



Universidad
Politécnica
de Cartagena

*Análisis de las soluciones tecnológicas para las actuaciones de desalación y gestión de aguas desaladas recogidas en el “**Plan para la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad en regadíos- Fase II**” (Plan de recuperación, transformación y resiliencia español), y justificación de su elección como mejor alternativa tecnológica disponible.*

Autores:

Dr. Ing. José Francisco Maestre Valero

Dr. Ing. Victoriano Martínez Álvarez



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Sobre este informe

Este informe ha sido promovido por la Subdirección General de Regadíos, Caminos Naturales e Infraestructuras Rurales, de la Dirección General de Desarrollo Rural, Innovación y Formación Agroalimentaria, perteneciente al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

El objeto del trabajo es el análisis y evaluación tecnológica de las siguientes actuaciones de modernización de regadíos, incluidas en el “Plan para la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad en regadíos” (Plan de recuperación, transformación y resiliencia español), con el fin de justificar su elección como la mejor alternativa tecnológica disponible para la producción y aplicación de aguas desaladas al regadío, considerando que se realice con el menor perjuicio posible sobre los objetivos medioambientales de mitigación y la adaptación al cambio climático.

- Proyecto complementario a la modernización de regadíos de la Comunidad de Usuarios de Sierra de Gádor. Término municipal de El Ejido, sectores 1, 2, 3, 4 y 5 (Almería)
- Proyecto de modernización y mejora del regadío en la Zona Centro Sur de Fuerteventura, TT.MM. De Tuineje y Pájara, Isla de Fuerteventura (Las Palmas de Gran Canaria)
- Optimización en el uso de los recursos hídricos de aguas desaladas y mejora de la eficiencia energética mediante bombeo solar fotovoltaico y sistema de almacenamiento de energía para Aguas del Almanzora, S.A.
- Proyecto para la mejora del aprovechamiento y gestión de los recursos de aguas no convencionales para la Comunidad de Regantes de Totana (Murcia).

La evaluación de cada una de las actuaciones se ha llevado a cabo mediante (1) el análisis transversal de las tecnologías aplicadas actualmente en las instalaciones de desalación y desalobración, identificando las que se consideran mejores para minimizar su impacto ambiental en el sector; y (2) una valoración específica de las tecnologías propuestas en cada una de las actuaciones enumeradas anteriormente, con el fin de acreditar si es o se encuentra entre las mejores tecnologías disponibles actualmente para minimizar el posible perjuicio significativo a objetivos medioambientales a efectos de lo dispuesto en el artículo 17 del Reglamento (UE) 2020/852. En el caso de los proyectos que no incluyen instalaciones de desalación o desalobración, pero su actuaciones van destinadas a la gestión y aplicación de estas aguas, se ha evaluado la idoneidad de dichas actuaciones para la optimización de la gestión y el uso del agua en las zonas regables afectadas.

Sobre los autores

Los Drs. José Francisco Maestre Valero y Victoriano Martínez Álvarez pertenecen al personal docente e investigador de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), formando parte del Grupo de Investigación Diseño y Gestión en Agricultura de Regadío de la UPCT.

D. José Francisco Maestre es Doctor Ingeniero Agrónomo, y Máster en Técnicas Avanzadas en Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario por la Universidad Politécnica de Cartagena. José F. Maestre es Profesor Titular de Universidad desde 2019 y atesora 17 años de experiencia en investigación sobre la gestión del agua en la agricultura y el uso de recursos hídricos no convencionales en el regadío. Ha realizado una estancia de investigación predoctoral en el UK Centre for Ecology and Hydrology (CEH) en Oxford y otra postdoctoral en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Ha participado en numerosos proyectos de investigación de ámbito europeo, nacional y regional, así como en contratos de investigación y asistencia técnica, de los que se derivan 54 artículos en revistas de alto impacto. Ha dirigido 2 tesis doctorales.

D. Victoriano Martínez es Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universidad Politécnica de Madrid, y Máster en Hidrología General y Aplicada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Victoriano Martínez es Catedrático de Universidad desde 2016 y atesora 27 años de experiencia en investigación y transferencia sobre la gestión del agua en la agricultura y el riego agrícola. Ha realizado estancias de investigación predoctorales en universidades en EEUU (University of Missouri-Columbia) y Canadá (University of Calgary), y posdoctoral en Australia (National Centre for Engineering in Agriculture). Ha participado en numerosos proyectos de investigación de ámbito europeo, nacional y regional, así como en contratos de investigación y asistencia técnica, de los que se derivan 55 artículos en revistas de alto impacto. Ha dirigido 7 tesis doctorales. Actualmente es director de la cátedra Universidad-Empresa “Trasvase y sostenibilidad - José Manuel Claver Valderas”.

Los autores han dirigido y participado en numerosos proyectos y contratos relacionados con los temas que competen a este informe: la desalinización de agua marina y la desalobración de aguas continentales o procedentes de estaciones de depuración para su uso en el regadío. Se destacan los siguientes:

- **PROYECTO I+D.** Sustainable use of irrigation water in the Mediterranean Region (SIRRIMED) – REF. FP/-KBBE-2009-3-245159 (01/06/2010 – 31/12/2013).
 - **CONTRATO I+D.** SCRATS. Antecedentes y problemática de la aplicación de **agua marina desalinizada** al riego agrícola. REF. SCRATS-2014. (2014).
 - **PROYECTO I+D.** Análisis económico, energético y de emisiones de GEI de las transferencias en los mercados del agua de la cuenca del Segura (19280/PI/14). Proyecto financiado por la Fundación Séneca (01/07/2015 – 31/06/2018).
-



- **CÁTEDRA Universidad – Empresa.** Cátedra Transvase y Sostenibilidad José Manuel Claver Valderas. REF. CUE-SCRATS 2017-2025-T (01/04/2017 – 01/04/2025). 5 años de actividad investigadora sobre el riego con **agua marina desalinizada** en la Región de Murcia.
- **PROYECTO I+D.** Sostenibilidad agro-fisiológica, ambiental y económica del riego con **agua marina desalinizada** en cítricos y sistemas hidropónicos semicerrados (RIDESOST) – REF. AGL2017-85857-C2-2-R. Proyecto financiado por Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (1/01/2018 – 30/06/2021).
- **PROYECTO I+D. Desalinated seawater** for alternative and sustainable soilless crop production (DESEACROP) – REF. LIFE16 ENV/ES/000341. Proyecto financiado por Comisión Europea a través del programa LIFE-ENVIRONMENT (1/11/2017 – 31/12/2020).
- **PROYECTO I+D.** Nuevos avances tecnológicos para un manejo sostenible del riego con **agua marina desalinizada** (SEARRISOST). REF. RTC-2017-6192-2. Proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (1/10/2018 – 31/12/2021).
- **CONTRATO I+D.** La Tercia explotaciones. Estudio hídrico para la solicitud de concesión de **aguas desaladas** en Finca Lo Montanaro. REF. 4911/17IAEA (2017).
- **PROYECTO I+D.** Mejora de la sostenibilidad y viabilidad agro-económica y medioambiental de cultivos tradicionales regados con **agua marina desalinizada** mediante fertirriego inteligente (SEA4CROP). REF. PID2020-118492RA-C22. Proyecto financiado por Ministerio de Ciencia e Innovación (01/09/2021 – 31/08/2024).
- **CONTRATO I+D. Sostenibilidad, agua y agricultura en el siglo XXI (SOS-AGUA-XXI).** REFs: 7078/22IA-P, 7081/22IA-P, 7082/22IAP y 7084/22IA-P. Proyectos financiados por la Unión Europea a través de los fondos NextGeneration EU dentro del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (01/10/2021 – 30/09/2024).
- **PROYECTO I+D.** Solutions for **GHGs emissions mitigation** for the mixed farming systems across different European climates (Solutions4Farming, PCI2021-122031-2A). Proyecto financiado por la Comisión Europea (Fondos NextGeneration EU) a través de la convocatoria de Proyectos de Colaboración Internacional 2021-22 del Ministerio de Ciencia e Innovación (01/11/2021 – 30/12/2023).

La experiencia acumulada en la ejecución de estos proyectos y contratos sobre la materia objeto de este informe justifica su selección para este trabajo.

Informe realizado en octubre de 2023

Índice

	Página
1. Introducción y objetivos	1
2. Desalación y desalobración para uso agrícola en España.....	3
3. Tecnologías de desalación operativas	6
4. Descripción general de las instalaciones desaladoras y desalobradoras por OI	8
5. Tecnologías para los procesos de captación.....	11
6. Tecnologías para el pre-tratamiento	13
7. Tecnologías para los procesos de ósmosis inversa	15
8. Tecnologías para los procesos de postratamiento.....	19
9. Tratamiento y gestión de las salmueras.....	22
10. La desalobración como tratamiento en estaciones de regeneración de agua	25
11. Evaluación tecnológica de las propuestas del Plan	27
11.1. Proyecto complementario a la modernización de regadíos de la Comunidad de Usuarios de Sierra de Gádor. Término municipal de El Ejido, sectores 1, 2, 3, 4 y 5 (Almería).	27
11.2. Proyecto de modernización y mejora del regadío en la Zona Centro Sur de Fuerteventura, TT.MM. De Tuineje y Pájara, Isla de Fuerteventura (Las Palmas de Gran Canaria).....	32
11.3. Optimización en el uso de los recursos hídricos de aguas desaladas y mejora de la eficiencia energética mediante bombeo solar fotovoltaico y sistema de almacenamiento de energía para Aguas del Almanzora, S.A..	38

11.4. Proyecto para la mejora del aprovechamiento y gestión de los recursos de aguas no convencionales para la Comunidad de Regantes de Totana (Murcia 45

12. Síntesis y conclusiones 52

Referencias..... 54



1. Introducción y objetivos

El Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de la economía española recoge una serie de actuaciones de modernización de regadíos que se fundamentan en la desalación de aguas de mar y aguas salobres como fuente de suministro hídrico. Los procesos de desalación de aguas salobres y marinas se caracterizan por un elevado consumo energético y por la generación de un efluente (salmuera) que generalmente se vierte al mar, procurando no causar un perjuicio significativo en el estado de conservación de los hábitats receptores. Estas características representan un encaje complicado de los procesos de desalación en los objetivos medioambientales según lo dispuesto en el artículo 17 del Reglamento (UE) 2020/852. Sin embargo, actualmente la incorporación de los recursos hídricos no convencionales (aguas desaladas y regeneradas) es imprescindible para conseguir la resiliencia de la agricultura de regadío en muchas regiones españolas, así como una estrategia a desarrollar en el futuro inmediato para garantizar la seguridad alimentaria frente a los efectos del cambio climático. Por estos motivos, **es necesario asumir la estrategia de desalación de agua de mar y aguas salobres en las actuaciones de modernización de regadíos** del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de la economía española, siendo el condicionante a considerar en las actuaciones propuestas que utilicen las mejores tecnologías disponibles en lo referente a la producción y manejo de las aguas desaladas, con el fin de «no causar un perjuicio significativo».

En los objetivos medioambientales, a efectos de lo dispuesto en el artículo 17 del Reglamento (UE) 2020/852, destacan la **capacidad de mitigación y adaptación al cambio climático**, relacionadas ambas con la emisión de gases de efecto invernadero de las actividades a valorar. En el ámbito de las actividades de producción y distribución de agua desalada, se asume que la mejor tecnología posible desde el enfoque de la mitigación del cambio climático es la que presenta un menor consumo específico de energía (kWh/m³), ya que minimiza la emisión de gases de efecto invernadero. Además, se considera que la incorporación de energías renovables, como la fotovoltaica, representan la mejor estrategia adaptativa al cambio climático en el ámbito del suministro eléctrico.

Otra cuestión medioambiental, a considerar sobre lo dispuesto en el artículo 17 del Reglamento (UE) 2020/852, es que las actuaciones no tendrán efectos en detrimento de los recursos hídricos y marinos. Por lo tanto, en lo referente al **tratamiento y gestión de efluentes (salmuera)** en las actuaciones de modernización de regadíos propuestas, donde la solución adoptada en todos los casos es el vertido al mar, deberán realizarse los estudios necesarios para acreditar que las soluciones propuestas no causan un perjuicio significativo en el estado de conservación de los hábitats receptores. Esta cuestión ya ha sido considerada en la Evaluaciones de Impacto ambiental (EIA) de las estaciones desaladoras operativas, como se justifica en este informe, y será necesaria para las estaciones desaladoras de nueva construcción.

Por tanto, el **objetivo general** de este informe es el análisis de las soluciones tecnológicas de las 6 actuaciones de modernización de regadíos, incluidas en la Fase II del Plan de



Recuperación, Transformación y Resiliencia de la economía española, que se fundamentan en la producción o aplicación de aguas desaladas al regadío. Concretamente, en los **proyectos que incorporan instalaciones desaladoras** (3), se valora, conforme a la información aportada para cada actuación, si las tecnologías propuestas en cada fase del proceso de desalación son o se encuentran entre las mejores tecnologías disponibles para que la actividad se realice con el menor perjuicio posible sobre los objetivos medioambientales de mitigación y la adaptación al cambio climático. Por otra parte, en los **proyectos que no incluyen la producción de agua desalada** (3), pero sí su gestión y uso en el regadío, se valora la idoneidad de las actuaciones propuestas para la optimización del manejo que se hace de las aguas desaladas. Además, se aporta información sobre la tecnología de desalación aplicada en las estaciones desaladoras que suministran agua en cada proyecto, valorando el nivel de eficiencia de la tecnología actualmente disponible.

Para alcanzar estos objetivos, **el informe se ha estructurado en tres partes bien diferenciadas**. En primer lugar (Epígrafes 2 y 3) se presenta brevemente cuál ha sido la evolución y el estado actual de la desalación y desalobración para uso agrícola en España, así como las tecnologías de desalación operativas a la escala de producción propia de los proyectos de modernización de regadíos aquí considerados. A continuación (Epígrafes 4 a 10), se realiza un análisis transversal de las tecnologías aplicadas actualmente en cada una de las fases que integran los procesos de desalación y desalobración por ósmosis inversa (OI), identificando las que se consideran mejores para minimizar su impacto ambiental en el sector. Finalmente (Epígrafe 11) se realiza una valoración específica de las tecnologías propuestas en cada uno de los proyectos analizados, con el fin de acreditar si son o se encuentran entre las mejores tecnologías disponibles actualmente para minimizar el posible perjuicio significativo a objetivos medioambientales a efectos de lo dispuesto en el artículo 17 del Reglamento (UE) 2020/852. En el caso de los proyectos que no incluyen instalaciones de desalación o desalobración, pero sus actuaciones van destinadas a la gestión y aplicación de estas aguas, se ha evaluado la idoneidad de dichas actuaciones para la optimización de la gestión y el uso del agua en las zonas regables afectadas. El informe concluye con una síntesis y conclusiones sobre los aspectos analizados (Epígrafe 12).

2. Desalación y desalobración para uso agrícola en España

El continuo crecimiento de la población mundial y la necesidad de satisfacer sus necesidades de alimentos y servicios ha incrementado notablemente la competencia por el acceso a los recursos hídricos, habiéndose llegado en muchas regiones, generalmente de clima árido o semiárido, a producirse una demanda superior a los recursos disponibles. Ante este escenario, agravado por los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos, el uso de aguas no convencionales, no aptas para el abastecimiento directo doméstico, agrícola o industrial, es una alternativa que permite fortalecer el suministro hídrico necesario para múltiples actividades, favoreciendo su resiliencia ante la creciente situación de escasez hídrica. Estos recursos hídricos no convencionales se definen como aguas ajenas al ciclo hidrológico natural, es decir, aguas que no están disponibles de forma espontánea en la naturaleza y que, por lo tanto, requieren la intervención humana para su producción y adaptación a usos específicos. Estos recursos son principalmente (i) el agua marina desalinizada, (ii) las aguas continentales desalobradas y (iii) el agua regenerada.

Los recursos hídricos no convencionales se están convirtiendo en un complemento imprescindible de la planificación hidrológica de muchas regiones donde los problemas de escasez hídrica se están intensificando, como ocurre en la práctica totalidad de la cuenca mediterránea, y muy especialmente en el sureste y las regiones insulares españolas. Además, es previsible un crecimiento importante de las actuaciones dirigidas a la producción y uso de estos recursos, como se está poniendo de manifiesto en las actuaciones de modernización de regadíos incluidas en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de la economía española.

A nivel mundial, existen más de 18.000 plantas desaladoras que producen cerca de 60 hm³/día de agua marina desalada y 40 hm³/día de agua desalobrada, procedente de distintas fuentes de aguas salobres (ríos, lagos, acuíferos, agua depurada, etc.) (IDA, 2019). España, con aproximadamente un 5,7% de la capacidad instalada, ocupa la cuarta posición mundial en desalación, por detrás de Arabia Saudí, Estados Unidos y Emiratos Árabes Unidos. La tecnología de desalación predominante es la OI, que representa actualmente un 65% de la capacidad de producción instalada, y que se encuentra en continuo crecimiento puesto que representa más del 90% de la capacidad en los proyectos de desalación que se desarrollan actualmente. (IDA, 2019).

En España, la primera desaladora continental se construyó en Lanzarote en el año 1964. En los años 70 se instalaron diversas plantas en las islas Canarias dirigidas a hoteles y zonas turísticas y de ocio. En los años 80 se produjo una revolución de la OI se construyeron las primeras desaladoras cuyo destino fue la agricultura. En los años 90, se instalaron más de 300 plantas privadas de tamaño pequeño y medio (500 – 5.000 m³/día) en las provincias de Alicante, Murcia y Almería, principalmente derivadas de la fuerte sequía del momento y la necesidad de la agricultura de buscar alternativas para la supervivencia. La mayoría de estas plantas fueron desalobradoras de agua subterránea. En 2004 el Gobierno de España aprobó el Programa AGUA (Actuaciones para la Gestión y la Utilización del Agua), propuesto por el Ministerio de

Medio Ambiente para dotar de recursos hídricos el abastecimiento y el regadío a las cuencas mediterráneas. El Programa AGUA supuso la apuesta por la desalación como estrategia clave para solucionar los problemas derivados del déficit de recursos hídricos existente en la costa mediterránea española, programando actuaciones capaces de producir hasta 500 hm³/año de agua desalada o desalobrada. En concreto, se planificó la puesta en marcha y construcción de 27 plantas desaladoras, de las que se han ejecutado la mayor parte.

El impulso del programa AGUA ha propiciado que actualmente el país tenga una capacidad instalada superior a los 5 hm³/día para abastecimiento, riego y uso industrial. En la actualidad se estima que en España hay 765 plantas desaladoras con producciones mayores de 100 m³/día, con más de 100 plantas con producciones mayores de 10.000 m³/día (AEDyR, 2018). De estas, 360 son desaladoras de agua de mar y 405 de agua salobre. Las mayores plantas de desalación de agua de mar son las de Torrevieja (240.000 m³/día) y Águilas (210.000 m³/día) y en el caso de aguas salobres, las potabilizadoras de El Atabal, en Málaga (200.000 m³/día) y Abrera, en Barcelona (200.000 m³/día), esta última con tecnología de electrodiálisis reversible (en el resto el uso de la tecnología de OI está generalizado). Es importante resaltar que la mayoría de las desaladoras se encuentra en operación, aunque algunas no funcionan a plena capacidad. La Figura 1 muestra la situación actual de las grandes desaladoras de agua de mar gestionadas por Acuamed en España.

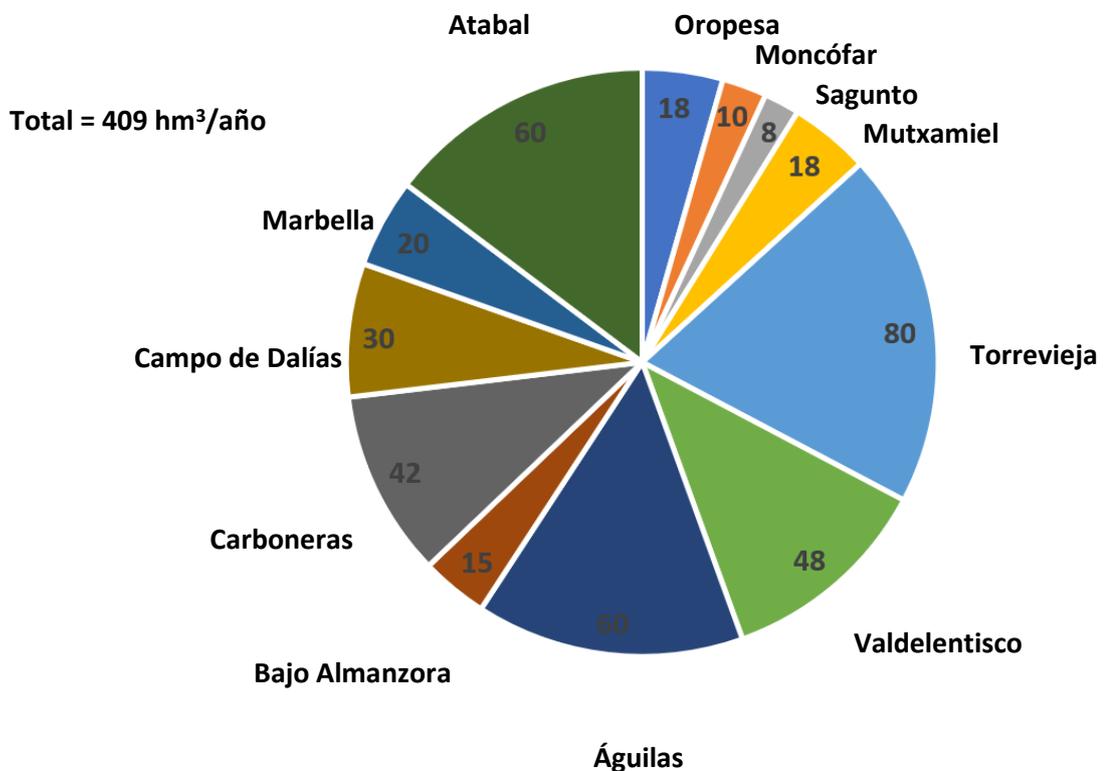


Figura 1. Situación actual de las grandes desaladoras de agua de mar de Acuamed en España. Fuente. Elaboración propia a partir de Zarzo (2020).



Con respecto al uso de agua desalinizada para agricultura, mientras que a nivel mundial solo representa el 2% del total de los usos, en España se alcanzan valores superiores al 21%. Muchas comunidades de regantes y empresas agrícolas ubicadas en el levante cuentan con agua marina desalinizada y agua desalobrada como parte de sus recursos hídricos, y las gestionan juntamente con el resto de los recursos disponibles: aguas superficiales, recursos externos trasvasados, aguas subterráneas y agua regenerada, consiguiendo de esta manera compensar las virtudes y defectos de cada fuente de agua (coste, salinidad, etc.) gracias a la mezcla de todos ellos. Las aguas desalinizadas, más popularmente denominadas “desaladas”, presentan unas características químicas singulares que las diferencian de los recursos convencionales, que se deben tener especialmente en cuenta cuando se destinan al riego; principalmente una dureza y una capacidad tampón muy reducidas, así como una elevada concentración de cloro, sodio y boro. Por consiguiente, el agua desalada para uso agrícola debe ser remineralizada e iónicamente equilibrada antes de su aplicación al riego. Distintos estudios han puesto de manifiesto que una correcta gestión del agua desalada permite incrementar la productividad y la calidad de las cosechas agrícolas cuando se compara con el riego mediante las aguas convencionales a las que sustituyen, que en el sureste español son habitualmente de calidad más reducida. Sin embargo, cabe destacar que existen algunos inconvenientes que limitan su uso agrícola, como son: (i) el elevado coste del agua desalada, derivado principalmente importante consumo energético requerido en el proceso de OI, que representa entre un 70-80% del gasto energético total (Martínez-Alvarez et al., 2019); (ii) el incremento en los costes de fertilización, que varía desde un 3% de los costes anuales de producción para un cultivo de lechuga, hasta un 35% para un cultivo de limón (Martínez-Alvarez et al., 2020); y (iii) la elevada concentración de boro en el agua marina desalinizada, en torno a 1 mg/L si no se adoptan medidas específicas, puede dar lugar a problemas de fitotoxicidad en cultivos sensibles a medio-largo plazo (Imbernón-Mulero et al., 2022).



3. Tecnologías de desalación operativas

Las tecnologías de desalación en el ámbito del regadío generalmente se aplican a aguas de tres tipos:

1. Agua de mar. Caracterizada por una salinidad elevada y uniforme, así como una disponibilidad prácticamente infinita.
2. Aguas salobres continentales, principalmente subterráneas, cuya salinidad es de origen geológico o resultado de la intrusión marina y/o actividades humanas. Su salinidad y composición puede ser muy variable, estando su disponibilidad generalmente asociada a las recargas naturales o artificiales del sistema hidrológico al que pertenecen.
3. Aguas depuradas salobres. Las estaciones depuradoras de aguas residuales situadas en zonas litorales suelen producir efluentes con una elevada salinidad, ya que se ven afectadas por filtraciones de agua marina o salobre en las redes de saneamiento, por lo que deben ser desaladas si se pretende su reutilización. Su disponibilidad está limitada por la generación de aguas residuales en el municipio donde se ubican y puede presentar oscilaciones importantes a lo largo del año en zonas turísticas.

En general, puede afirmarse que todas las tecnologías operativas para la desalinización de agua son aplicables a los tres tipos de aguas indicadas, aunque cada una de ellas presenta características diferenciadoras que las hace más adecuadas en función de las características del agua a tratar.

Las tecnologías de desalación actualmente operativas a la escala propia de las actuaciones recogidas en los proyectos de modernización de regadíos del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia pueden clasificarse en técnicas de desalinización por evaporación y técnicas de desalinización por membranas. El consumo de energía en los procesos de membrana depende de la salinidad de agua a tratar (agua bruta), mientras que en los procesos por evaporación no se da esta circunstancia.

Las técnicas de desalación por evaporación realizan la separación del agua y la sal mediante la evaporación del agua por aporte de energía, y su posterior condensación por enfriamiento. La industrialización de estos procesos ha dado lugar a distintas tecnologías constituidas por varias etapas y recirculaciones de distintas corrientes que pretenden optimizar el aprovechamiento del calor aportado, destacando las tecnologías de Evaporación Multietapa Flujos (EMF), Destilación por Múltiple Efecto (MED) y Compresión de Vapor (VC). Todas estas tecnologías se han empleado en países donde el coste de la energía es muy reducido, como los países del Golfo Pérsico, pero cada vez se utilizan menos como consecuencia de su falta de competitividad energética frente a las técnicas por membranas. En la actualidad, puede considerarse una alternativa a considerar solamente en proyectos donde exista un calor residual aprovechable, como sucede frecuentemente en las refinerías, plantas de ácido, las centrales eléctricas térmicas, etc.



Las técnicas de desalación por membranas consisten en un conjunto de operaciones de separación de uno o más componentes de una fase líquida utilizando una membrana con permeabilidad selectiva al mismo o a los mismos. En el caso de la desalación, los componentes que se separan son los iones disueltos en el agua bruta, generando como resultado una corriente con menor salinidad que el agua tratada (agua producto o permeado) y otra corriente con mayor salinidad que el agua tratada (salmuera o rechazo). Entre las técnicas de desalación por membranas, las tecnologías operativas son la electrodiálisis Reversible (EDR), la OI y la nanofiltración (NF). La EDR usa corriente eléctrica continua para separar las sales en un flujo de agua bruta, que se desplazan hacia los electrodos, según su carga eléctrica. En su tránsito hacia los electrodos, los iones positivos o negativos atraviesan membranas selectivas cuya configuración genera cámaras con sales (salmuera) y cámaras sin sales (permeado). Cada etapa de EDR elimina aproximadamente el 50-60% de sales, por lo que sólo es competitiva con aguas salobres de salinidad moderada, donde en 1 ó 2 etapas se obtiene la salinidad deseada en el agua producto. La OI utiliza el principio de ósmosis para eliminar la sal y otras impurezas, haciendo pasar el agua bruta a través de una serie de membranas semipermeables en el sentido contrario de la ósmosis directa o natural, para lo cual debe aplicarse una presión creciente con la salinidad del agua. Mediante la OI se obtienen dos flujos, uno que pasa a través de la membrana semipermeable y está prácticamente libre de sales (agua producto o permeado); y otro no pasa a través de la membrana semipermeable y queda con una mayor concentración de sales (salmuera o rechazo). Se trata de la técnica más empleada en la actualidad con notable diferencia, ya que como consecuencia de la continua mejora tecnológica en los distintos procesos que comprende, es la que presenta un menor consumo específico (kWh/m^3) de energía. La NF es un proceso prácticamente idéntico a la OI, donde el tipo de membranas empleado es efectivo en la separación de iones divalentes o de gran tamaño (sulfatos, Ca^{2+} , Mg^{2+} , ...), pero deja pasar los iones monovalentes predominantes en el agua de mar y en las aguas salobres (Cl^- , Na^+), por lo que su aplicación sólo es apta para reducir la salinidad producida por estos iones (reducción de la dureza en aguas salobres).

Además, existe un numeroso grupo de técnicas innovadoras de desalación en estado experimental o desarrolladas en pilotos a pequeña escala, como la congelación, el intercambio iónico, la formación de hidratos, la pervaporación, las células microbianas de desalación, etc. Estas técnicas actualmente no se encuentran operativas a la escala de trabajo requerida en los proyectos considerados en este informe.

Por tanto, se puede afirmar que la mejor tecnología operativa disponible para la desalación de aguas salobres y de mar a la escala de trabajo propia de los proyectos de modernización de regadíos es actualmente la OI, cuyo consumo de energía es sensiblemente inferior a los procesos por evaporación, y además está directamente relacionado con la salinidad del agua bruta, por lo que con las aguas salobres puede resultar especialmente reducido. Esta circunstancia se ve refrendada por el hecho de que la inmensa mayoría de los proyectos de desalación que se plantean actualmente a escala nacional e internacional, tanto de agua de mar como de agua salobre, se estén realizando con esta tecnología (IDA, 2019).

4. Descripción general de las instalaciones desaladoras y desalobradoras por OI

Las plantas que emplean la tecnología de OI producen agua desalada a partir de agua de mar o agua salobre, que puede ser a su vez convertida en agua potable o apta para otros usos tras someterse a los post-tratamientos correspondientes. No existen diferencias significativas entre el diagrama de proceso de una Estación Desaladora de Agua de Mar (EDAM) y de una estación desalobradoras, diferenciándose principalmente en las instalaciones de captación del agua bruta, los requerimientos de post-tratamientos y las magnitudes características en los parámetros de operación de la OI (presión de trabajo, consumo específico, factor de conversión, corte de sales, etc.). La Figuras 2 y 3 recogen el diagrama de flujo y el esquema característico de este tipo de instalaciones, respectivamente.

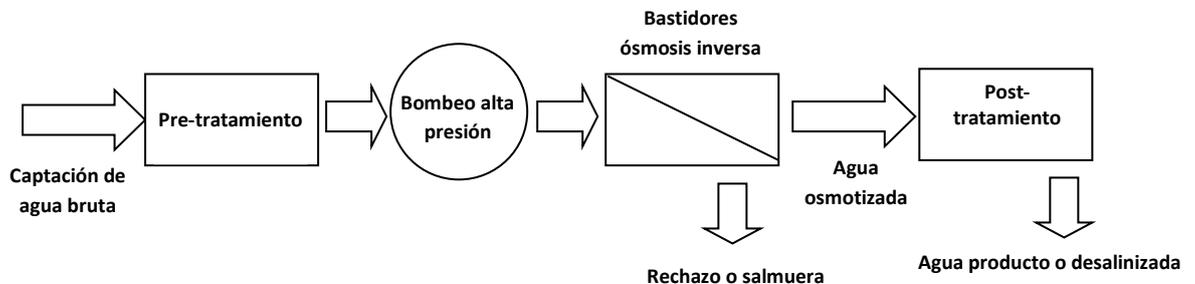


Figura 2. Diagrama de flujo de los procesos de desalinización por ósmosis inversa.

Tanto las EDAMs como las estaciones desalobradoras disponen en primer lugar de una serie de instalaciones para la captación y abastecimiento de agua bruta a la planta. El agua bruta se somete a una serie de pretratamientos, cuya finalidad es adecuar su calidad a las condiciones necesarias para optimizar el funcionamiento de las membranas de OI y evitar cualquier daño sobre las mismas. Una vez superada esta fase, el agua bruta es sometida a un bombeo de alta presión hasta alcanzar la presión necesaria para el proceso de OI, siendo este el punto de mayor demanda energética de todo el proceso. El agua bruta presurizada se conduce a las membranas de OI, que se organizan en bastidores donde pueden configurarse en distintas etapas o pasos de OI, siendo el resultado final dos flujos diferenciados. El primer flujo es el agua osmotizada, que es la parte del agua bruta que atraviesa la membrana semipermeable y pierde la práctica totalidad de la presión. El segundo flujo es el rechazo o salmuera, que es la parte del agua bruta que no atraviesa la membrana semipermeable y queda con una presión residual importante, que puede ser recuperada mediante distintas tecnologías para aumentar la eficiencia global del proceso de OI.

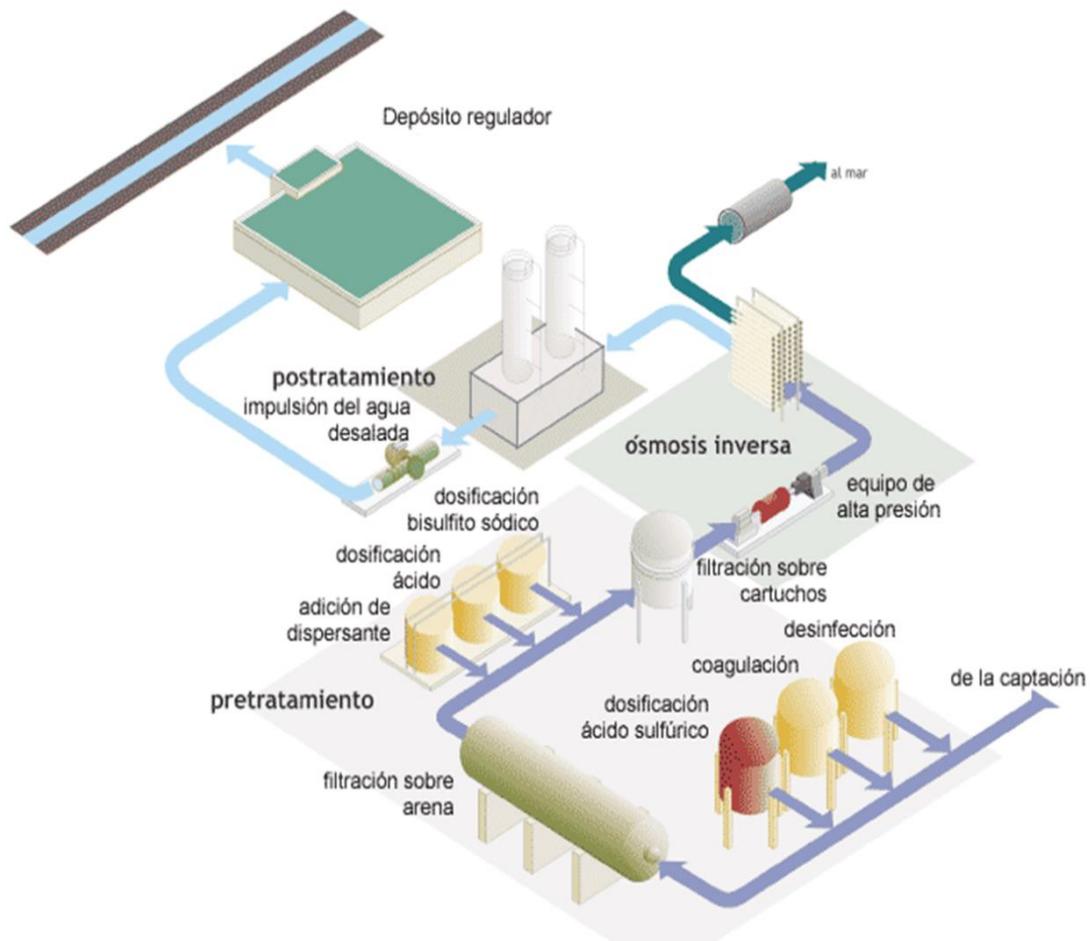


Figura 3. Esquema general de una planta desalinizadora o desalobradoradora. Imagen adaptada de Requena (2020).

El agua osmotizada tiene unas características fisicoquímicas (pH, índice de Langelier, alcalinidad, concentración de Ca y Mg, concentración de B, etc.) que no permiten su vertido directo a los sistemas de suministro domésticos o de regadío, ni tampoco la hacen apta para dichos usos. Para acondicionar el agua osmotizada se realizan post-tratamientos de estabilización y remineralización, pasando entonces a denominarse “agua desalinizada” o, más popularmente, “agua desalada”. Si se trata de un agua bruta salobre también es frecuente el término “agua desalobrada”.

El rechazo o salmuera tiene generalmente una composición química similar al agua bruta, pero con una mayor concentración de sales, por lo que la gestión de su vertido resulta compleja. En las EDAMs, la solución generalizada consiste en devolverla al mar lejos de la costa, mediante emisarios submarinos y sistemas de mezcla y difusión que minimicen sus impactos en los ecosistemas receptores. En el caso de las estaciones desalobradoras, la problemática es mayor, especialmente si se encuentran alejadas del mar, ya que la salmuera puede presentar altas concentraciones de nutrientes (nitratos principalmente) cuyo vertido puede poner en riesgo el estado ambiental del medio receptor.



Como se ha mencionado, el diagrama de flujo de la Figura 2 y el esquema de la Figura 3 son válidos también para las estaciones desalobradoras, siendo la principal diferencia con las EDAMs el valor de los parámetros de operación en la OI, ya que la salinidad de las aguas salobres suele encontrarse entre 5 y 10 veces por debajo de la del agua marina. Las principales diferencias en estos parámetros de operación son las siguientes:

- El contenido de sólidos disueltos (TDS) del agua salobre se encuentra generalmente entre 2 y 10 g/L, mientras que el agua marina presenta valores entre 37 y 39 g/L en el Mediterráneo.
- La presión de trabajo en los bastidores de OI de las estaciones desalobradoras se encuentra entre 10 y 20 bar, mientras que en las EDAMs se sitúa entre 60 y 70 bar.
- Las conducciones en los bastidores de OI de las estaciones desalobradoras se realizan con tuberías plásticas, mientras en el caso de las EDAMs es necesario recurrir a acero inoxidable u otras aleaciones metálicas con mayor timbraje.
- El consumo energético específico (kWh/m^3) en bastidores de OI de estaciones desalobradoras suele ser de 1/3 a 1/6 del consumo específico en las EDAMs.
- Los costes específicos de explotación (€/m^3) en estaciones desalobradoras también suelen encontrarse entre 1/3 a 1/6 de los que se producen en las EDAMs.
- El factor de conversión (porcentaje de agua producto con relación al agua bruta) de las estaciones desalobradoras se sitúa entre el 70 y el 90%, mientras en las EDAMs se encuentra en torno al 45-50%.

5. Tecnologías para los procesos de captación

El propósito de las instalaciones de captación es asegurar el caudal de agua bruta (de mar o salobre) necesario durante toda la vida de la planta, con la máxima calidad posible, sin que su construcción y posterior operación supongan impactos ambientales inasumibles.

En el caso del EDAMs, el diseño de la captación debe evitar la influencia de desembocaduras de ríos y ramblas, donde es previsible la presencia de sólidos en suspensión y coloides, zonas portuarias, donde es previsible la presencia de hidrocarburos y aceites, o zonas donde se realice cualquier tipo de vertido que pueda alterar la composición original del agua de mar. Existen distintas tecnologías para los procesos de captación, que se clasifican según se muestra en la Figura 4:

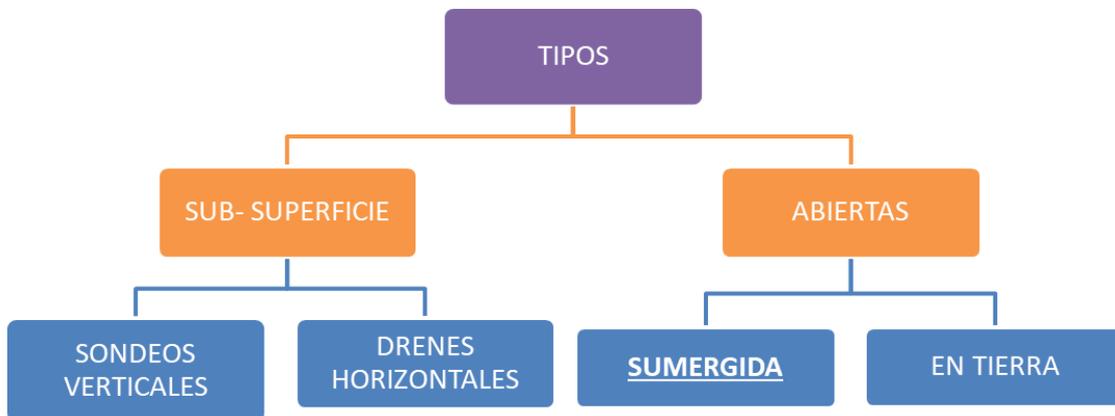


Figura 4. Tipos de captaciones de agua de mar.

Entre las captaciones subsuperficiales se encuentran los sondeos verticales y los drenes horizontales, que en ambos casos se caracterizan por proporcionar una agua de mayor calidad que las captaciones abiertas, ya que el agua es filtrada a través del lecho marino o del acuífero. Como inconveniente, suelen presentar un menor caudal de captación y con menor uniformidad a lo largo de la vida útil de la planta. En este grupo también se incluyen las galerías perforadas bajo el lecho marino.

Entre las captaciones abiertas se encuentran las tomas sumergidas y las tomas en tierra, que ofrecen mayores garantías en cuanto a los caudales a suministrar, pero están más expuestas a posibles efectos locales que afecten a la calidad del agua bruta.

Ninguna de estas tecnologías se puede calificar como la mejor disponible actualmente, ya que cada una de ellas puede ser la más adecuada en función de las características locales de la costa o de la singularidad de cada proyecto. Sin embargo, dado que la temperatura del agua bruta es un factor determinante en la capacidad de corte de sales de las membranas de OI, la tendencia actual es intentar garantizar la menor temperatura y la mayor uniformidad de esta variable en el agua bruta a lo largo del año, siendo generalmente las tomas abiertas

sumergidas las que mejor permiten optimizar estas variables juntamente con una elevada garantía en cuanto a disponibilidad del caudal de agua bruta requerido. Por estos motivos, pueden considerarse las más recomendables en EDAMs de forma general, siempre que no se hayan realizados estudios o ensayos específicos en favor de la aplicación de cualquier otra de las tecnologías mencionadas.

En el caso de las estaciones desalobradoras, el origen del agua bruta puede ser mucho más variado (aguas subterráneas, aguas depuradas, drenajes agrícolas, aguas superficiales, etc.), circunstancia que condiciona el diseño de la instalación de captación. Lo habitual es disponer de pozos con bombas sumergibles en el caso de las aguas subterráneas; de drenes horizontales o tomas directas en canales en el caso de drenajes agrícolas; y de impulsiones o tomas directas desde cámaras de rotura en el caso de aguas depuradas. En estos casos, la elección de la tecnología más recomendable queda completamente condicionada por la idiosincrasia de cada proyecto, ya que suele ser necesario adaptarse a las instalaciones ya existentes en la fuente de agua bruta.

En todos los casos, debe considerarse que el principal objetivo de la captación debe ser garantizar un agua bruta de la mayor calidad posible, de forma que se reduzcan las necesidad de pretratamientos, sobre todo en lo que al número y concentración de aditivos químicos se refiere.

6. Tecnologías para el pretratamiento

La función de los pretratamientos es adecuar la calidad del agua bruta a las condiciones óptimas en las membranas de OI, optimizando su funcionamiento y evitando daños en las mismas. La OI, al ser una técnica donde el agua pasa a través de una membrana, exige que los niveles de sólidos en suspensión y material orgánico (arcillas, microalgas, etc.) sean lo más bajos posibles, evitando su rápido ensuciamiento y el correspondiente descenso del factor de conversión. Se diferencia entre pretratamientos físicos y químicos, según se muestra en la Figura 5:

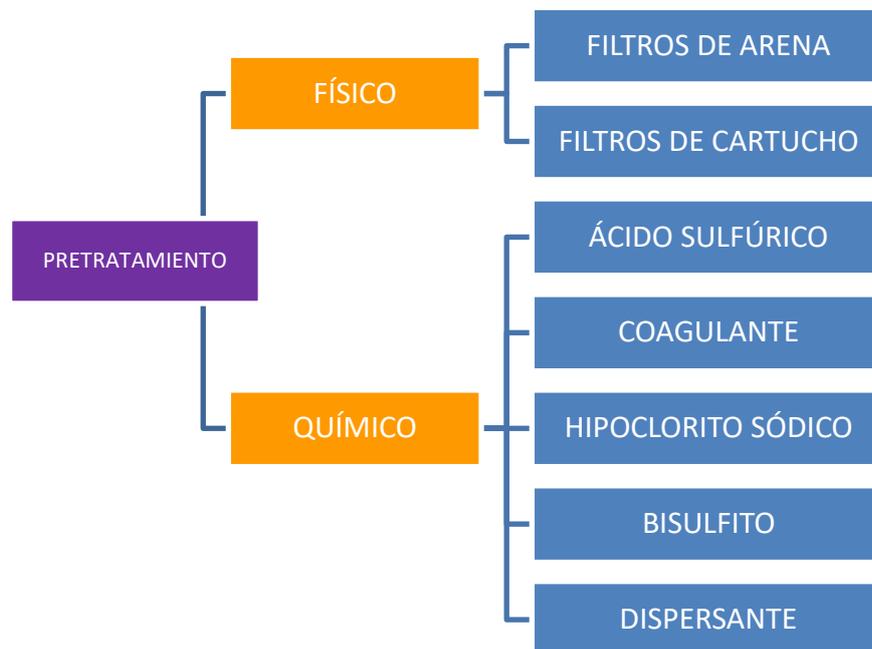


Figura 5. Tipos de pretratamientos en estaciones desaladoras.

Los **pretratamientos físicos** van encaminados a eliminar del agua partículas, grasas, elementos asociados a sólidos en suspensión, etc., es decir, básicamente aquellos componentes del agua que pueden ser separados por una barrera física, sea una membrana, un filtro u otro sistema de separación. Cuando el agua bruta presenta problemas importantes de calidad, puede ser necesario disponer en primer lugar de sistemas de desbaste, tamizado, decantación y clarificación del agua bruta. Sin embargo, lo habitual es que el sistema de captación proporcione suficiente calidad para tratarla directamente con sistemas de filtración multimedia (filtros de disco, lechos filtrantes de arena, filtros de cartucho, etc.). La configuración más habitual consiste en una primera filtración sobre lechos de arena, que se implementan en una o dos etapas, en función de la calidad del agua bruta, y en una segunda filtración con cartuchos de 5-10 μm de paso (microfiltración), que se realiza una vez se han añadido todos los reactivos del pretratamiento químico. Como alternativa a estos sistemas convencionales, las instalaciones de pretratamiento físico pueden consistir en sistemas de microfiltración (MF) o ultrafiltración (UF), que tienen la capacidad de producir un agua de mejor calidad, pero que también necesitan un filtrado físico previo a 80-150 μm y requieren de



dosificaciones químicas específicas y sistemas auxiliares, circunstancia que suele derivar en mayores costes de operación y que justifican que sea una alternativa minoritaria.

Los **pretratamientos químicos** consisten en la adición de reactivos con dos objetivos fundamentales: (i) ajustar las características del agua bruta para facilitar su pretratamiento físico y (ii) acondicionarla para reducir los riesgos químicos y biológicos en las membranas de OI, como son: ensuciamientos químicos y/o biológicos, ataque a la estructura química de las membranas, proliferación de microorganismos, precipitaciones, corrosiones, etc., y así optimizar el funcionamiento de las membranas de OI. Dentro del primer conjunto de reactivos se encuentran el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el cloruro de hierro ($FeCl_3$), que tienen una acción coagulante/floculante sobre las partículas orgánicas y minerales para facilitar su eliminación en los procesos de filtrado. En el segundo grupo de reactivos se encuentran el bisulfito sódico ($NaHSO_3$), un potente agente reductor que elimina la presencia de oxidantes y cloro en el agua bruta, y un antiincrustante, cuya finalidad es evitar la precipitación de sales en las membranas de OI, permitiendo alcanzar un mayor factor de conversión. Adicionalmente, si el agua bruta presenta microalgas o bacterias, puede ser necesaria la aplicación de un biocida, generalmente hipoclorito sódico ($NaClO$), así como algún tipo de ácido si el pH al final del pretratamiento no es adecuado.

La tendencia actual se orienta hacia una mayor inversión en sistemas de captación del agua bruta, que garantice un suministro de gran calidad y permita minimizar las necesidades de pretratamientos físicos y químicos. Cuando se consigue este objetivo, la configuración más habitual está constituida por una filtración multimedia (lechos de arena o filtros de disco + microfiltración con cartuchos) y adicción continua de antiincrustante, quedando el resto de los reactivos disponibles para su uso eventual en el caso de aparecer problemas específicos de calidad. Por tanto, aunque esta configuración es actualmente la más empleada, no se puede afirmar que sea la mejor tecnología disponible actualmente, ya que cada estación desaladora demanda pretratamientos físicos y químicos específicos, que deben determinarse mediante una campaña de análisis del agua bruta, que puede incluso requerir la construcción de un piloto en el caso de suministros con aguas complejas.

7. Tecnologías para los procesos de ósmosis inversa

En las estaciones desaladoras, la finalidad de la fase de OI es la separación del agua bruta en dos flujos, uno con menor salinidad (agua osmotizada o permeado) y otro con mayor salinidad (salmuera o rechazo), obteniendo con la máxima eficiencia y confiabilidad la calidad de agua y el caudal requeridos. La Figura 6 muestra el equipamiento empleado y la organización más actual de los distintos flujos de agua en el proceso de OI en estaciones desaladoras. Se pueden diferenciar tres procesos, con su tecnología específica:

- El bombeo de alta presión.
- La OI propiamente dicha.
- El sistema de recuperación de energía.

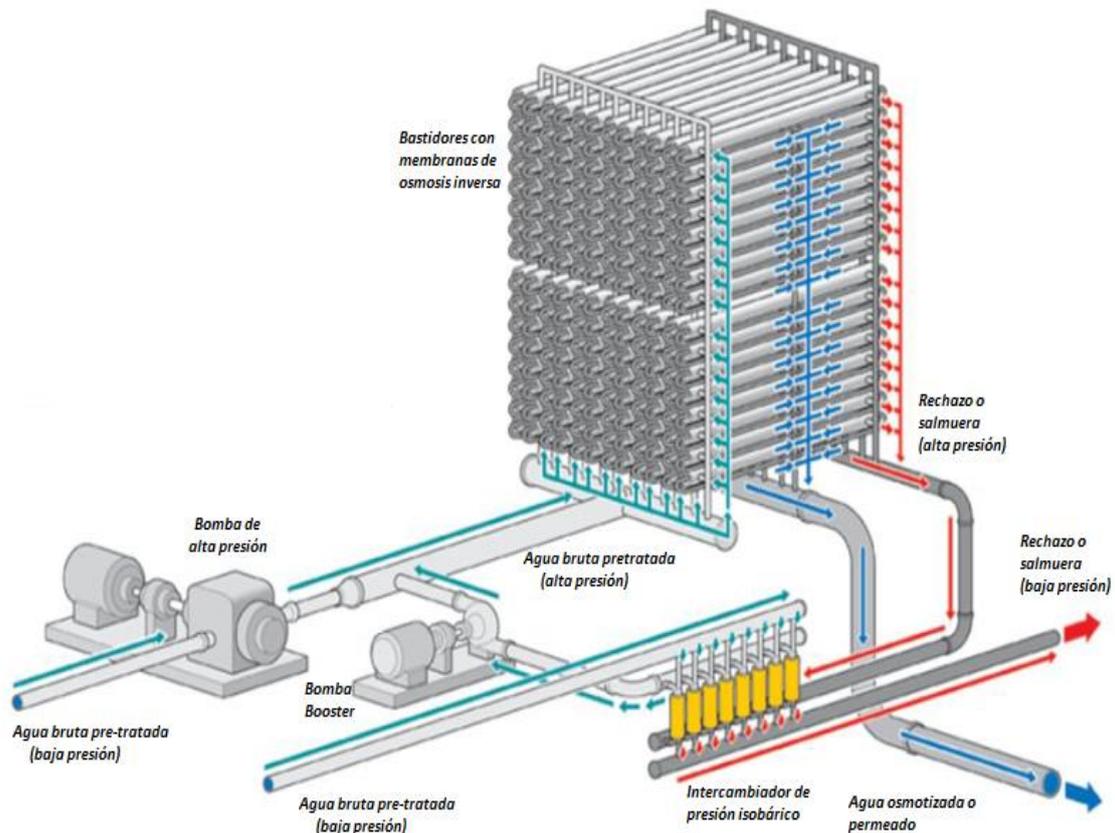


Figura 6. Esquema de funcionamiento en los procesos de ósmosis inversa. Figura adaptada de Poseidon Water (2022).

El **sistema de bombeo de alta presión** tiene el objetivo de dotar al flujo de agua bruta pre-tratada la presión necesaria para la separación de sales mediante el proceso de OI, que suele estar entre 60 y 70 bar en las EDAMs, y entre 10 y 20 bar en las estaciones desalobradoras. La mejor tecnología disponible para esta finalidad es el empleo de bombas centrífugas

multicelulares en las EDAMs, y de bombas centrífugas, generalmente de cámara partida, en desalobración.

Una vez que se ha proporcionado la presión necesaria al agua bruta pre-tratada, ésta se conduce a los bastidores con **membranas de OI**. Estos bastidores consisten en unos tubos horizontales de diámetros normalizados denominados módulos, en cuyo interior se montan las membranas de OI. La organización de las membranas de OI en módulos y bastidores facilita los procesos de limpieza y sustitución, minimizando las necesidades de espacio. Actualmente se utilizan membranas de poliamida aromática, que tienen un flujo específico de agua más elevado, una mayor retención de sales y una menor presión de operación que las membranas de acetato de celulosa utilizadas con anterioridad, por lo que disminuyen considerablemente el consumo de energía. Las poliamidas son más estables a un rango más amplio de pH pero son más susceptibles a la degradación oxidativa que provoca el cloro libre. Se manejan dos tipos de membranas de poliamida aromática en los módulos y bastidores: de fibra hueca y de arrollamiento en espiral. Las membranas de arrollamiento en espiral están conformadas por un tubo en cuyo interior se alojan varias capas de membranas planas, separadas unas de otras por un espaciador que mantiene abierto un canal de flujo para la alimentación. En el caso de membrana de fibra hueca, el agua bruta presurizada circula por fuera de las fibras mientras el filtrado circula por el interior de estas hacia el final de la fibra, donde se recoge el permeado de los miles de fibras que contiene cada una ellas. Esta tecnología contiene más superficie por unidad de volumen que las espirales, por lo que son más demandadas en plantas desalinizadoras de gran tamaño, mientras que las de arrollamiento en espiral son las comunes en estaciones de mediano y pequeño tamaño. La tecnología de membranas más recomendable actualmente en desalación es la TFC (*Thin Film Composite*), que consiste en una capa activa de poliamida reticulada densamente aromática (0.2 μm), una capa de soporte de polisulfona microporosa (40 μm), y una base de poliéster considerablemente más gruesa (120-150 μm).

Los **sistemas de recuperación de energía** tienen como objetivo recuperar la mayor parte posible de la presión residual con la que sale la salmuera, que es igual a la de aporte de la bomba de alta presión menos la pérdida de carga en los bastidores (unos 3 bares generalmente). Se trata del proceso cuya tecnología ha experimentado un mayor avance en las últimas décadas, permitiendo reducir significativamente los consumos de energía específica (kWh/m^3) en la desalación. De esta forma, se ha pasado de la utilización de bombas invertidas, al empleo de turbinas Francis o Pelton y, actualmente, a los intercambiadores isobáricos de presión, que se han convertido en el nuevo estándar en este ámbito.

Los intercambiadores isobáricos (Figura 6), de los que actualmente hay en el mercado distintos fabricantes (ERI, Dweer, RO Kinetic, iSave, ...), son dispositivos que transfieren directamente la alta presión de la salmuera al agua bruta de entrada, poniendo en contacto ambas corrientes, según se muestra en el esquema de la Figura 7.

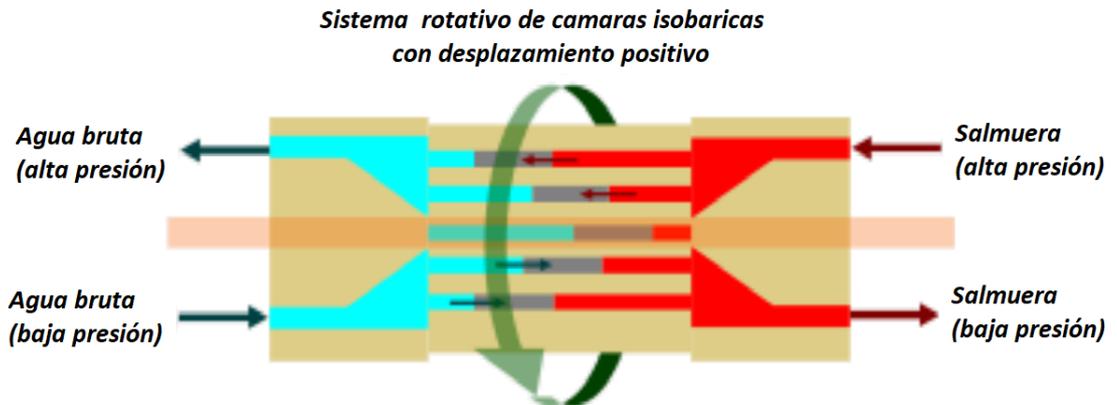


Figura 7. Esquema de funcionamiento de un intercambiador isobárico rotativo. Figura adaptada de Hmong (2022).

Entre estos sistemas, el más demandado por sus numerosas ventajas frente a los demás, es el sistema rotativo ERI-PX (Arenas Urrea, et al. 2019). Se trata de un sistema que para su funcionamiento no requiere de energía eléctrica, ni programador, ni sensores, ni válvulas, alcanzando un rendimiento del 98%, por lo que puede considerarse la mejor tecnología disponible actualmente para la recuperación de la energía de la salmuera para EDAMs. Además, requiere poco espacio para su instalación, por lo que se adapta perfectamente a la modernización de EDAMs ya existentes.

En estaciones desaladoras la presión de trabajo es generalmente muy inferior a las EDAMs, por lo que la cantidad de energía recuperable en la salmuera también es bastante más reducida. Por este motivo existen alternativas en la organización de los procesos de OI y en la recuperación de energía, no tan eficientes como los intercambiadores isobáricos, pero que presentan ventajas operativas y menores inversiones. Entre estas configuraciones, la realización de dos etapas de OI, donde la energía residual del rechazo de la segunda etapa es recuperada mediante un turbocompresor (*turbocharger*) para incrementar la presión de entrada a la segunda etapa, es una de las mejores tecnologías disponibles (Figura 8). En este caso, los *turbochargers* permiten recuperar entre el 60 y el 80% de la presión residual de la salmuera.

Como se comenta posteriormente, las dificultades administrativas para obtener un permiso de vertido para la salmuera en estaciones desaladoras está dando lugar a planteamientos donde se minimiza la generación de salmuera al 1-5% del agua bruta, para someterla posteriormente a procesos de deshidratación y obtener un residuo sólido, que sea transportable a vertedero o incluso valorizable. Este planteamiento está dando lugar a soluciones con tres o más etapas de ósmosis y varios puntos de recuperación de energía mediante turbocompresores, donde la concentración de la salmuera va aumentando hasta alcanzar valores propios de la desalación de agua marina.

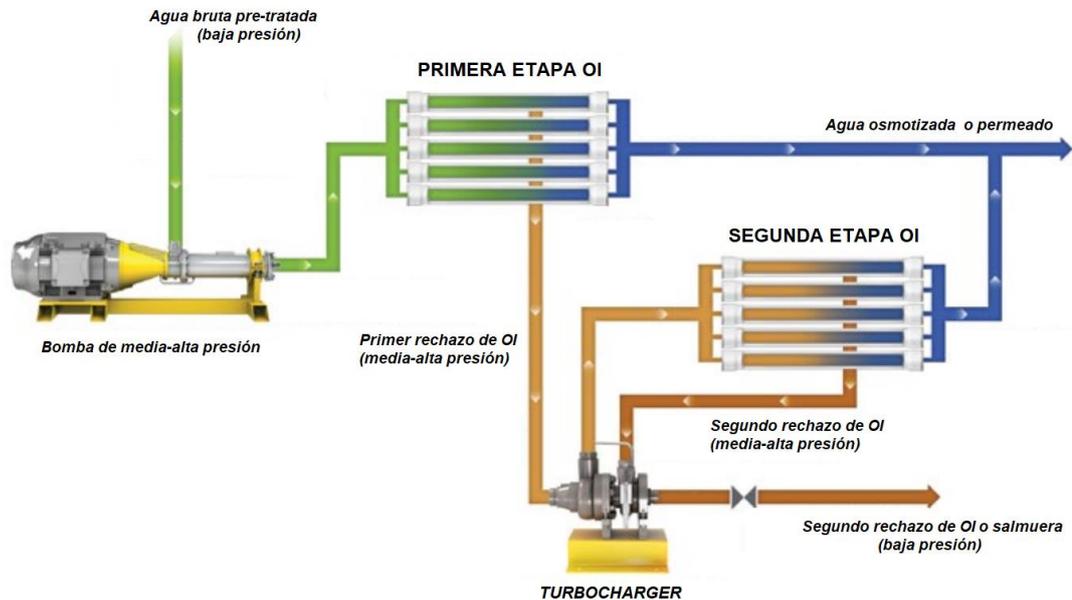


Figura 8. Esquema de funcionamiento de bastidores de ósmosis inversa para la desalobración en 2 etapas, con recuperación de energía por turbocompresor o *turbocharger*. Figura adaptada de LennTech (2022).

Por tanto, en lo que se refiere a la tecnología asociada a los procesos de OI, la mejor tecnología operativa disponible actualmente consiste en la combinación del uso de membranas de poliamida aromática TFC de alta permeabilidad, y sistemas de recuperación de energía, siendo los más recomendables los intercambiadores isobáricos rotativos para presiones propias de la desalación de agua marina (60-70 bares), y los *turbochargers* para presiones propias de la desalación de aguas salobres (10-20 bares). En el caso de las EDAMs, esta tecnología debe permitir alcanzar un consumo específico de energía en los bastidores de OI en torno a 2-2,3 kWh/m³, cifra que debería quedar por debajo de los 3-3,5 kWh/m³ al considerar el consumo de todas las fases del proceso en planta, sin considerar la impulsión final al sistema de distribución (Martínez-Álvarez et al., 2019). Para las estaciones desalobradoras no es posible fijar cifras de referencia en cuanto a consumos específicos de energía, ya que dependerán de la salinidad del agua bruta.

8. Tecnologías para los procesos de post-tratamiento

El agua que sale de los bastidores de OI (agua osmotizada) se caracteriza por tener un pH muy ácido, muy baja alcalinidad, muy baja dureza, un índice de Langelier claramente negativo y un índice de absorción de sodio elevado. Bajo estas condiciones no puede verterse a los sistemas de distribución por su alta capacidad corrosiva y de movilización de precipitados de carbonato, ni utilizarse en ninguno de los usos habituales (doméstico, agrícola o industrial) por los desequilibrios en su composición fisicoquímica. Por este motivo, el agua osmotizada se somete a post-tratamientos que permiten acondicionarla al uso a que va a ser destinada, por lo que la configuración de esta última etapa queda condicionada por dicho uso.

El post-tratamiento más importante es el de remineralización, que es necesario con independencia del uso final del agua desalinizada. La remineralización consiste en aportar sales al agua que permitan incrementar su dureza y alcalinidad, reducir su índice de absorción de sodio, y equilibrar su índice de Langelier. Hay principalmente dos procedimientos para realizar la remineralización: mediante la adición de CO_2 y una lechada saturada de hidróxido cálcico, o mediante la adición de CO_2 y el uso de lechos filtrantes de calcita, según se muestra en la Figura 9.

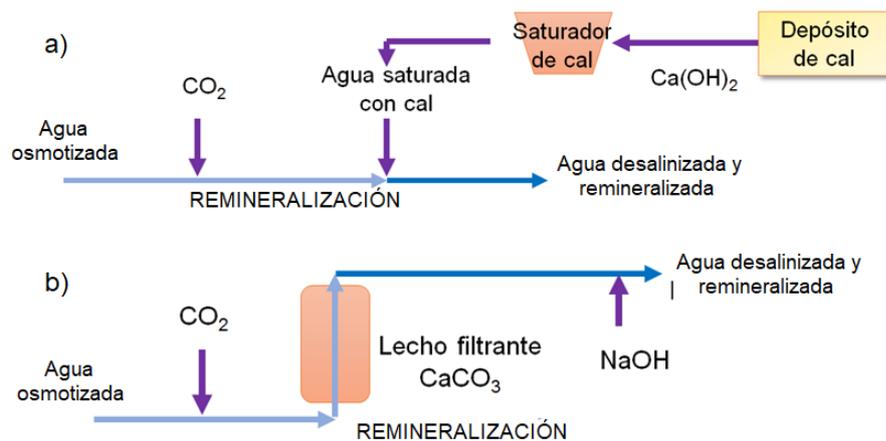


Figura 9. Principales procedimientos para la remineralización del agua osmotizada. a) con lechada de hidróxido cálcico, y b) con lechos filtrantes de calcita.

La solución tecnológica más extendida actualmente es la aplicación de lechadas de hidróxido cálcico mediante el empleo de saturadores de cal (opción a en la Figura 9), que reducen la turbidez en el agua desalinizada. Los lechos de calcitas conllevan el suministro, manejo y reparto continuo de calcita, así como ciertos riesgos de atascamiento o ensuciamiento asociados a las impurezas que pueda contener la calcita, por lo que su operación resulta más compleja que el suministro y manejo de hidróxido cálcico.

En el caso de que el uso final del agua desalinizada sea el riego agrícola, el control de la concentración de boro (B) en el agua producto también puede ser objeto de un post-tratamiento específico. La concentración de B en el agua marina desalinizada se ha limitado tradicionalmente a 1 mg/L, que era el valor máximo según el Real Decreto 140/2003, por el que se establecían los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Este

valor se mantuvo en el Real Decreto 902/2018, pero ha sido recientemente elevado en el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro, quedando actualmente el valor máximo en 1,5 mg/L, excepto cuando en el origen total del agua sea de transición o costera y el tratamiento de potabilización sea de desalación o bien en zona de abastecimiento que tengan captaciones en aguas subterráneas cuyas condiciones geológicas puedan provocar niveles elevados de boro, casos en los que se aplicará un valor máximo de 2,4 mg/L. Sin embargo, esta concentración de B puede resultar fitotóxica para los cultivos más sensibles (Martínez-Alvarez et al., 2016), por lo que es recomendable disminuir su concentración hasta valores en torno a 0,5 mg/L. Los cultivos más sensibles a una elevada concentración de B son los cultivos leñosos, especialmente los cítricos (naranja, mandarina y limonero) y los frutales de hueso (albaricoquero, melocotonero y almendro), por lo que en las plantas desaladoras que abastezcan zonas regables con presencia de estos cultivos deberían implementarse un post-tratamiento para reducir su contenido en el agua producto. Esta circunstancia se ha producido en varias EDAMs del sureste español, donde el agua producto se destina mayoritariamente al riego de zonas con abundancia de cítricos, como las EDAMs de Torre Vieja y Águilas, que disponen de tecnología para poder limitar la concentración de B en el agua producto a 0,5 mg/L (CEDEX, 2021). Concretamente, la tecnología aplicada actualmente consiste en hacer pasar una fracción del agua osmotizada por un segundo paso de OI, empleando membranas especialmente selectivas con el B, de forma que su concentración se reduzca hasta prácticamente 0 mg/L. Esta fracción de agua sometida a un 2º paso por membranas se mezcla con el agua osmotizada procedente del primer paso, en una proporción adecuada para ajustarse a la concentración final de boro de 0,5 mg/L. La fracción de agua tratada en un segundo paso de OI es variable, ya que hay distintas variables (la temperatura del agua bruta o el pH) que condicionan el nivel de selectividad de las membranas en la separación del B.

En el caso de que el uso final del agua desalinizada sea el suministro doméstico, también resulta necesario aplicar un post-tratamiento desinfectante, con el fin de garantizar el correcto estado sanitario del agua a lo largo del sistema de distribución. Este tratamiento consiste en la aplicación de productos biocidas, generalmente compuestos clorados. Este tratamiento no resulta necesario en los suministros agrícolas, donde el proceso de OI ya garantiza la ausencia de virus y bacterias en el agua producto, y donde la presencia de compuestos clorados puede resultar en problemas de fitotoxicidad en cultivos sensibles.

En plantas desaladoras para suministro agrícola puede plantearse una alternativa de post-tratamiento a las mencionadas anteriormente, que es la mezcla del agua osmotizada con una pequeña fracción (5-15%) de agua salobre bruta o pretratada. Esta alternativa resulta muy interesante cuando la salinidad del agua bruta procede principalmente de cationes divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+}) y aniones como el bicarbonato (HCO_3^-) y el sulfato (SO_4^{2-}), ya que en estos casos se pueden corregir los problemas de pH, dureza, alcalinidad, índice de Langelier, del agua osmotizada manteniendo unos niveles de salinidad aceptables para el riego agrícola. Sin embargo, cuando la salinidad del agua bruta procede principalmente de los iones Cl^- y Na^+ , circunstancia frecuente en las zonas litorales, esta alternativa de post-tratamiento sólo



conseguirá incrementar la salinidad del agua producto y su concentración en iones perjudiciales para el desarrollo de los cultivos.

Finalmente, tras el post-tratamiento, el agua desalinizada es almacenada y/o entregada a los usuarios mediante los depósitos, balsas, impulsiones y demás sistemas hidráulicos necesarios para satisfacer los requerimientos del punto de entrega.

9. Tratamiento y gestión de las salmueras

En el campo de la desalación, se entiende por salmuera el rechazo o concentrado procedente del proceso que contiene las sales extraídas del sistema. Las características de las salmueras dependen básicamente de: (i) el origen y las características físico-químicas del agua bruta, (ii) la conversión del sistema, (iii) la tecnología utilizada y factores de operación como la temperatura, que influye en la cantidad y tipo de sales que pasan al agua producto y en las que quedan en el rechazo, y (iv) los efluentes tratados de las operaciones realizadas en la propia desaladora (agua de lavado de filtros, productos químicos de limpieza de membranas, etc.).

En general, la salmuera de una EDAM es básicamente agua de mar concentrada con aproximadamente el doble de su salinidad, pues la conversión típica de plantas costeras ronda el 45-50%, más trazas de los productos químicos utilizados en el pretratamiento (especialmente antiincrustante) y los caudales procedentes de la estación de tratamiento de los distintos efluentes generados en la planta. Por lo tanto, el vertido de la salmuera de una EDAM al mar no debe representar un problema desde el punto de vista ambiental si se realiza de forma adecuada, con una dilución previa, los preceptivos estudios de impacto ambiental durante la fase de diseño y construcción, y el seguimiento ambiental periódico del medio receptor para realizar acciones correctoras si fuesen necesarias. Sin embargo, este no es el caso de la salmuera generada en estaciones desaladoras, cuya localización puede estar alejada del litoral, y para la cual todavía no existe un modelo general de gestión sostenible y económicamente viable, circunstancia por la que su tratamiento y gestión dependerá de la idiosincrasia de cada actuación. Las aguas salobres pueden tener diversa composición fisicoquímica en función de su origen, y además variar significativamente a lo largo de la explotación de la planta, por lo que la salmuera generada en las plantas desaladoras puede presentar características muy diversas, con problemáticas y modelos de gestión singulares para cada caso de estudio. Adicionalmente, la posible presencia de elementos tóxicos o contaminantes en el agua bruta, que pasarán al rechazo y serán concentrados tras el proceso, podría generar una problemática de difícil solución con estos vertidos. Incluso en estaciones desaladoras costeras, las características de la salmuera pueden ser muy diferentes a las características del agua del mar y dificultar en este sentido su vertido. Un claro ejemplo es la elevada presencia de nutrientes como nitratos en las aguas salobres generadas en zonas regables, o la de fosfatos en las aguas regeneradas salobres, que pueden favorecer procesos de eutrofización y, por lo tanto, el deterioro de las masas de agua receptoras. Estas condiciones pueden incluso hacer inviables algunos proyectos de desalación ante la imposibilidad de planificar y ejecutar sistemas de gestión de salmueras eficientes, sostenibles y económicamente viables.

Con el fin de abordar la problemática de la elevada presencia de nutrientes en las salmueras procedentes de la desalación de aguas con elevadas concentraciones de nitratos (aguas subterráneas y drenajes agrícolas generalmente), existen una serie de tecnologías para su desnitrificación. Entre ellas destacan, por su capacidad de adaptación al tratamiento de grandes caudales de salmuera y prácticamente nulo consumo de energía, los biorreactores con

distintos tipos de biomasa como fuente de carbono para los microorganismos nitrificantes. Entre ellos, cabe destacar (UPCT, 2018) los que utilizan como biomasa astillas de madera u otros materiales ligno-celulósicos de escaso coste y procedentes de rechazo de otras actividades (paja, restos de podas, etc.). Otras tecnologías para la desnitrificación, más habituales en el ámbito de la depuración de aguas residuales, son los reactores por lotes de secuenciación con metanol como sustrato de carbono para microorganismos desnitrificadores, reactores de manto de lodos de flujo ascendente, biorreactores de membrana, reactores absorbentes de lecho fluidizado y electrodiálisis, etc. Sin embargo, cabe mencionar que no se han encontrado referencias de la aplicación de estas técnicas en estaciones desalobradoras a la escala de las que se consideran en este informe, por lo que deben considerarse tecnologías aún en proceso de investigación y desarrollo.

Respecto al vertido de la salmuera al mar, hay que considerar que debido a la concentración en los procesos de OI, la densidad de la salmuera es más elevada que la de la propia agua de mar, lo que provoca que tenga tendencia a permanecer en el fondo marino. Las salmueras pueden por lo tanto afectar al medio marino modificando el pH del agua, el oxígeno disuelto, la concentración de materia orgánica, los sólidos en suspensión o nutrientes, etc. Por lo tanto, su vertido se encuentra condicionado a la implementación de medidas que favorezcan su dilución y dispersión.

Las alternativas para la gestión y valorización de salmueras pasan principalmente por: (i) la descarga de las salmueras en masas de agua, (ii) la concentración de salmueras y (iii) la valorización de salmueras (Zarzo et al. 2017).

Respecto a la **descarga de las salmueras en masas de agua**, la práctica totalidad de las EDAMs vierten sus salmueras al mar. Estas descargas requieren estudios de impacto ambiental, de fondo marino, de las corrientes marinas, del estado fisicoquímico del agua, de temperatura, etc., al objeto de determinar el punto de descarga más adecuado y con menor impacto. Además, los vertidos requieren estudios técnicos basados en modelos matemáticos, como por ejemplo Cormix, para determinar la dilución y dispersión necesarios al objeto de evitar daños medioambientales. De esta forma se puede analizar el efecto sobre ecosistemas sensibles, como las praderas de Posidonia oceánica, de gran importancia ecológica en la costa mediterránea. Diversos estudios indican que esta especie se ve afectada cuando los valores de salinidad son inferiores a 29 g/L y/o superiores a 40 g/L (Fernandez-Torquemada and Sanchez-Lizaso, 2005). En el caso de las estaciones desalobradoras también la mayor parte de las salmueras son descargadas al mar o a masas de aguas continentales, mayoritariamente superficiales, e incluso directamente a sistemas de saneamiento. Otra de las posibles alternativas para la descarga de salmueras (principalmente para instalaciones de interior) es la inyección en acuíferos profundos, práctica está muy extendida en países como Estados Unidos, aunque no es posible en España.

La **concentración de salmueras** tiene como objetivo obtener una salmuera lo más concentrada posible con el fin de reducir su volumen y facilitar su gestión. Los métodos disponibles para concentrar las salmueras son (i) incrementar la conversión del sistema para producir más agua

producto a partir de la misma cantidad de agua bruta, incluso con pasos adicionales por membranas semipermeables, aunque esta conversión se encuentra limitada químicamente por las sales insolubles que precipitan en el sistema cuando se supera su producto de solubilidad, y (ii) la concentración por evaporación, mediante el empleo de energía artificial (evaporadores industriales) o natural (balsas de evaporación pasiva o forzada mediante aspersores).

La **valorización de salmueras** es sin duda el destino más conveniente desde cualquier punto de vista: ambiental, económico o técnico. Esta valorización puede realizarse mediante (i) valorización de la salmuera en las propias desaladoras, (ii) usos potenciales de las salmueras, y (iii) uso de tecnologías emergentes. La valorización de la salmuera en las propias desaladoras se refiere al aprovechamiento de su energía residual mediante sistemas de recuperación de energía (ya tratados en el Epígrafe 6), a su uso en tratamientos de limpieza, y a la producción de productos químicos in-situ. Los usos potenciales de las salmueras se refieren a su conversión en productos o subproductos, como la obtención de sales mediante la evaporación natural o extracción con disolventes orgánicos, la obtención de productos de valor económico como la fabricación de hipoclorito sódico, la alimentación de especies acuáticas como la Tilapia o algas extremófilas como la *Spirulina* en acuicultura, la conversión en suplementos alimenticios para el ganado, o aplicaciones medioambientales mediante su empleo en humedales, canales y como recarga de acuíferos, entre otros. Estos usos se encuentran actualmente bajo estudio e investigación. Finalmente, se podrían usar con distintos fines mediante tecnologías emergentes como la *forward osmosis*, la pervaporación, la destilación de membrana, la desionización capacitiva, las membranas biomiméticas, las acuaporinas, las células de combustible microbianas, la bioelectrogénesis, la electrodiálisis metátesis o la electrodiálisis con membranas bipolares. Sin embargo, estas tecnologías se encuentran todavía en fase de investigación o no han conseguido pasar de las fases de pilotaje o desarrollo de prototipos.



10. La desalobración como tratamiento en estaciones de regeneración de agua

En España la reutilización de las aguas regeneradas en Estaciones de Regeneración de Agua (ERAs) se encuentra regulada por el Real Decreto 1620/2007. Este Decreto, en su Anexo I, expone los criterios de calidad para la reutilización de las aguas según sus usos: urbanos, agrícolas, industriales, recreativos y medioambientales. A partir del 26 de junio de 2023 será aplicable a toda Europa el Reglamento (UE) 2020/741 del parlamento europeo y del consejo, el cual en su Anexo I expone los posibles usos y sus requisitos mínimos. Es importante destacar que ambas normativas se basan principalmente en aspectos microbiológicos como presencia de *E-coli*, nematodos intestinales y otros parámetros físicos como DBO₅, sólidos en suspensión o turbidez. Sin embargo, a parte de estos parámetros, los reglamentos no definen otras características importantes para que el agua pueda ser destinada de una forma sostenible al riego agrícola, como por ejemplo su conductividad eléctrica. La infiltración de agua de mar en los colectores de saneamiento que abastecen las Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) costeras es un fenómeno frecuente que hace que las aguas residuales a la entrada de la EDAR tengan niveles de conductividad eléctrica elevados, que pueden alcanzar hasta 5 ó 6 dS/m. Las EDAR convencionales eliminan la materia orgánica y los sólidos en suspensión de las aguas residuales, pero no las sales, por lo que la desalobración de estas aguas regeneradas salobres es una cuestión de creciente interés para su reutilización en la agricultura.

Regar con agua con elevada salinidad no es agrónomicamente viable pues se ha demostrado que, el rendimiento de los cultivos se encuentra estrechamente relacionado con la salinidad del suelo y la del agua de riego (Maas y Hoffman, 1977) de modo que una vez se sobrepasa un umbral de salinidad específico para cada cultivo, el rendimiento disminuye de forma cuasi-lineal con la salinidad. Adicionalmente, el riego con aguas de elevada salinidad provoca el incremento de salinidad de los suelos y su deterioro agronómico. La Tabla 1 presenta el modelo más extendido para estimar el rendimiento de los cultivos en función de la salinidad del suelo o del agua de riego, así como los valores umbrales de salinidad y la pendiente de la reducción de rendimiento para varios cultivos representativos del regadío mediterráneo.

Por lo tanto, el agua regenerada producida en las EDAR y ERA costeras puede requerir un tratamiento específico de desalación para su uso agrícola si presenta una elevada conductividad eléctrica y limita significativamente la productividad de los cultivos de regadío. Este tratamiento es similar al que se implementa en las plantas desalobradoras para la reducción de la salinidad mediante procesos de OI (Shtull-Trauring et al., 2020). Además, los tratamientos de OI permiten obtener un agua completamente regenerada pues son capaces de eliminar todos los virus y bacterias presentes en el agua depurada, según se muestra en la Figura 10. Por lo tanto, permiten obtener un agua que se ajusta de forma satisfactoria a los criterios de calidad establecidos tanto por el Real Decreto 1620/2007 como por el nuevo Reglamento Europeo 2020/741.

Tabla 1. Rendimiento de cultivos en función de la salinidad del suelo o de la salinidad del agua de riego. Valores adaptados de Maas y Grattan (1999) and Ayers y Westcot (1985).

Cultivo	Función (Ec.1)		$Y_r = 100 - b (EC_{e\ o\ a} - a)$	
	Umbral		Pendiente ^b	
	CE_e^a	CE_a^a	CE_e^a	CE_a^a
	dS/m		‰/(dS/m)	
Melón	2,2	1,5	7,1	10,9
Lechuga	1,3	0,9	13,2	20,8
Limonero	1,7	1,1	12,8	24,2
Naranja	1,7	1,1	16,7	21,7
Melocotonero	1,7	1,1	21,0	31,8
Tomate	2,5	1,7	10,0	14,7
Pimiento	1,5	1,0	13,9	20,8

^a CE_e y CE_a hacen referencia a la conductividad eléctrica del extracto de saturación y del agua de riego, respectivamente.

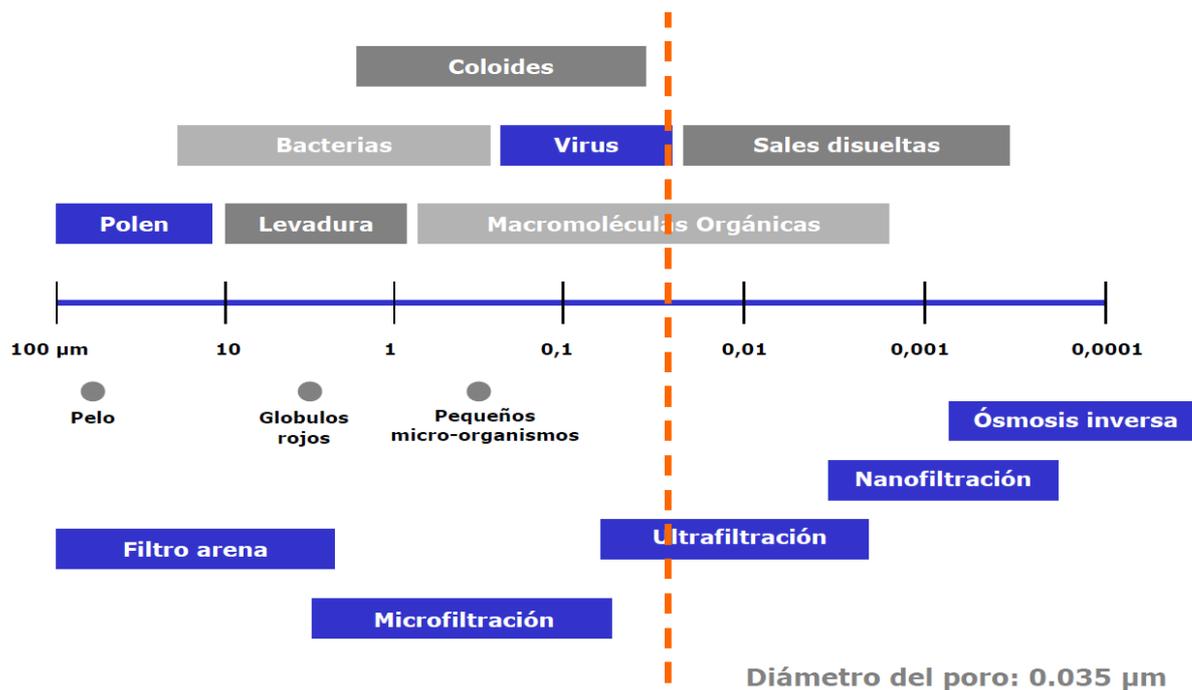


Figura 10. Microorganismos retenidos según diferentes filtraciones.



11. Evaluación tecnológica de las propuestas del Plan (Fase II)

11.1. Proyecto complementario a la modernización de regadíos de la Comunidad de Usuarios de Sierra de Gádor. Término municipal de El Ejido, sectores 1, 2, 3, 4 y 5 (Almería)

Comunidad de Usuarios	Comunidad de Usuarios Acuíferos Sierra de Gádor
Provincia	Almería
Términos municipales afectados	El Ejido, Dalías, La Mojonera y Vícar
Origen del agua	<ul style="list-style-type: none"> • Aguas continentales subterráneas de pozos (sondeos en acuífero inferior occidental). • Aguas continentales que afloran en la Balsa del Sapo (acuífero superior central).
Superficie total de la Comunidad	9.000 ha
Superficie afectada por la actuación	2.500 ha
Infraestructuras necesarias	<ul style="list-style-type: none"> • Infraestructura de acondicionamiento de agua (desalobrador). • Elementos de distribución y almacenamiento de agua. • Producción de energía fotovoltaica. • Complementación del sistema de telegestión con la digitalización de todos los elementos. • Otras actuaciones.
Presupuesto estimado de la actuación	15.900.000 € (IVA no incluido).
Descripción detallada de la actuación, objetivo y justificación	
<p>La Comunidad de Usuarios de los Acuíferos de la Sierra de Gádor está compuesta por 57 comunidades base, con una superficie en torno a las 9.000 ha y cerca de 4.500 comuneros. La ubicación de los aprovechamientos mediante sondeos se encuentra tanto en el acuífero inferior occidental como en el acuífero superior central. Desde el año 2007 se están llevando a cabo actuaciones de modernización de regadíos en la Comunidad.</p> <p>Actualmente el uso del acuífero superior central está muy limitado debido a la baja calidad agronómica de su agua (alta conductividad), por lo que se están focalizando las extracciones en el acuífero inferior occidental. La actuación pretende recuperar el uso de este acuífero mediante un tratamiento de acondicionamiento (desalobración), que adecúe las aguas de la Balsa del Sapo (surgencia del acuífero superior central) al riego agrícola.</p> <p>El objetivo principal de esta actuación es, por tanto, reducir el volumen de extracción del acuífero inferior occidental, complementando la demanda hídrica de la Comunidad de Usuarios con el agua</p>	



acondicionada del acuífero superior central. No se modifica el volumen anual aportado a los regantes, pero, al reducir la presión extractiva del acuífero inferior occidental, se favorece su recuperación gracias a la utilización de aguas no convencionales (aguas del acuífero superior central desalobradas).

Para posibilitar el empleo del agua del acuífero superior, se han previsto las siguientes infraestructuras:

- Infraestructura de acondicionamiento de agua: planta desalobradoradora.
- Elementos de distribución y almacenamiento de agua: se prevé la ejecución de 4 balsas (recepción de agua bruta procedente de pozos, impulsión de agua tratada, balsa de salmuera previa a la cristalización y balsa de acumulación de agua en cota elevada) y 7 estaciones de bombeo (conexión de las balsas con la planta desalobradoradora y conexiones entre las balsas).
- Producción de energía: se plantea la construcción de 6 plantas fotovoltaicas. Las dos primeras de placas solares con seguidores, la de mayor tamaño (7.000 kWp) para la planta desalobradoradora, y la de menor (3.500 kWp) para la cristalización de la salmuera. Las restantes 4 plantas se plantean sobre módulos flotantes en las balsas A-1, A-2, A-4 y A-7, con capacidades de 150 kWp, 305,1 kWp, 540 kWp y 450 kWp respectivamente.
- Complementación del sistema de telegestión con la digitalización de todos los elementos.
- Otras actuaciones: cerramientos de las parcelas de los embalses, cubiertas flotantes en las balsas y nave de mantenimiento.

Los datos técnicos de la actuación se muestran a continuación.

Datos generales	
Ubicación (municipio)	El Ejido
Descripción general de la actuación	Planta desalobradoradora para regeneración del agua procedente de sondeos del acuífero superior con una capacidad de producción de 30.000 m ³ /día para tratar un volumen total de 10,2 hm ³ /año.

Agua bruta	
Origen del agua	Aguas recogidas en la denominada Balsa del Sapo, con origen en escorrentía superficial y posibles filtraciones/drenaje del terreno.
Conductividad eléctrica (dS/m)	4,08
Nitratos (mg/L)	64

Datos generales de diseño y explotación	
Capacidad de producción (m ³ /día)	30.000



Producción máxima agua producto (hm³/año)	10,2
Potencia total instalada (MW)	10,0
Consumo de energía específico (sin contar distribución) (kWh/m³)	1,15
Consumo de energía específico en distribución (kWh/m³)	0,50
Consumo de energía específico en ósmosis inversa (kWh/m³)	0,652
Tecnología de producción eléctrica o suministro eléctrico	Conexión a red y fotovoltaica
Porcentaje de autoconsumo por generación propia de energía renovables (%).	98

Características tecnológicas de la planta	
Tipo y tecnología de captación de agua bruta	Captación de sondeos a embalse de agua bruta cubierto
Tecnología/s de pretratamiento	Tratamiento ozono, filtro de arena, ultrafiltración y filtro de cartucho previo a la ósmosis inversa.
Tecnología de desalación y configuración (pasos/etapas)	Ósmosis inversa en seis etapas, organizadas en tres líneas de ósmosis de dos etapas cada una, donde la segunda etapa aprovecha la energía residual de la salmuera del bloque con un turbocompresor, con el fin de conseguir la optimización del proceso y el aprovechamiento de la presión residual.
Factor de conversión total (% agua producto):	97,5%
Tipo de membrana de OI	Poliamida aromática
Presión de trabajo en bastidores de OI (bar)	1ª línea y 1ª etapa: 10 bar 1ª línea y 2ª etapa: 12,3 bar 2ª línea y 1ª etapa: 22,7 bar 2ª línea y 2ª etapa: 32,9 bar 3ª línea y 1ª etapa: 42,1 bar 3ª línea y 2ª etapa: 65,1 bar
Tecnología de recuperación de energía en OI y eficiencia	1ª línea: turbocompresor con rendimiento 72,2% 2ª línea: turbocompresor con rendimiento 68,1% 3ª línea: turbocompresor con rendimiento 60,0%
Tecnología de remineralización	Mezcla con aguas previamente desinfectada con



	ozono.
Tecnología de desinfección, si procede	Ozono
Características del agua producto tras la remineralización	
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	657
Características de la salmuera	
Tipo de tratamiento que se da a la salmuera y/o lugar de destino	Cristalización para usos diverso. La salmuera de la planta de tratamiento se convierte en un producto valorizable, que se estima en 108 toneladas de sal al día.
Informe técnico sobre la actuación	
<p>La principal instalación que se propone en esta actuación es la construcción de una nueva planta desalobradoradora mediante OI, con una capacidad de 30.000 m³/día (equivalente a 10,2 hm³/año), siendo el resto de las actuaciones (balsas de regulación, impulsiones, elementos de telegestión y otras actuaciones menores) obras complementarias necesarias para integrar en el sistema de distribución de la Comunidad de Usuarios de Sierra de Gádor los nuevos recursos generados en la planta desalobradoradora. Además, se plantea la construcción de 6 plantas fotovoltaicas capaces de satisfacer el 98% del consumo eléctrico necesario para el funcionamiento de la actuación.</p> <p>En la planta desalobradoradora, se propone la utilización de los actuales sondeos del acuífero superior central (Balsa del Sapo) para la captación del agua bruta, una solución que ha funcionado satisfactoriamente con anterioridad. Para el pretratamiento se propone una primera etapa de desinfección con ozono, que se justifica por presentar la fuente de agua (acuífero superior central) afloramientos superficiales de agua prácticamente estancados (Balsa del Sapo), donde la presencia de material orgánico se prevé abundante. El pre-tratamiento se complementa con una filtración multimedia constituida por filtro de arena + ultrafiltración + filtro de cartucho. Se trata de una tecnología ampliamente extendida que garantiza tanto el adecuado tratamiento del agua bruta antes del proceso de OI como la protección de las membranas. Por lo tanto, el sistema de captación y pretratamiento del agua bruta se considera bien adaptado a la singularidad del proyecto, considerándose una solución tecnológica adecuada.</p> <p>Las tecnologías propuestas para la desalobración y el tratamiento de la salmuera son especialmente innovadoras. La actuación pretende alcanzar un factor de conversión global del 97,5%, para lo que plantea un sistema de OI con seis etapas, organizadas en tres líneas de dos etapas cada una, de forma que en cada línea la energía residual de la salmuera se recupera mediante un turbocompresor que alimenta la segunda etapa. Por tanto, se disponen tres</p>	



turbocompresores con una eficiencia en la recuperación de la energía del 72,2% (1ª línea), 68,1% (2ª línea) y 60,0% (3ª línea). Como se ha indicado, se trata de un sistema muy innovador que se ve favorecido por la relativamente baja conductividad del agua bruta (4,08 $\mu\text{S}/\text{cm}$), de forma que se va incrementando la concentración de sales en la salmuera y consecuentemente la presión requerida en el proceso, de 10 bar en la 1ª etapa hasta los 65,1 bar en la última, donde se trabaja con presiones y salinidades propias de la desalación de agua marina. Esta configuración, junto al empleo de membranas de poliamida aromática, es una propuesta que optimiza el consumo energético específico (0,625 kWh/m³ en el proceso de OI) en esta actuación y, consecuentemente, minimiza las emisiones de gases de efecto invernadero, considerándose plenamente satisfactoria desde el punto de vista tecnológico. La incorporación de seis plantas solares fotovoltaicas, capaces de satisfacer hasta el 98% del consumo eléctrico de la actuación, representa una medida adaptativa que persigue el desarrollo del proyecto con el menor perjuicio posible sobre los objetivos de mitigación y adaptación al cambio climático.

El volumen de salmuera producido se consigue reducir al 2,5% del agua bruta, alcanzando los 770 m³/día, y será sometida a un proceso de cristalización mediante el aporte de energía para la vaporización del agua, de forma que se prevén obtener unas 108 toneladas de producto valorizable (sal) al día. Esta propuesta tecnológica es plenamente satisfactoria, ya que evita el vertido de la salmuera al medio, una salmuera en la que se espera una elevada concentración de nitratos al provenir el agua bruta con escorrentías superficiales y drenajes agrícolas. Además, la energía necesaria para el proceso de cristalización se aporta por una de las 6 plantas fotovoltaicas que incluye la actuación.

Para el post-tratamiento se propone la mezcla con parte de agua bruta, previamente desinfectada con ozono, lo que redundará en un coste específico (€/m³) más reducido del agua producto, solución que se considera idónea siempre que haya un correcto control del porcentaje de mezcla en función de las características del agua osmotizada y el agua bruta. Por tratarse de una zona regable con cultivos hortícolas fundamentalmente, no se considera necesario realizar un tratamiento específico para el control de la concentración de boro en el agua producto, circunstancia que tampoco ha sido considerada en el proyecto.

En resumen, se puede concluir que la planta desaladora incluida en esta actuación considera tecnologías adecuadas para cada uno de los procesos implicados, siendo la tecnología de desalación seleccionada (OI con seis etapas, organizadas en tres líneas de dos etapas cada una, de forma que en cada línea la energía residual de la salmuera se recupera mediante un turbocompresor) la mejor opción tecnológica operativa disponible, ya que garantiza unos consumos energéticos específicos reducidos y genera unos volúmenes de salmuera muy reducidos (2,5% del agua bruta). El proceso de cristalización propuesto para las salmueras resulta especialmente innovador, evitando la necesidad de tratamientos de desnitrificación y el posterior vertido de la salmuera. El residuo sólido generado (sal) puede ser valorizable, aunque los flujos productivos (> 100 toneladas/día) parecen difícilmente asimilables a escala local. La incorporación de seis plantas fotovoltaicas con una capacidad similar a los requerimientos del proyecto favorece su desarrollo con el menor perjuicio posible sobre los objetivos de mitigación y adaptación al cambio climático.



11.2. Proyecto de modernización y mejora del regadío en la Zona Centro Sur de Fuerteventura, TT.MM. De Tuineje y Pájara, Isla de Fuerteventura (Las Palmas de Gran Canaria)

Comunidad de Usuarios	Regadío en la zona centro sur de Fuerteventura
Provincia	Las Palmas de Gran Canaria
Términos municipales afectados	Tuineje y Pájara (Fuerteventura)
Origen del agua	Agua marina
Superficie total de la Comunidad	1.154 ha
Superficie afectada por la actuación	1.154 ha
Infraestructuras necesarias	<ul style="list-style-type: none">• Parque fotovoltaico.• Módulo de desalación en la EDAM de Gran Tarajal.• Depósito de agua producto.• Estación de bombeo y tubería de impulsión para elevar el agua desalada hasta el depósito de Mazacote y la balsa de Tesejerague.• Red de riego en la zona de Mazacote (primer escalón de impulsión).• Red de riego en la zona de Tesejerague (segundo escalón de la impulsión).
Presupuesto estimado de la actuación	13.250.000 € (IVA no incluido).
Descripción detallada de la actuación, objetivo y justificación	
<p>Este proyecto representa una actuación integral de modernización en los regadíos de la zona centro sur de Fuerteventura, que incluye desde actuaciones en las infraestructuras para la generación de los recursos a partir de agua marina, hasta las impulsiones y redes de distribución de agua para el transporte y distribución del agua desalinizada entre los regantes, considerando también la instalación de una planta fotovoltaica para el suministro eléctrico.</p> <p>La procedencia actual del agua riego en la zona es muy variada, aunque predomina el abastecimiento desde pozos privados (muchos de ellos con plantas desaladoras individuales), y el suministro de agua de mar desalada a través de la red pública de abastecimiento urbano. La mayor parte de los pozos tradicionales se han secado por lo que ha sido preciso realizar sondeos más profundos y por tanto con mayor intrusión salina, de forma que el suministro es cada vez de peor calidad y ya se hace imprescindible el uso de pequeñas plantas desaladoras privadas para su aprovechamiento. La gestión y vertido de estas salmueras es una cuestión compleja que puede ocasionar problemas ambientales y conviene minimizar. Ante esta situación, se plantea garantizar el suministro hídrico a la zona regable mediante la implementación de un módulo de desalación en la EDAM de Gran Tarajal, con una capacidad de producción de agua desalada de 2.500 m³/día. Este módulo se abastecerá desde la cantara existente actualmente en la EDAM mediante dos nuevas bombas, que impulsarán el agua bruta hasta el pretratamiento mediante filtros de arena y de cartuchos. Las bombas de alta</p>	



presión enviarán el agua pretratada a los bastidores de OI para, finalmente, someter el agua osmotizada al proceso de remineralización previo a su distribución.

Además, el proyecto incluye numerosas obras hidráulicas para el transporte y distribución del agua desalada, que son las siguientes:

- Instalación de un parque fotovoltaico de 25.000 m², asociado al módulo de desalación. Esta instalación generará la energía necesaria en el proceso de desalación y la posterior impulsión a los depósitos de almacenamiento. Se ubicará a 1,5 kilómetros de la EDAM de Gran Tarajal.
- Construcción de un depósito de agua producto. Se construirá un depósito de agua producto de hormigón armado de 500 m³ de capacidad para el almacenamiento del agua desalada correspondiente a 4 horas de producción, con el objeto de tener margen de maniobra ante una posible avería o actividad de mantenimiento. Este depósito se ubica contiguo a la EDAM de Gran Tarajal.
- Construcción de una nueva estación de bombeo y tubería de impulsión para llevar el agua desalada hasta el Depósito de Mazacote (ya construido) y la Balsa de Tesejerague (incluida en el proyecto). Para impulsar el agua desalada desde el depósito de agua producto se construirá una estación de bombeo, que albergará un sistema 1+1 de bombas, con variador de frecuencia, capaces de cubrir los dos escalones de presión (Mazacote y Tesejerague). La tubería de impulsión parte desde la nueva estación de bombeo (cota +15) hasta la arqueta de rotura de la balsa de Tesejerague (cota +225). En las inmediaciones del Depósito de Mazacote (cota +120), se realizará una derivación hacia el mismo. De esta forma, mediante telecontrol y el uso del variador de frecuencia realizará el llenado de ambos almacenamientos usando la misma tubería de impulsión y estación de bombeo.
- Instalación de la red de riego en la zona de Mazacote (primer escalón de impulsión, con origen en el Depósito de Mazacote), y en la zona de Tesejerague (segundo escalón de impulsión, con origen en la Balsa de Tesejerague). Desde el Depósito de Mazacote y la nueva Balsa de Tesejerague se implantan sendas redes de riego independientes para cada uno de los escalones hidráulicos definidos. Además, se instalarán tomas de conexión a las cuales se conectarán los hidrantes de las parcelas que riegan de estas redes.
- Balsa de Tesejerague. Se construirá una balsa a cota 225 m.s.n.m., de sección trapezoidal semi-excavada en el terreno, aprovechando los materiales de la excavación para la formación de los taludes de terraplén. La balsa estará cubierta por una malla de sombreado compuesta por dos retículas de hilo monofilar negro de poliamida, atadas a la estructura de anclaje perimetral, y por doble capa de tela de sombreado de polietileno de color negro. El sistema de impermeabilización de la balsa (fondo y taludes), constará de una geomembrana de polietileno de alta densidad de 2 mm.
- Telecontrol. Las nuevas infraestructuras estarán telecontroladas vía GPRS con el control de comunicaciones centralizado. Las estaciones remotas se situarán en la estación de bombeo, el Depósito de Mazacote y la nueva Balsa de Tesejerague.



Datos generales	
Ubicación (municipio)	Tuineje y Pájara
Descripción general de la actuación	Implantación de un módulo de desalación de OI de agua de mar altamente eficiente con una producción de 2.500 m ³ /día ubicado en la parcela de la EDAM de Gran Tarajal.
Agua bruta	
Origen del agua	Agua marina
Conductividad eléctrica (dS/m)	53,07
Nitratos (mg/L)	< 3
Datos generales de diseño y explotación	
Capacidad de producción (m ³ /día)	2.500
Producción máxima agua producto (hm ³ /año)	0,875
Potencia total instalada (MW)	0,2006. Se refiere solo a la parte a desarrollar en el proyecto, excluyendo el pretratamiento y postratamiento, ya que se utilizarán los sistemas y equipos existentes.
Consumo de energía específico (sin contar distribución) (kWh/m ³)	N/D
Consumo de energía específico en distribución (kWh/m ³)	N/D
Consumo de energía específico en ósmosis inversa (kWh/m ³)	1,93
Tecnología de producción eléctrica o suministro eléctrico	Actualmente conexión eléctrica a red en la infraestructura de la EDAM de Gran Tarajal. El suministro de energía requerida para el bombeo de captación, todo el proceso de desalación y el bombeo hasta la balsa y el depósito de regulación se plantea absorber mediante generada por la



	planta solar fotovoltaica incluida en la actuación.
Porcentaje de autoconsumo por generación propia de energías renovables (%).	% actual de renovables: 0% % futuro de renovables: 80%
Características tecnológicas de la planta	
Tipo y tecnología de captación de agua bruta	Captación de agua marina en la cántara existente mediante dos nuevas bombas.
Tecnología/s de pretratamiento	Filtros de arena y filtros de cartucho que ya se utilizan los sistemas existentes en la EDAM de Gran Tarajal.
Tecnología de desalación y configuración (pasos/etapas)	Ósmosis inversa
Factor de conversión total (% agua producto):	40%
Tipo de membrana de OI	Membranas de poliamida aromática de alto rechazo de sales.
Presión de trabajo en bastidores de OI (bar)	Por definir
Tecnología de recuperación de energía en OI y eficiencia	Intercambiadores isobáricos
Tecnología de remineralización	No se prevén instalaciones específicas para estos módulos. Se podrán utilizar los sistemas de adición de CO ₂ y lechos filtrantes de calcita ya existentes en al EDAM de Gran Tarajal.
Tecnología de desinfección, si procede	Mínima desinfección con NaClO para garantizar la no proliferación de biofilm en tuberías.
Características del agua producto tras remineralización	
Conductividad eléctrica (µS/cm)	< 350
Concentración de boro prevista (mg/L)	0,5
Concentración de calcio prevista (mg/L)	21
Concentración de magnesio prevista (mg/L)	1,45
Concentración de cloro prevista (mg/L)	< 1
Concentración de sodio prevista (mg/L)	< 70



Características de la salmuera	
Tipo de tratamiento que se da a la salmuera y/o lugar de destino	Emisario submarino ya existente
Conductividad eléctrica (dS/m)	88.295
Concentración de nitratos prevista (mg/L)	< 5

Informe técnico sobre la actuación
<p>En lo que a instalaciones de desalación se refiere, la actuación propone la implementación de un módulo de desalación en la EDAM de Gran Tarajal, con una capacidad de producción de agua desalada de 2.500 m³/día. Este módulo se integrará en las instalaciones de captación, pretratamiento, post-tratamiento y vertido de salmuera ya existentes en la EDAM.</p> <p>La EDAM de Gran Tarajal es una pequeña planta desaladora de agua marina que inicialmente se construyó para una capacidad de producción de 3.000 m³/día (1 hm³/año), y que en 2020 fue ampliada hasta cerca de 6.000 m³/día (2 hm³/año) con tres módulos de OI portátiles. Dispone de una cántara de captación de agua bruta desde donde se bombea el agua de mar a un sistema de filtrado multimedia (filtros de arena + filtros de cartucho). La desalación se realiza en dos módulos de OI de 1.500 m³/día cada uno, que fueron ampliados con los tres módulos de OI portátiles indicados anteriormente. El postratamiento consiste en un sistema de remineralización mediante la adición de CO₂ y el uso de lechos filtrantes de calcita. Las tres EDAMs de la isla de Fuerteventura (Gran Tarajal, Puerto Rosario y Corralejo) se encuentran intercomunicadas entre sí para los casos de averías o necesidades extraordinarias de abastecimiento. Por tanto, el módulo se integra en una EDAM operativa que ha sido implementada y equipada en los últimos años, y que ya cuenta con infraestructuras adecuadas de captación, pretratamiento, post-tratamiento y vertido de salmuera mediante emisario submarino.</p> <p>La tecnología propuesta para el proceso de desalación en el módulo que se ubicará en la parcela de la EDAM de Gran Tarajal es la OI, empleando membranas de poliamida aromática de alto rechazo de sales y sistemas de recuperación de energía de la salmuera mediante intercambiadores isobáricos, que pueden alcanzar eficiencias de hasta el 98%. Esta combinación tecnológica se encuentra entre las mejores opciones operativas del mercado para la desalación de agua marina, como pone de manifiesto el reducido consumo específico esperado (1,93 kWh/m³).</p> <p>En resumen, los regadíos de la Zona Centro Sur de Fuerteventura serán objeto de una actuación de modernización integral, que comprende tanto la incorporación de recursos hídricos no convencionales a partir de la desalación de agua marina como la construcción de depósitos, impulsiones, balsas y redes de riego para el transporte, regulación y distribución del agua desalinizada entre los regantes, así como una instalación fotovoltaica. El módulo de desalación para regadío se integrará en las instalaciones de la EDAM de Gran Tarajal, que ya cuenta con tecnologías modernas y eficientes para cada uno de los procesos implicados en la desalación de agua marina. Concretamente, la tecnología de desalación propuesta para el módulo es la OI con</p>



membranas de poliamida aromática de alto rechazo de sales y sistemas de recuperación de energía mediante intercambiadores isobáricos. Como resultado, se espera un consumo energético específico en los bastidores de OI reducido, que minimizará las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de agua. La instalación de un parque fotovoltaico que generará hasta el 80% la energía necesaria en el proceso de desalación y la posterior impulsión a los depósitos de almacenamiento reducirá el consumo eléctrico de la red y, por tanto, las emisiones de gases de efecto invernadero. En su conjunto, las actuaciones para la modernización de los regadíos de la Zona Centro Sur de Fuerteventura representan una clara mejora de la gestión del agua de riego en esta parte de la isla y favorecen que el proyecto se realice con el menor perjuicio posible sobre los objetivos de mitigación y adaptación al cambio climático.



11.3. Optimización en el uso de los recursos hídricos de aguas desaladas y mejora de la eficiencia energética mediante bombeo solar fotovoltaico y sistema de almacenamiento de energía para Aguas del Almanzora, S.A.

Comunidad de Usuarios	Aguas del Almanzora, S.A.
Provincia	Almería
Términos municipales afectados	Huércal-Overa
Origen del agua	EDAM de Carboneras EDAM de Bajo Almanzora (en fase reparación) EDAM de Aguas del Almanzora (en fase de proyecto)
Superficie total de la Comunidad	34.078 ha
Superficie afectada por la actuación	21.104 ha
Infraestructuras necesarias	<ul style="list-style-type: none">• Planta fotovoltaica de 9.000 kWp para suministro al rebombeo.• Planta fotovoltaica en Balsa de Antas 500 kWp y bombeo de 325 kW en conducción de la actuación de la Fase I.• Sistema de almacenamiento de energía.• Telecontrol.
Presupuesto estimado de la actuación	14.850.000€ (IVA no incluido).
Descripción detallada de la actuación, objetivo y justificación	
<p>Aguas del Almanzora S.L. se constituyó, en Junio de 1997, con el objetivo de gestionar los aprovechamientos de agua autorizados por los respectivos organismos públicos para abastecimiento en beneficio de los usuarios de la Cuenca del Rio Almanzora, Comunidad de Regantes de la Sierra de Enmedio, Pulpí y Guaza. Aguas del Almanzora actualmente suministra agua de riego a cerca de 24.000 ha y realiza la explotación del Trasvase Negratín-Almanzora.</p> <p>La actuación propuesta viene a completar las actuaciones de modernización de regadíos recogidas en la Fase I del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia para esta zona regable, cuyo objetivo fue posibilitar el uso de aguas no convencionales para el riego a varias comunidades de regantes, así como dotarlas de un sistema de automatización y telecontrol para maximizar su eficiencia energética e hídrica. La actuación propuesta en esta Fase II del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia comprende las siguientes obras e instalaciones:</p> <ul style="list-style-type: none">• Instalación solar fotovoltaica mediante paneles montados sobre estructura fija con una potencia pico instalada de 9.000 kWp.• Planta fotovoltaica de 500 kWp en la Balsa de Antas y bombeo de 325 kW en conducción ya implementada en la Fase I.• Sistema de almacenamiento de energía mediante baterías de flujo.	



- Sistema de telecontrol.

El principal objetivo de esta actuación es rebompear el agua de las EDAMs de Carboneras, de Bajo Almanzora (cuando esté reparada), y de Aguas del Almanzora (en fase de proyecto) utilizando exclusivamente energía fotovoltaica y un sistema de almacenamiento de energía. Se pretende que el rebombeo se encuentre en funcionamiento las 24 horas del día, con alimentación directa desde la planta fotovoltaica en las horas centrales del día (5-6 horas diarias), y que el sistema de almacenamiento de energía suministre la energía necesaria cuando no haya sol, ahorrando de esta forma el 100% de la energía que actualmente se consume de la red (15.000 MWh anuales) y contribuyendo, consecuentemente, a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se instalará un sistema para el telecontrol de estas instalaciones con el fin de integrarlas en el centro de control de Aguas del Almanzora, S.A. El volumen anual de agua previsto para rebompear y distribuir posteriormente a las comunidades de regantes es de unos 30 hm³. El agua desalada que se recibe en dicho rebombeo se eleva actualmente con energía de red, con un consumo específico de energía de 0,50 KWh/m³.

Esta actuación se alinea con los objetivos del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, dado que se considera el desarrollo de obras e instalaciones que fomentan el uso de agua desalada (recurso hídrico no convencional) y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a través del empleo de energías renovables.

Informe técnico sobre la actuación

La propuesta de la Comunidad de Regantes Aguas de Almanzora no plantea actuaciones específicas para la desalación de agua marina o de aguas salobres, sino que se centra en la sustitución del sistema tradicional de suministro eléctrico del rebombeo de las EDAMs de Carboneras, Bajo Almanzora (en fase reparación) y Aguas del Almanzora (en fase de proyecto) por energía fotovoltaica. Por tanto, considera el uso de agua marina desalada para riego agrícola procedente de estas EDAMs, que se describen a continuación.

La **EDAM de Carboneras** se puso en servicio en agosto de 2005. Es una planta desaladora de agua de mar con capacidad de producción de 120.000 m³/día (42 hm³/año), destinados al abastecimiento doméstico del levante almeriense y al riego del Campo de Níjar (donde se suministran actualmente entre 18 y 20 hm³/año).

Para la captación de agua bruta, la EDAM cuenta con una toma abierta ubicada fuera del puerto de Carboneras, a una profundidad de -35 m, concretamente en la dársena de la Central Térmica de ENDESA, reformada en 2010.

En la fase de pretratamiento el agua de mar recibe un tratamiento fisicoquímico al objeto de satisfacer los requisitos de funcionamiento de las membranas de OI. Este tratamiento y su dosificación son variables en función de las características que en cada momento presente el agua bruta. El pretratamiento físico consiste en una filtración multimedia mediante enrejado, canales desarenadores, filtración a presión sobre lecho de sílice y microfiltración.

La EDAM de Carboneras aplica la tecnología de OI en el proceso de desalación, organizada en dos



etapas. El sistema inicial de recuperación de energía en la salmuera era de turbinas tipo Pelton, pero entre 2016 y 2017 se sustituyeron por cámaras isobáricas tipo ERI, la mejor tecnología disponible actualmente para esta función, con una eficiencia en torno al 98%, por lo que se produjo una mejora significativa la eficiencia energética de la instalación. Tras esta modernización, los consumos energéticos específicos en los bastidores de OI se han situado en 2,1 kWh/m³. En 2020, el consumo energético total fue de 198 MWh, con un consumo específico medio de 4,8 kWh/m³ (incluye producción y distribución de agua desalada). El agua osmotizada se somete a un postratamiento de remineralización mediante inyección directa de CO₂ y lechada de cal de forma previa a su distribución.

La salmuera generada en el proceso de desalación está compuesta principalmente por sales minerales del agua de mar, pero también puede contener pequeñas cantidades de aditivos incorporados durante el proceso productivo, así como detergentes biodegradables provenientes del lavado de las membranas. Concretamente, se produce diariamente un volumen de agua de lavado de membranas de 40 m³, que se diluye junto al efluente de la salmuera en el caudal de desagüe de la Central Térmica. La EDAM cuenta como medida correctora con un sistema separativo de los distintos efluentes producidos, eliminando los detergentes y espumas de las aguas procedentes del lavado de membranas y filtros antes de su mezcla con el efluente de la salmuera.

De acuerdo a RESOLUCIÓN de 17 de diciembre de 1999, de la Secretaría General de Medio Ambiente, sobre la evaluación de impacto ambiental de la Planta Desaladora de Agua de Mar de Carboneras, Almería, promovida por la “Sociedad Estatal Aguas de la Cuenca del Sur, S. A.”, esta EDAM no se localiza en ningún espacio protegido por la Ley 2/1989, de 13 de julio, por la que se aprueba el Inventario de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía y se establecen medidas adicionales de protección. Así mismo, la zona de ubicación de las infraestructuras para la toma de agua y punto de vertido de efluentes (salmuera) de la EDAM no pertenece a las Reservas Marinas reguladas en el Plan de Ordenación de Recursos Naturales del Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar, ni se encuentra en los fondos marinos de los espacios propuestos por la Comunidad Autónoma de Andalucía como Lugares de Interés Comunitario marinos de Sierra de Cabo de Gata y de Playa de Carboneras. Según Resolución, la evacuación de la salmuera de la EDAM, a razón de un caudal continuo de 6.056 m³/h, con una salinidad de 70 g/L, se realiza al mar a través del canal de desagüe en lámina libre de las aguas de refrigeración en la cara norte del espigón del muelle de la Central Térmica de ENDESA. La proporción de mezcla entre el volumen procedente de la Central Térmica y el procedente de la EDAM es, respectivamente, de 1.000 hm³/año y 53 hm³/año.

Las aguas del tramo litoral donde se localiza el punto de vertido están clasificadas en la categoría de aguas normales. Los valores de los parámetros a los que se refiere esta clasificación sobre los que puede incidir el vertido, referidos a la media aritmética de los resultados a obtener en el Plan de Vigilancia y Control durante un año, son: salinidad de 0,9 a 1,1 de la media normal del parámetro en la zona no afectada por el vertido; pH entre 6 y 9; nitratos 1.000 µg/L; detergentes 200 µg/L; fluoruros 1,7 mg/L; y fósforo total 600 µg/L. En el entorno del punto de vertido, las aguas están clasificadas en la categoría de aguas especiales, cuyos requisitos de calidad son más restrictivos que para las aguas normales debido a la presencia del Parque Natural Marítimo-Terrestre del Cabo de Gata. Los parámetros establecidos para las aguas especiales, en las mismas



condiciones del caso anterior, son: salinidad de 0,9 a 1,1 de la media normal del parámetro en la zona no afectada por el vertido; pH entre 7 y 9; nitratos 700 $\mu\text{g/L}$; detergentes 100 $\mu\text{g/L}$; fluoruros 1,7 $\mu\text{g/L}$; fósforo total 600 $\mu\text{g/L}$. El promotor documenta que la solución elegida, de acuerdo con los estudios y análisis realizados en relación con el sistema de evacuación de efluentes de la EDAM y localización del punto de vertido, no tiene repercusiones en las praderas de fanerógamas representadas por “Cymodocea nodosa”, como especie picolonizadora, y “Posidonia oceánica”, especie que forma biotopos de gran valor ecológico, considerados como hábitat prioritario de acuerdo con la Directiva 43/92/CEE.

El modelo aplicado para el análisis de la difusión y dispersión de la salmuera en el medio marino en el punto de descarga fue desarrollado en el Departamento de Oceanografía y Biología Marina del Grupo AZTI (Instituto Oceanográfico del País Vasco). Los resultados del modelo determinan las conclusiones siguientes: para una salinidad de 38,5 g/L en el agua de refrigeración de la Central Térmica, e igual salinidad en el medio marino receptor, y una salinidad de 70 g/L en el agua de la salmuera, la mezcla, antes de su vertido al mar, tendrá una salinidad de 39,7 g/L; por lo que el incremento medio de la salinidad será 1,2 g/L en el punto de vertido, que está dentro del rango del 10 por 100 de variabilidad que permiten los objetivos de calidad de las aguas normales. La simulación numérica de la dispersión de la mezcla en función de la distancia al foco indica que a 1 kilómetro de distancia el aumento de la salinidad es inferior a 0,05 g/L, lo que está dentro del rango de variación estacional de la salinidad de la zona, no existiendo por tanto riesgo de afección a las biocenosis marinas del entorno derivado del aumento de salinidad de los vertidos.

Puesto que para garantizar la protección ambiental de los ámbitos afectados por la ejecución del proyecto se contemplaron todas las medidas de corrección y un Programa de Vigilancia Ambiental adecuado, elaborados por el promotor, y no se apreciaron potenciales impactos adversos significativos sobre el medio ambiente, la Secretaría General de Medio Ambiente resolvió que era innecesario someter el proyecto de Planta Desaladora de Agua de Mar de Carboneras al procedimiento reglado de evaluación de impacto ambiental.

La **EDAM de Bajo Almanzora** se ubica a 1.400 m aguas arriba de la desembocadura del río Almanzora, en su margen izquierda, ocupando una superficie total de 6,7 ha. El 28 de septiembre de 2012, debido a las lluvias torrenciales y graves inundaciones acontecidas en la zona, la mayoría de los equipos e interconexiones de cables quedaron sumergidos y sufrieron graves desperfectos, que dejaron inhabilitada la instalación desde entonces. Esta EDAM debería suministrar una parte del agua que recibe la Comunidad de Regantes Sindicato de Riegos de Cuevas del Almanzora.

La EDAM se construyó con una capacidad productiva de 45.000 $\text{m}^3/\text{día}$ (15 $\text{hm}^3/\text{año}$), ampliable a 60.000 $\text{m}^3/\text{día}$ (20 $\text{hm}^3/\text{año}$). La captación de agua, que se realizó mediante una toma mixta, permite captar indistintamente caudales de 6 pozos playeros situados en la desembocadura del río Almanzora o de una toma abierta ubicada en una torre de captación. Dada la ubicación de la EDAM, la toma mediante pozos es la preferente, ya que garantiza un agua bruta más limpia y homogénea, disminuyendo las necesidades de pretratamientos. El pretratamiento del agua consiste en un sistema de filtración multimedia formado por filtros horizontales de arena sílicea + antracita y filtros de cartuchos, para una microfiltración a 20 micras, que garantizan tanto la adecuación del agua bruta antes del proceso de OI como la protección de las membranas.



El proceso de desalación se realiza en 3 bastidores de OI, con un factor de conversión del 45%. La planta está preparada para realizar un 2º paso de OI para reducir la concentración de boro en el agua producto hasta 0,5 mg/L, con el fin de evitar problemas de fitotoxicidad por boro en cultivos sensibles (leñosos, especialmente cítricos). Con el fin de optimizar el consumo de energía y la eficiencia, la planta cuenta con variadores de frecuencia en el bombeo de alta presión y recuperadores de energía mediante intercambiadores de presión isobáricos (ERI).

El proceso de remineralización se diseñó mediante la incorporación de CO₂ y lechada de hidróxido cálcico mediante el empleo de saturadores de cal, que es la solución tecnológica operativa más extendida y eficiente actualmente.

La EDAM cuenta como medida correctora con un sistema separativo de los distintos efluentes producidos, eliminando los detergentes y espumas de las aguas procedentes del lavado de membranas antes de su mezcla con el efluente de la salmuera. Para esta eliminación se emplea un tratamiento físico-químico de coagulación y floculación para la eliminación de grasas y sólidos suspendidos, y sedimentación y decantación en decantadores lamelares, para la recogida de los flóculos en forma de fango, que se pasa posteriormente al espesador y seguidamente a la máquina de deshidratación).

Para la gestión y tratamiento de la salmuera se proyectó su evacuación al mar por un emisario submarino de 2.498 m de longitud (con tramo terrestre y marino) que alcanza la profundidad de -25 m. Los últimos 100 m del emisario corresponden a un tramo difusor formado por 21 orificios o bocas de descarga de 700 mm de diámetro, donde la inclinación del chorro de vertido es de 60°, favoreciendo la difusión de la salmuera en el mar. De acuerdo con la RESOLUCIÓN de 24 de marzo de 2006, de la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio Climático, por la que se formula declaración de impacto ambiental sobre la evaluación del proyecto de "Nueva desaladora del Bajo Almanzora, en Cuevas de Almanzora (Almería)", promovido por Aguas de las Cuencas Mediterráneas, este modelo de vertido demostró garantizar una dilución grande en el campo cercano. Además, se programó la dilución previa de la salmuera en proporción 1 a 0,60 con agua de mar para favorecer cumplir los umbrales críticos de salinidad establecidos para la Posidonia oceánica (no superarse la salinidad de 38,5 g/L en más del 25% de las observaciones en los puntos de muestreo y no superarse la salinidad de 40 g/L en más del 5% de las observaciones en los puntos de muestreo).

La zona del medio marino donde se sitúa el salmueroducto y donde se realiza el vertido, está catalogada como Lugar de Importancia Comunitaria "Fondos marinos del Levante almeriense" (ES6110010). La calidad e importancia de este lugar se debe a la existencia de praderas de Posidonia oceánica (hábitat de interés comunitario prioritario) situadas entre las localidades de Villaricos y Terreros, consideradas las más extensas y mejor conservadas del litoral español. Estas praderas ocupaban en 2006 una amplia franja que llegó a superar los 3 km de anchura, y que se extendía desde la línea de costa hasta profundidades de -30 m. Los datos de cartografía disponible indicaban su presencia a 1.700 m al oeste de la zona de vertido. Las simulaciones de modelización del transporte y dispersión de la salmuera realizadas mediante el programa CORMIX2 (US-EPA), para diferentes alternativas planteadas, las cuales incluyen las condiciones más desfavorables en el medio receptor, desde el punto de vista de dilución, demostraron que, para todos los casos



estudiados, se cumplirían los umbrales críticos de salinidad establecidos para la Posidonia oceánica. De hecho, para el caso que más se ajusta a la situación real del proyecto (caudal de 1,36 m³/s, dada la decisión de diluir la salmuera previo al vertido) y existencia de vientos y corrientes, los valores de salinidad a la distancia a la que se sitúa la Posidonia oceánica, estaban muy por debajo de los umbrales críticos establecidos. Por consiguiente, la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio Climático, a la vista de la Propuesta de Resolución emitida por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental de fecha 23 de marzo de 2006, concluyó que la alternativa elegida por el promotor era compatible con el medio ambiente por no observarse impactos adversos significativos sobre el mismo, con el diseño finalmente presentado a declaración de impacto ambiental, con los controles y medidas propuestas por el promotor, y las condiciones específicas expuestas en dicha Resolución.

Según noticias recientes, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico ha aprobado un anteproyecto para la reconstrucción de la EDAM de Bajo Almanzora. La empresa Sacyr Agua ha sido seleccionada en la licitación de un contrato de la empresa pública Acuamed para la redacción del proyecto constructivo, ejecución de las obras de reparación y posterior puesta en marcha de esta EDAM. Se prevé que la desaladora del Bajo Almanzora entre en servicio en 2024.

Esta reconstrucción posibilitará que la EDAM, que ya disponía de una tecnología muy eficiente, se actualice con la mejor tecnología disponible, lo que redundará en consumos energéticos y emisiones de gases de efecto invernadero aún menores. En este sentido, la reconstrucción prevé la instalación de una planta de energía fotovoltaica para que, a partir de 2026, la EDAM pueda autoabastecerse, y con ello contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Finalmente, se ha contemplado una importante partida económica para mejorar y ampliar la protección de la EDAM frente lluvias torrenciales, de tal manera que no se vuelva a producir un episodio de inundaciones como el del año 2012.

Finalmente, respecto a la **nueva EDAM promovida por Aguas del Almanzora**, indicar que la capacidad de producción anual prevista es de 30 hm³, y que hará uso de las mejores tecnologías disponibles actualmente para cada uno de los procesos implicados en la producción de agua desalada, según se desprende de la documentación que ya se encuentra tramitándose en la Junta de Andalucía.

En resumen, las tecnologías de desalación de agua marina disponibles en la EDAM de Carboneras, tras la sustitución de las turbinas Pelton por intercambiadores de presión isobáricos, se encuentran entre las mejores y más eficientes para cada una de las etapas del proceso. Concretamente, la EDAM utiliza actualmente la tecnología de OI con membranas TFC de alta permeabilidad, con sistemas de recuperación de energía mediante cámaras isobáricas de desplazamiento rotativo (ERI), con una eficiencia del 98%, que es la mejor tecnología operativa disponible actualmente para la desalación de agua de mar. Como resultado, se obtiene un consumo energético específico en los bastidores de 2,1 kWh/m³, valor muy reducido que se asocia a unas emisiones de gases de efecto invernadero igualmente reducidas. La EDAM del Bajo Almanzora es una planta que desde su construcción inicial contaba con las mejores tecnologías del momento para la desalación de agua marina, siendo esperable que, en su reconstrucción tras la inundación de 2012, incorpore las mejores tecnologías actualmente disponibles en cada una de las



etapas del proceso. Además, está planificada la sustitución del actual suministro eléctrico de red por energía fotovoltaica, con la consiguiente reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo que se refiere las obras e instalaciones recogidas en la actuación, la implementación de un sistema de automatización y telecontrol permitirá digitalizar la gestión del agua y de la energía de manera integral, permitiendo maximizar la eficiencia energética e hídrica. Adicionalmente, la instalación de plantas fotovoltaicas junto con los sistemas de almacenamiento de energía permitirá la sustitución del consumo energético de la red de 15.000 MWh) por energías renovables, representando una notable mejora medioambiental especialmente en lo que a emisiones de gases de efecto invernadero se refiere, y favoreciendo que el proyecto se realice con el menor perjuicio posible sobre los objetivos de mitigación y adaptación al cambio climático.

Efecto de la actuación sobre la vida útil o la capacidad de la EDAM

Las infraestructuras proyectadas asociadas al aprovechamiento más medioambientalmente sostenible del agua de las EDAMs no supondrán un incremento de la vida útil de las plantas ni de ninguno de los elementos fundamentales para la producción de agua marina desalinizada. Las actuaciones no incrementarán la capacidad productiva de las plantas ni conllevan la solicitud de concesiones adicionales.

11.4. Proyecto para la mejora del aprovechamiento y gestión de los recursos de aguas no convencionales para la Comunidad de Regantes de Totana (Murcia)

Comunidad de Usuarios	Comunidad de Regantes de Totana
Provincia	Murcia
Términos municipales afectados	Totana y Lorca
Origen del agua	Agua desalada de la EDAM de Águilas y de la EDAM de TORREVIEJA
Superficie total de la Comunidad	10.780 ha
Superficie afectada por la actuación	10.780 ha
Infraestructuras necesarias	<ul style="list-style-type: none"> • Dos balsas de regulación, de 400.000 m³ y 185.000 m³ respectivamente. • Conducciones con una longitud de 7.000 m aproximadamente para conectar la EDAM de Águilas con las balsas existentes, y la EDAM de Torrevieja con las redes existentes. • Consolidación de las zonas regables de Raiguero, Paretón y La Huerta, mediante 70 km de conducciones principales y secundarias y la instalación de 126 hidrantes multiusuario con telecontrol.
Presupuesto estimado de la actuación	6.715.547,32 € (IVA no incluido).
Descripción detallada de la actuación, objetivo y justificación	
<p>La Comunidad de Regantes de Totana se constituyó el 16 de diciembre de 1979. Es una entidad de riego que se localiza principalmente en el término municipal de Totana (Murcia), aunque su zona regable también se extiende a alguno de los municipios aledaños. Su principal fuente de suministro ha sido el Canal del Trasvase Tajo-Segura, pero el continuo decaimiento de los caudales trasvasados ha motivado su interés en disponer de agua marina desalinizada para riego, de forma que se han solicitado y obtenido concesiones de agua desalada de la EDAM de Águilas y de la EDAM de Torrevieja. Las principales unidades que constituyen la actuación son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Construcción de dos balsas de regulación, con capacidades de 400.000 m³ y 185.000 m³, respectivamente. • Dos tramos de tubería de 600 m aproximadamente en fundición dúctil de DN 700mm y 2.000 m aproximadamente en PVC-Orientado de DN 450mm, para conectar las distintas redes de la CR con la EDAM de Torrevieja y con el Canal del Trasvase Tajo-Segura. • Conducciones con una longitud de 4.500 m aproximadamente en DN 600 mm para conectar la EDAM de Águilas con las balsas existentes. 	



- Consolidación de la zona regable de Raiguero, Paretón y La Huerta mediante 70 km de conducciones principales y secundarias, y la instalación de 126 hidrantes multiusuario con telecontrol.

Estas infraestructuras mejoran el aprovechamiento de las aguas desalinizadas procedentes de la EDAM de Águilas y la EDAM de Torrevieja, utilizando aguas no convencionales para paliar el déficit estructural que tiene esta área regable.

Por tanto, los principales objetivos esta actuación son:

- Consolidar el uso de aguas no convencionales procedentes de las EDAMs de Águilas y Torrevieja.
- Incrementar la capacidad de regulación de los recursos hídricos, así como aumentar su disponibilidad por la disminución de la pérdidas de agua por evaporación.
- Garantizar el suministro de la zona, en los momentos de corte del Canal del Trasvase Tajo-Segura, ya sea por mantenimiento o por falta de recursos trasvasables.

Estos objetivos se alinean con los del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, dado que se considera una actuación que favorece el empleo de aguas no convencionales (desaladas), que implica el uso de energías renovables, e incluye sistemas monitorización y telecontrol.

Informe técnico sobre la actuación

La actuación no plantea actuaciones específicas para la desalación de agua marina o de aguas salobres, pero sí considera el uso de agua marina desalinizada para riego procedente de dos infraestructuras ya existentes: las EDAMs de Águila y de Torrevieja.

La **EDAM de Águilas** se ubica en las inmediaciones de dicho núcleo urbano y entró en funcionamiento en marzo de 2013. Se trata de una planta de desalación de agua de mar por OI con una capacidad de producción de 200.000 m³/día (70 hm³/año). El agua desalada se emplea para el riego de las comunidades de regantes de Águilas, Pulpí, Puerto Lumbreras y Lorca, además de abastecer a la Mancomunidad de Canales del Taibilla.

La planta cuenta con una toma de agua bruta de tipo abierta y se sitúa en el margen derecho de la desembocadura de la Rambla del Cañarete. La toma está formada por una torre cilíndrica de 5 m de diámetro apoyada en el fondo marino a la cota -17 m, y con una serie de boquillas para la entrada del agua bruta. Desde la torre parten dos tuberías de 1.400 mm, ancladas al fondo entre las cotas -9 m y -17 m, y enterradas en zanja abierta entre la -9 m y la línea de costa. En su tramo terrestre, las tuberías continúan enterradas siguiendo el curso de la Rambla de Cañarete. El diseño contempla un pretratamiento físico constituido por un sistema de filtración multimedia de tres etapas, las dos primeras a través de un lecho granular, primero por gravedad y después a presión, y la tercera es una microfiltración en filtros de cartucho. Este último filtrado no solo permite un afinado del agua a tratar en las membranas, sino también una seguridad en caso de pérdida de material filtrante en las etapas de filtración previas. El pretratamiento químico comprende la posibilidad de dosificación en caso de necesidad de hipoclorito sódico, ácido, coagulante, polielectrolito, dispersante, bisulfito e hidróxido sódico.

Tras el pretratamiento, el agua se bombea a los 12 bastidores de OI, donde se dispone de membranas de poliamida aromática con tecnología TFC de arrollamiento en espiral. El sistema de ósmosis puede realizar un doble pasos para el control de la concentración de boro. El sistema de



recuperación de energía residual en la salmuera consiste en cámaras isobáricas tipo DWEER. Se disponen 3 cámaras por línea, resultando así un número total de 36 cámaras recuperadoras de energía. La producción y el consumo específico de energía en la EDAM de Águilas entre 2018 y 2021 ha sido bastante estable, alcanzando valores en torno a 55 hm³/año y 4,30 kWh/m³ (Incluye producción y transporte). El consumo específico en bastidores de OI es de 2,1 kW/m³, un valor característico de las mejores tecnologías operativas de OI disponibles actualmente.

El agua osmotizada recibe un postratamiento de remineralización mediante inyección de CO₂ y lechada de cal, además de una desinfección con hipoclorito, antes de ser bombeada a los puntos de entrega.

La red de distribución del agua producto incluye tres tuberías, para el abastecimiento urbano de Águilas (3.050 m), de la Comunidad de Regantes de Águila (4.721 m) y de las zonas del Alto Guadalentín: Lorca, Puerto Lumbreras y Pulpí (11.175 m). Para el almacenamiento del agua desalada se utilizan el embalse de Salinares, los depósitos de la Mancomunidad de los Canales de Taibilla, y una nueva balsa de regulación en el valle de Guadalentín, proyectada con capacidad de 100.000 m³.

La conducción del vertido de salmuera, que asciende a un volumen máximo de 78 hm³/año con una salinidad máxima de 67,5 gr/L, se realiza mediante una tubería de 890 m de PEAD DN 1200 mm; 2867 m de PEAD DN 1400 mm PN 6; y 225 m de hincas de tubería de hormigón armado DN 2000 mm. De forma más específica, dicha conducción discurre enterrada bajo la rambla del Charcón a una profundidad de -3 m hasta alcanzar la playa de Poniente. A partir de este punto circula bajo el actual paseo marítimo hasta el farallón del Castillo de Águilas, donde una arqueta da paso a una tubería de DN 1400 mm que atraviesa el acantilado, conectando, finalmente, con un emisario submarino. Dicho emisario, de unos 333 m de longitud, se dispone enterrado en zanja hasta llegar a la zona con Posidonias, donde continúa lastrado hasta una profundidad de -30 m. En este punto se transforma en un tramo difusor, de unos 127 m de longitud, para el vertido en chorro de la salmuera. El sistema de vertido se compone de 21 difusores de 240 mm de diámetro distanciados 6,5 m entre sí, ángulo de los difusores de 60° respecto a la horizontal y altura de los difusores de 4 m sobre el fondo marino. Es de resaltar que inmediatamente antes de la salida del vertido al exterior, la EDAM dispone de una arqueta donde se puedan tomar muestras representativas del efluente líquido y determinar el caudal.

El vertido final desde tierra al mar es una mezcla de la salmuera de rechazo procedente del proceso de OI y de los efluentes tratados procedentes de la planta de tratamiento de aguas. Durante la operación se vela porque los valores límite de emisión de concentraciones de sustancias contaminantes a través de la conducción de desagüe no sean superiores a los valores de los objetivos de calidad que se establezcan para la zona receptora donde se efectúa la descarga y, en cualquier caso, con los establecidos en la normativa aplicable y, en particular, el Real Decreto 258/1989, de 10 de marzo, por el que se establece la normativa general sobre vertidos de sustancias peligrosas desde tierra al mar y su reglamentación complementaria, el anexo I de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas y la Orden 13 de julio de 1993 por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos de tierra al mar. Con respecto a la temperatura, el vertido no puede provocar una subida superior a 3°C con respecto a la temperatura existente en el agua marina en un radio de 200 m del punto de vertido.



Con respecto a la protección de la pradera de Posidonia oceánica y céspedes de Cymodocea nodosa, la localización a la que se realiza el vertido es lo suficientemente profunda como para garantizar que la capa hiperdensa de salmuera no los afecta significativamente. Para constatar estas garantías existe un Programa de Vigilancia y Control que se encarga de obtener la información necesaria para gestionar eficazmente el sistema de vertido, evaluar si se cumplen los requisitos del efluente y los objetivos de calidad, y así como realizar las modificaciones convenientes en el sistema de vertido, en su caso. El Programa incluye entre otros (i) requisitos de calidad en los puntos de muestreo, (ii) puntos de muestreo y mediciones, (iii) control de la evaluación de la pradera de la Posidonia oceánica y Cymodocea nodosa, (iv) control de la dispersión del efluente, de las variables de flujo y de la integridad del emisario, así como (v) un protocolo de corrección del exceso de salinidad

En consecuencia, la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio Climático, a la vista del informe emitido por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental de fecha 20 de abril de 2006, formuló declaración de impacto ambiental sobre la evaluación del proyecto de “Nueva Desaladora de Águilas-Guadalentín”, concluyendo que con la alternativa elegida por el promotor, el nuevo sistema de vertido elegido tras el proceso de evaluación ambiental, las medidas correctoras y controles propuestos por el promotor, y los condicionantes específicos de dicha Declaración daban respuesta a lo planteado en el periodo de consultas previas y en el de información pública, pudiéndose considerar que el proyecto era compatible con el medio ambiente al no observarse impactos adversos significativos.

La **EDAM de Torrevieja** se ubica en las inmediaciones del núcleo urbano de Torrevieja, en una zona establecida por el Decreto 60/2003, de 13 de mayo, del Consell de la Generalitat Valenciana. La zona está calificada como área de predominio agrícola, pero dicho Decreto considera los equipamientos u obras de interés general como usos compatibles y autorizables, y que la EDAM no presenta afección alguna sobre el Lugar de Interés Comunitario (LIC) de Lagunas de la Mata y Torrevieja. La EDAM entró en fase de operación y mantenimiento en 2014 y dispone de una capacidad de producción anual de 80 hm³ ampliables a 120 hm³.

El punto de toma de agua bruta se encuentra adosado al dique de Poniente del puerto de Torrevieja y se realiza mediante una toma abierta con cántara-cajón de hormigón prefabricado. Desde la cántara, un grupo de bombeo impulsa el agua bruta por una conducción de DN 1600 mm y con una longitud de aproximadamente 2 km.

La EDAM dispone de 16 bastidores de OI de membranas TFC con configuración de arrollamiento en espiral, operando en dos pasos para el control de la concentración de boro en el agua desalada, siendo el factor de conversión global de trabajo del 43,3%. La planta tiene un pretratamiento fisicoquímico con un sistema de filtración multimedia compuesto por filtros de antracita + filtros de arena + filtros de cartucho. El pretratamiento químico comprende la posibilidad de dosificación de hipoclorito sódico, ácido, coagulante, polielectrolito, dispersante, bisulfito e hidróxido sódico. Tras el pretratamiento el agua se bombea hacia los bastidores de OI, donde se obtiene el agua de permeado u osmotizada. La planta dispone de recuperadores de energía en la salmuera basados en cámaras isobáricas tipo ERI y postratamiento con inyección de CO₂ y lechada de cal + hipoclorito antes de su distribución final.



El consumo específico de la EDAM en los últimos años ha oscilado entre 3,5 y 3,7 kWh/m³, correspondiendo al proceso de OI un valor en torno a 2,1 kWh/m³. Se trata de unos valores extraordinariamente bajos que sólo son alcanzables mediante el uso de la mejor tecnología en los procesos de OI y al gran tamaño de la planta, lo que permite maximizar las eficiencias.

La salmuera se bombea por el dique de Poniente y cruza la bocana del puerto hasta la zona de vertido mediante 2.430 m de tuberías de PRFV DN 2000 mm y 1.250 m de tubería de PEAD DN 2000 mm. El vertido de salmuera, con un caudal de 2,5 m³/s, se realiza mediante un tramo de emisario con 64 difusores al pie de la escollera, con orientación de los difusores formando un ángulo con la horizontal de entre 40° y 70°. Los ensayos experimentales realizados por el CEDEX indican que con este diseño se obtiene una mayor dispersión y que, actuando sobre la velocidad de la salida de los difusores, se puede corregir eficazmente una eventual situación de exceso de salinidad sobre los valores límites permitidos.

La distribución del agua desalada desde la EDAM se realiza mediante una conducción de 21 km de acero soldado helicoidalmente (5.610 m de DN 1600 mm, 7.644 m de DN 1400 mm, 3.002 m de DN 1200 mm y 5005 m de DN 1300 mm), que discurre paralela al camino de servicio del Canal del Campo de Cartagena, con la que se abastece a las comunidades de regantes de la Cuenca del Segura (el agua puede ser entregada tanto en el embalse de La Pedrera como en el Canal del Campo de Cartagena) y a la Mancomunidad de Canales del Taibilla como agua potable. El punto de entrega del agua desalada en el embalse de La Pedrera se encuentra a 300 m del lugar Red Natura 2000 ZEPA y LIC "Sierra de Escalona y Dehesa de Campoamor". El punto de entrega del agua desalada en el Canal del Campo de Cartagena se encuentra a 3 km del lugar Red Natura 2000 más próximo y no existen hábitats de interés comunitario que puedan verse afectados por la actuación. En el punto de entrega en el embalse de La Pedrera no existen especies vegetales características de hábitats catalogados, al ser zonas intervenidas y carentes de vegetación.

El punto de vertido de salmuera se encuentra en el interior del espacio Red Natura 2000 LIC y ZEPA ESZZ16009 (Espacio Marino Cabo Roig), lugar que se considera una excelente representación de praderas de Posidonia oceánica y otros hábitats marinos. Los hábitats de interés comunitario cercanos al emisario son: (i) bancos de arena cubiertos permanentemente por agua marina poco profunda, en el que se localizan ejemplares de Cymodocea nodosa que no llegan a formar praderas y (ii) praderas de Posidonia oceánica.

El programa de vigilancia ambiental de la desaladora de Torre Vieja derivado de la Declaración de Impacto Ambiental y de la Autorización Ambiental Integrada de la instalación, incluye una serie de controles para el seguimiento de las praderas de fanerógamas marinas. Estos controles se llevan a cabo anualmente sobre una extensión de 2,62 km² del fondo marino alrededor del punto de vertido, midiendo las superficies ocupadas por la siguientes biocenosis: "Posidonia oceánica sobre mata muerta" y "Cymodocea nodosa en arenas finas bien calibradas". Sus resultados muestran que el porcentaje de cada biocenosis respecto al total de la zona de estudio se ha mantenido en valores similares desde el año 2015, no observándose cambios significativos que puedan deberse al vertido de salmuera sobre las biocenosis de la zona.

De los resultados de los controles de salinidad en continuo llevados a cabo según las prescripciones del Programa de Vigilancia, se desprende que no se han superado los valores



umbrales establecidos para Posidonia oceánica y Cymodocea nodosa, excepto en ocasiones muy esporádicas en las que, en ningún caso, se ha sobrepasado el porcentaje de observaciones establecido en los objetivos de calidad por lo que nunca ha sido necesario llevar a cabo el protocolo de corrección de salinidad establecido en la Declaración de Impacto Ambiental y de la Autorización Ambiental Integrada.

El Estudio de Impacto Ambiental incluye como medida preventiva específica para la minimización del impacto en el medio marino, las recomendaciones del CEDEX en cuanto a distancia y sistema de vertido del efluente. Además, se incluye un estudio batimétrico, de viento, oleaje, mareas, temperatura, salinidad y corrientes con el fin realizar un modelo de simulación que refleje el comportamiento del efluente eliminado. Las aguas de vertido consisten en un 98,5% en agua de rechazo con alto contenido salino y en un 1,5% en agua de lavado de filtros y productos de limpieza de membranas. Las aguas de lavado de filtros se tratan mediante un proceso de decantación en el que los sólidos retenidos son bombeados a un espesador de lodos. Los lodos residuales de este proceso se almacenan convenientemente y se transportan a vertedero autorizado.

Con respecto al suministro eléctrico de la planta, se dispone de una acometida y subestación tipo GIS 220 KV en el recinto de la EDAM. La alimentación a la subestación se realiza por medio de una línea (700 m) enterrada bajo conducto de transmisión de 220 KV procedente de la subestación.

La Secretaria General para la Prevención de la Contaminación y del Cambio Climático, a la vista del informe emitido por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental de fecha 10 de marzo de 2006, formuló Declaración de Impacto Ambiental sobre la evaluación del proyecto de “Planta desaladora para garantizar los regadíos del trasvase Tajo-Segura”, concluyendo que la solución adoptada da respuesta a lo planteado en el periodo de consultas previas y de información pública, no observándose impactos adversos significativos sobre el medio ambiente.

En resumen, las tecnologías actualmente implementadas en las EDAMs de Águilas y de Torrevieja se encuentran entre las mejores tecnologías disponibles para cada una de las etapas del proceso de desalación. Ambas EDAMs utilizan actualmente la tecnología de OI con membranas TFC de alta permeabilidad y con sistemas de recuperación de energía mediante cámaras isobáricas. Estas características técnicas implican que ambas EDAMs utilizan la mejor tecnología operativa disponible actualmente para la desalación de agua de mar. Como resultado, el consumo energético específico es muy reducido, generando unas emisiones de gases de efecto invernadero igualmente reducidas. La actuación propuesta considera la construcción de dos balsas de regulación y la aplicación de energía fotovoltaica al bombeo desde la balsa principal, que permitirá sustituir una parte importante del consumo eléctrico de la comunidad de Regantes de Totana por energía renovable y, consecuentemente, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El resto de obras de modernización (conducciones e hidrantes con telecontrol) permitirá mejorar la gestión y eficiencia en el aprovechamiento del agua desalada suministrada desde de las EDAMs. Por tanto, se puede afirmar que la actuación propuesta favorece que el proyecto se realice con el menor perjuicio posible sobre los objetivos de mitigación y adaptación al cambio climático.

Efecto de la actuación sobre la vida útil o la capacidad de la EDAM

Las infraestructuras proyectadas asociadas al aprovechamiento más medioambientalmente



sostenible del agua de las EDAMs no supondrán un incremento de la vida útil de las plantas ni de ninguno de los elementos fundamentales para la producción de agua marina desalinizada. Las actuaciones no incrementarán la capacidad productiva de las plantas ni conllevan la solicitud de concesiones adicionales.



12. Síntesis y conclusiones

Desde hace más de una década, el suministro masivo y directo de agua marina desalada para riego agrícola es una realidad en regiones como el sureste español o el sur de Israel. La desalobración de recursos hídricos subterráneos o superficiales para fines agrícolas se inició bastantes años antes, aunque generalmente a una menor escala y, consecuentemente, con una perspectiva más local. Hoy son muchos los países que han iniciado o se están planteando inversiones importantes en desalación para mantener o impulsar importantes zonas de producción hortofrutícola.

Entre las tecnologías de desalación operativas, la que ha experimentado un mayor avance tecnológico en las últimas décadas ha sido la ósmosis inversa (OI), que ha alcanzado unos consumos específicos de energía notablemente más reducidos que el resto, por lo que su uso se ha generalizado en la práctica totalidad de nuevas instalaciones de desalación, tanto con agua de mar como con agua salobre. Actualmente se trata de tecnología plenamente madura, donde las posibilidades de mejora de rendimientos de los equipos y de los circuitos hidráulicos son muy limitadas, ya que prácticamente se ha llegado a los límites termodinámicos del proceso.

Se pueden diferenciar 4 procesos o fases en las estaciones desaladoras, ya sean de agua marina o salobre. La primera es la captación, donde no se identifica una tecnología superior al resto, sino que son las características locales de acceso al agua bruta y su calidad las que condicionan la elección de la tecnología. En el siguiente proceso, el pre-tratamiento, la filtración multimedia es la solución generalizada, empleando sucesivamente tecnologías con tamaño de filtración decreciente mediante distintas configuraciones, que pueden incorporar filtros de disco, lechos filtrantes, microfiltración e incluso ultrafiltración. La tercera fase es la OI propiamente dicha, donde el empleo de membranas de poliamida aromática TFC (*Thin Film Composite*) de alta permeabilidad y sistemas de recuperación de energía mediante intercambiadores isobáricos rotativos es la mejor tecnología disponible en el rango de presiones de trabajo propias de la desalación de agua mar (60-70 bares), mientras que en estaciones desaladoras que trabajan a menor presión (10-20 bares), la realización de dos o tres etapas de ósmosis con recuperación de la energía residual de la salmuera mediante turbocompresores (*turbochagers*) también es altamente eficiente y recomendable. La última fase es el post-tratamiento, donde la adición de CO₂ y una lechada saturada de hidróxido cálcico es la solución más operativa para la remineralización del agua osmotizada, pudiendo ser necesario el segundo paso de OI en una fracción del agua osmotizada, para reducir la concentración de boro si el agua producto se va a destinar al riego de zonas con presencia de cultivos sensibles (cítricos y frutales de hueso principalmente). En el caso de estaciones desaladoras, es muy frecuente realizar la remineralización mediante la mezcla del agua osmotizada con una pequeña fracción (5-15%) de agua salobre bruta o pretratada, disminuyendo el coste final del agua producto.

El principal efluente de los procesos de desalación es la producción de salmueras, que deben ser gestionadas oportunamente para que su vertido a las masas de agua no genere daños ambientales significativos, o incluso valorizadas. Las principales alternativas para la gestión y

valorización de salmueras son la descarga controlada a masas de agua, la concentración en subproductos comercializables y la valorización mediante su uso en otros procesos. En las estaciones de desalación de agua marina el vertido de salmueras al mar mediante emisarios submarinos es la solución generalizada, donde son habituales los estudios de modelización matemática para determinar su dilución y dispersión en el mar, y así garantizar la ausencia de daños medioambientales inasumibles. En el caso de las estaciones desaladoras, el vertido al mar o a otras masas de aguas continentales también es la solución habitual, aunque en estos casos resulta más problemática porque su composición difiere notablemente de la del agua marina, y puede presentar concentraciones de nutrientes que requieran tratamientos específicos previos al vertido, como la desnitrificación. En estos casos, la concentración de la salmuera en subproductos comercializables (obtención de sales, fabricación de hipoclorito sódico, suplementos alimenticios para el ganado, ...) son alternativas muy interesantes que todavía no se han desarrollado a gran escala, al igual que su valorización en otras tecnologías emergente (forward osmosis, células de combustible microbianas, ...), que se encuentran actualmente en fase de investigación y/o prototipo.

La revisión de los proyectos de modernización de regadíos que incorporan actuaciones de desalación de agua marina y salobre, o que persiguen un mejor aprovechamiento de aguas desaladas y desalobradas, incluidas en la Fase II del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de la economía española, pone de manifiesto que en todos los casos las soluciones propuestas se encuentran en la vanguardia tecnológica. Así ocurre en las actuaciones propuestas por la Comunidad de Usuarios de Sierra de Gádor y el regadío de la Zona Centro Sur de Fuerteventura, donde las instalaciones de desalación o desalobración propuestas emplean las mejores tecnologías operativas disponibles en la actualidad. Los proyectos propuestos por Aguas del Almanzora S.A y la Comunidad de Regantes de Totana incluyen una serie de infraestructuras que persiguen tanto optimizar la gestión, la producción y consumo energético, como el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales, con el fin de incorporarlos de la mejor forma posible al riego agrícola.

Cartagena, a 22 de octubre de 2023

Los autores del informe:

Fdo.: José Francisco Maestre Valero
Dr. Ingeniero Agrónomo - Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Cartagena

Victoriano Martínez Álvarez
Dr. Ingeniero Agrónomo - Catedrático de la Universidad Politécnica de Cartagena

Referencias

- AEDyR, 2018. “Desalación en España en primera persona. De hitos pioneros a referente internacional”. Informe Asociación Española de Desalación y Reutilización.
- Arenas Urrea, S., Díaz Reyes, F., Peñate Suárez, B., de la Fuente Bencomo, J.A. 2019. Technical review, evaluation and efficiency of energy recovery devices installed in the Canary Islands desalination plants. *Desalination*, 2019, pp. 54–63.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W. 1985. Water quality for agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- CEDEX, 2021. Estudio del CEDEX sobre límite impuesto al boro en las aguas del post trasvase. Anexo VIII DEL Anexo III de la Propuesta de Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura (revisión para el tercer ciclo: 2022-2027). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- Fernández-Torquemada, Y., Sánchez-Lizaso, J.L. 2005. Effects of salinity on leaf growth and survival of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 320, 57–63.
- Hmong, 2022. Intercambiador de presión. Consulta en marzo de 2022 en https://hmong.es/wiki/Pressure_Exchanger.
- IDA, 2019. “IDA Water Security Handbook, 2018-2019”. Ed. GWI/IDA/Water Desalination Report.
- Imbernón-Mulero, A., Gallego-Elvira, B., Martínez-Alvarez, V., Martín-Gorriz, B., Molina-del-Toro, R., Jodar-Conesa, F.J., Maestre-Valero, J.F. 2022. Boron Removal from Desalinated Seawater for Irrigation with an On-Farm Reverse Osmosis System in Southeastern Spain. *Agronomy*, 12(3), 611
- Lenntech, 2022. Energy recovery turbochargers. Consulta en marzo de 2022 en <https://www.lenntech.com/Data-sheets/ERI-AT-L.pdf#page=2>.
- Maas, E.V., Grattan, S.R. 1999. Crop yields as affected by salinity, in: R.W. Skaggs, J. Van Schilfgaarde (Eds.), *Agricultural Drainage*. Number 38 in the Series *Agronomy*, (Madison, Wisconsin, USA).
- Martínez-Alvarez, V., Martín-Gorriz, B., Soto-García, M. 2016. Seawater desalination for crop irrigation — A review of current experiences and revealed key issues. *Desalination* 381, 58–70.
- Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, J.F., González-Ortega, M.J., Gallego-Elvira, B., Martín-Gorriz, B. 2019. Characterization of the Agricultural Supply of Desalinated Seawater in Southeastern Spain. *Water*, 11, 1233.

- Martínez-Alvarez, V., Gallego-Elvira, B, Maestre-Valero, J.F., Martín-Gorriz, B., Soto-García, M. 2020. Assessing concerns about fertigation costs with desalinated seawater in south-eastern Spain. *Agricultural Water Management*, 239, 106257
- Poseidon Water, 2022. The Carlsbad Desalination Project. Consulta en marzo de 2022 en <https://slideplayer.com/slide/9337829/>
- Requena Basildo, F.J. 2020. Estudio de optimización de costes energéticos en procesos de desalación de agua marina por ósmosis inversa. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Shtull-Trauring, E., Cohen, A., Ben-Hur, M., Tanny, J., Bernstein, N. 2020. Reducing salinity of treated waste water with large scale desalination. *Water Research*, 186, 116322.
- UPCT, 2018. Informe sobre la utilización de biorreactores con madera para desnitrificación de salmueras en el Campo de Cartagena. Cátedra de Agricultura Sostenible-Campo de Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Zarzo, D. 2017. Problemática y soluciones para la gestión y tratamiento de salmueras procedentes de Desaladoras. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.
- Zarzo, D. 2020. La Desalación del Agua en España. Estudios sobre la Economía Española - 2020/22.