Totana, Alhama y Librilla	10.157
UDA66	Regadíos redotados del TTS de Sangonera La Seca	1.097
UDA70	Regadíos redotados del TTS de Almería-DH Med. de Andalucía	2.173
UDA71	Regadíos redotados del TTS en Almería-Segura	2.150
UDA72	Regadíos redotados del TTS de la Vega Baja, margen izquierda	6.827
UDA73	Regadíos redotados del TTS de la ZRT Mula y Pliego	1.973
Total = 95.599 ha		

Nota: Las UDAs 54 y 70 se encuentran fuera de la Demarcación del Segura, pero forman parte de las zonas regables asociada al TTS. Datos elaborados a partir de la PPHDS 2022/27 (CHS, 2021).



Mapa 1. UDAs de las zonas regables asociadas al trasvase Tajo-Segura

El procedimiento seguido para extrapolar los valores de los distintos indicadores al conjunto de las zonas regables asociadas al TTS se puede sintetizar en las siguientes fases:

1. *Determinación del valor de los indicadores agronómicos, ambientales y económicos para cada grupo de cultivo considerado en la PPHDS 2022/27 (CHS, 2021).* Teniendo en cuenta los valores obtenidos en los indicadores propuestos para cada cultivo y escenario, se han calculado los valores correspondientes a los grupos de cultivos “hortícolas al aire libre”, “cítricos”, “frutales no cítricos” y “almendro” considerando como factor de ponderación las superficies que ocupan los cultivos pertenecientes a cada grupo de cultivos en la Región de Murcia en 2020 (CREM, 2021). En el caso de “hortícolas al aire libre”, dado que durante un año se suelen realizar varios ciclos de cultivo, se ha considerado como valor anual el valor medio obtenido de las siguientes cinco combinaciones de cultivos, por considerarlas las más frecuentes y representativas de la zona de estudio: Lechuga-Lechuga, Lechuga-Brócoli, Lechuga-Melón, Brócoli-Melón y Alcachofa. El Epígrafe 3.4.1 recogen los valores calculados en cada escenario de los indicadores agronómicos, ambientales y económicos.
2. *Determinación del peso de cada grupo de cultivos en cada UDA.* Partiendo de la información sobre el porcentaje de superficie neta que cada grupo de cultivos representa en cada UDA (CHS, 2021), se ha calculado su peso en la UDA de forma proporcional a dichos porcentajes.
3. *Determinación de los valores anuales de los indicadores agronómicos, ambientales y económicos para cada UDA y escenario considerado.* Se han calculado en cada UDA como el producto del valor del indicador para cada grupo de cultivos multiplicado por el peso de dicho grupo en la UDA.
4. *Agregación y representación gráfica de los resultados para cada escenario y categoría de impacto.* La estimación de los valores totales de cada indicador en el conjunto de las Zonas Regables asociadas al TTS para cada escenario se ha realizado mediante la suma de los valores obtenidos en cada UDA para cada escenario.
5. Finalmente, el valor de los indicadores de impacto en cada UDA se ha representado espacialmente para mostrar sus tendencias espaciales mediante un Sistema de Información Geográfica.