



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS



Investigación de los indicadores de calidad de las aguas procedentes de desaladoras y de sus mezclas para uso de las mismas en el riego de diversos cultivos. Aspectos ambientales y de seguridad productiva y alimentaria

Rubén Moratíel Yugueros

Profesor Titular de Universidad

Departamento de Producción Agraria

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y Biosistemas

Madrid, Agosto 2017

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO.	4
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
3. 1. APLICACIONES DE RIEGO CON AGUA DESALINIZADA.	5
3. 2. EL PROBLEMA DEL PRECIO DEL AGUA DESALINIZADA PARA LA AGRICULTURA.	8
4. INDICADORES	11
4.1. SALINIDAD DEL AGUA	15
4.2. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS ESENCIALES (Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-}).....	19
4.3. PROBLEMAS DE INFILTRACIÓN DEL AGUA Y RIESGO DE SODICIDAD.....	24
4.4. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TÓXICOS (Na^+ , Cl^- y B^{3+}).....	27
4.5. OTROS TÓXICOS NO IMPORTANTES EN AGUAS DESALINIZADAS	33
4.6. ESTABILIDAD DEL AGUA.	34
4.5. APLICACIÓN INFORMÁTICA EN EXCEL® PARA MEZCLAS DE MASAS DE AGUA.	36
5. CONCLUSIONES	38
6. BIBLIOGRAFÍA.....	43
ANEXO I: TOLERANCIA A SALES DE LOS CULTIVOS AGRÍCOLAS (Fuente: FAO 56, Allen et al. 1998)	I.1

Índice de Tablas

Tabla 1.	Ventajas e inconvenientes del agua marina desalinizada sobre los cultivos (Martínez-Álvarez y Martín Górriz, 2014).....	2
Tabla 2.	Variables y parámetros de medida que definen la calidad del agua de riego desde el punto de vista químico. (Aragües, 2011)	12
Tabla 3.	Rendimiento medio de las membranas de ósmosis inversa en plantas desaladoras (Hernández, 2007).....	13
Tabla 4.	Valores Normales de Análisis de agua de riego según FAO (Ayers y Westcost, 1985).....	14
Tabla 5.	Tolerancia relativa de los cultivos a la salinidad (Ayers and Westcot, 1985).	17
Tabla 6.	Relación entre la Conductividad eléctrica del suelo a extracto de saturación (CEe), la conductividad del agua de riego (CEar) y la Fracción de Lavado (FL). CEe = CEar · X, en función de FL.	17
Tabla 7.	Valores medios de propiedades químicas del agua tras el proceso de remineralización. (Hernández 2017a)	22
Tabla 8.	Clasificación de suelos en función de variables químicas relacionadas con el extracto de saturación de suelo.	25
Tabla 9.	Riesgos potenciales a medio –largo plazo sobre la estructura de un suelo debido al SAR y a la CE (Ayers y Westcot, 1985).	26
Tabla 10.	Valores referencias para la evaluación preliminar de la aptitud del agua para el riego en función de los iones de Na ⁺ y Cl ⁻ (Ayers y Westcot, 1985)	29
Tabla 11.	Tolerancia relativa de algunos cultivos al riego por aspersión con aguas de diferentes concentraciones de iones Na ⁺ y Cl ⁻ (Ayers y Westcot, 1985).....	29

Tabla 12.	Concentraciones de Boro en el extracto saturado del suelo y sensibilidad de diferentes especies. (Ayers y Westcot, 1985). Se considera que la concentración de extracto saturado de suelo es similar a la concentración del agua de riego.	31
Tabla 13.	Concentraciones de sensibilidades al Boro. El primer nombre del grupo es el más tolerante y a medida que se desciende es el menos tolerante (Guy Fipps, 1996).....	31
Tabla 14.	Rangos por encima de los cuales los vegetales pueden presentar toxicidad de otros elementos. Elementos sin importancia en el agua desalinizada bajo condiciones trabajo normales pero que pueden aparecer en masas de aguas de mezclas con otras fuentes de agua de peor calidad (aguas regeneradas). 33	
Tabla 15.	Rango de calidades para la remineralización de aguas desaladas encontradas normalmente en la práctica (Hernández 2017b).	35

Índice de Figuras

Fig. 1.	Clasificación de los diferentes cultivos a la tolerancia a las sales. (Ver Anexo I)	16
Fig. 2.	Disponibilidad de nutrientes para las plantas en función del rango de pH (Moratiel , 2017)	21
Fig. 3.	Proporciones de los iones de agua de mar y osmotizada. Adaptado de Hernández (2007)	28
Fig. 4.	Aspecto visual del primer bloque que muestra la aplicación AEAR, diseñada específicamente para este proyecto.	37
Fig. 5.	Aspecto visual del segundo bloque que muestra la aplicación AEAR, diseñada específicamente para este proyecto.	37

ABREVIATURAS

AEAR	Aplicación para la Estimación de la Aptitud del Agua de Riego
CEIGRAM	Centro de Estudios para la gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales
CE	Conductividad Eléctrica
CE _{ar}	Conductividad Eléctrica del agua de riego.
CE _e	Conductividad Eléctrica a extracto de saturación del suelo
CE _{eumbral}	Conductividad Eléctrica a extracto de saturación del suelo umbral para un determinado cultivo.
CCPP	Potencial de Precipitación del Carbonato Cálcico
CSW	<i>Continental Surface Water</i>
DSW	<i>Desalinated Sea Water</i>
DBW	<i>Desalinated Brackish Water</i>
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
LSI	Índice de Langerier
FL	Fracción de Lavado
MAPAMA	Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente
OI	Ósmosis inversa
OMS	Organización Mundial de la Salud
PSI	Porcentaje de Sodio Intercambiable
PTEA	Plataforma Tecnológica Española del Agua
ROSW	<i>Reverse Osmosis Sea Water</i>
ROBW	<i>Reverse Osmosis Brackish Water</i>
SAR	Relación de Absorción de Sodio
sDSS	<i>Spatial decision Support System</i>
STD	Sólidos Totales Disueltos
ψ_h	Potencial hídrico.

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento se ha elaborado bajo un convenio suscrito entre el FORO AGRARIO y el CEIGRAM (Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales) con título de *Investigación de los indicadores de calidad de las aguas procedentes de desaladoras y de sus mezclas para uso de las mismas en el riego de diversos cultivos. Aspectos ambientales y de seguridad productiva y alimentaria.*

Considerando la cantidad de agua extraída del sistema hidrológico para cada uso, la agricultura se posiciona como el primero en porcentaje de utilización, con un 65% respecto al total. El sector de Energía, Urbano e Industrial se sitúan detrás de este sector con un uso del 17%, 15% y 3 % respectivamente. Esta cantidad utilizada presenta una tendencia estable de cara al futuro. El sector agrícola en España representa un 2% del PIB y emplea a un 4% de la población activa del país. Por cada metro cúbico de agua extraído para agricultura se genera la cifra de 0,85€ (PTEA, 2015).

La tierra es rica en agua, aproximadamente el 70 % de la superficie. El 97,25 % de esa agua se encuentra en los océanos, un 2,05 % se encuentra en los glaciares y en forma de hielo, el 0,68 % se encuentra en las capas del subsuelo, en los lagos un 0.01 % y en ríos y arroyos un 0.0001% (Physical Geography, 2017). El agua que se puede utilizar para cultivos es menos de un 1%, aunque es un recurso abundante en la tierra la calidad del agua para el uso del riego es muy limitada, ya que el agua salada de los océanos no es apta para cultivar.

Desde el punto de vista de países que lideran la desalinización de agua de mar se encuentran los países del medio oriente como Arabia Saudí donde cuatro de los cinco litros que consumen procede de agua desalada. Países como Emiratos Árabes, Libia, Kuwait, Qatar, Estados Unidos, Japón, España e Israel también son países que utilizan en gran medida la desalinización de agua. En España se instala la primera desalinizadora de Europa en las islas Canarias, en el año 1964 y se ubicó en Lanzarote. Posteriormente, en el año 1993 se puso en marcha la primera instalación de osmosis inversa en Cabo de Gata

(Fundación Aquae, 2017). El Programa A.G.U.A. (Actuaciones para la Gestión y la Utilización del Agua), se creó en el año 2004 con el fin de gestionar la política del agua y entre sus pilares más importantes está el de la desalinización del agua.

La técnica de desalinización que más se ha generalizado es la osmosis inversa debido a sus costes de producción y consumos energéticos comparados con otras técnicas (Martínez Beltrán y Koo Oshima, 2006). *La Ósmosis inversa es "una tecnología de purificación del agua que utiliza una membrana semipermeable para eliminar iones, moléculas, y partículas más grandes del agua potable. Para lograr la ósmosis inversa se aplica una presión para vencer la presión osmótica, que es una propiedad coligativa producida por diferencias de potencial químico del solvente"*

La incorporación de agua marina desalinizada para el riego suele aplicarse fundamentalmente en aquellos países áridos y semiáridos con una agricultura muy tecnificada y desarrollada. Los principales países donde más se han desarrollado estas tecnologías aplicadas a los cultivos son España e Israel. En España es importante destacar en este sentido a las Islas Canarias. Como principal ventaja de la desalinización de agua marina es la disponibilidad inagotable del recurso hídrico, pero como principal inconveniente es el elevado consumo energético. En la Tabla 1 se exponen las ventajas e inconvenientes de la utilización de agua marina desalinizada sobre los cultivos.

Tabla 1. Ventajas e inconvenientes del agua marina desalinizada sobre los cultivos (Martínez-Álvarez y Martín Górriz, 2014)

Ventajas	Inconvenientes
Disponibilidad Inagotable del recurso hídrico	Elevado consumo energético
	Emisiones de efecto invernadero
Baja salinidad del agua	Carencias y desequilibrios nutricionales de las aguas
	Elevada concentración de Boro
	Elevada acidez y poder corrosivo
	La calidad de agua para el riego no está regulada

Con relación a la ventaja enumeradas en la Tabla 1 (disponibilidad inagotable de recurso hídrico) cabe destacar que recientemente el MAPAMA invertirá 11,4 millones de euros para aumentar el rendimiento de 6 desaladoras: Alicante I, Alicante II, Torrevieja, San Pedro del Pinatar, Valdelentisco y Águilas. Esta medida ha venido condicionada por la sequía que se lleva produciendo en los últimos meses (MAPAMA 2017).

2. OBJETIVO.

El principal objetivo del trabajo se centrará en estudiar sobre la calidad del agua procedente de la plantas desaladoras para su posible utilización para el riego de diferentes cultivos. Se estudiará la calidad del agua del riego desde un punto de vista estrictamente agronómico y se identificarán los problemas asociados a su utilización así como las posibles soluciones que se podrían proponer. Paralelamente se realiza una revisión bibliográfica para detectar la situación del tema objeto del trabajo.

Debido a la casuística tan dispar que se puede producir en la variable y rica agricultura española, en función del agua utilizada y su cultivo se ha realizado una aplicación informática llamada *Aplicación para la Estimación de la Aptitud del Agua de Riego (AEAR)* que permite obtener una recomendación a medida y cumplir de una forma muy dinámica las posibles soluciones de mezclas de aguas. Tal como indica la aplicación generada los datos son sólo una indicación y la tolerancia de ese cultivo al agua seleccionada varía dependiendo del clima, condiciones del suelo y prácticas culturales. Además conviene destacar que no se dispone de la orientación para todos los cultivos.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Dentro de la desalinización del agua es necesario conocer la procedencia y características de todas las aguas que se engloban dentro del paraguas de “aguas desaladas”. Por un lado están las aguas que se obtienen tras el proceso de osmosis inversa (OI). Estas aguas son aguas que obtienen directamente tras el proceso de OI y que no reciben ningún tratamiento posterior. Estas aguas son caracterizadas por una muy baja mineralización. Así mismo, estas aguas en función de su procedencia se pueden dividir en: Agua marina o Agua salobre (aguas continentales con alta salinidad pero inferior al agua de mar). Así distinguimos dos tipos: Agua Marina Osmotizada (ROSW, *Reverse Osmosis Sea Water*) y Agua Salobre Osmotizada (ROBW, *Reverse Osmosis Brackish Water*). Por otro lado se encuentra el agua que, una vez que se ha obtenido mediante el proceso de OI, se somete a tratamientos posteriores de remineralización hasta las concentraciones deseadas o vigentes. Al igual que el caso anterior se obtiene: Agua Marina Desalinizada y remineralizada (DSW, *Desalinated Sea Water*) y Agua salobre desalinizada y remineralizada (DBW, *Desalinated Brackish Water*). Por último podemos considerar el agua continental en la zona de riego o Agua de Origen Superficial (CSW, *Continental Surface Water*).

3. 1. APLICACIONES DE RIEGO CON AGUA DESALINIZADA.

El agua desalinizada se ha convertido recientemente en una fuente de riego (Yermiyahu *et al.*, 2007; Martínez Álvarez *et al.*, 2016; Martínez-Alvarez *et al.*, 2017). El riego se estima que extrae el 70% de agua dulce a nivel mundial y se usa el 80-90 % del agua dulce (Foley *et al.*, 2011). Hay autores que indican que los recursos de agua dulce pueden llegar a ser insuficientes para satisfacer las demandas agrícolas (Bar-Tal *et al.*, 2017).

Dentro de los estudios realizados sobre la utilización de agua desalinizada destacan los países de Israel y España como aquellos donde se ha realizado un desarrollo mayor. Aunque las tecnologías han evolucionado dentro del campo de la desalinización del agua

todavía, a día de hoy, no hay estudios con periodos de tiempo representativos del uso de este tipo de agua para la agricultura, sobre todo en España. Quizás porque en muchos casos esta agua sólo se emplea como apoyo a periodos de carencia de agua prolongada con lo que su uso no es constante (Zarzo *et al.*, 2013).

España es un país con alta experiencia en desalinización de agua salobre para riego agrícola. Zarzo *et al.* (2013) realizaron uno de los primeros estudios en agua desalada sobre los cítricos. Ellos reportaron que los cítricos que se regaban con agua desalinizada en vez de con agua de pozo salobre de 5 -7 mS/cm o agua superficial de 1.2 a 2,2 mS/cm incrementaban la producción en un 50 % respecto al agua salobre y un 10 % respecto al agua superficial. Además los autores también observaron una reducción de necesidades de agua respecto al agua salobre del 20%.

En Canarias destaca el estudio de Díaz *et al.* (2013), aunque este estudio se realiza durante un periodo de tiempo largo entre 5 y 30 años (dada la tradición del uso de agua desalada en Lanzarote), sólo se analiza cómo afecta el uso de la utilización de agua desalinizada sobre los suelos centrándose en la relación de adsorción de sodio, contenido en boro y fertilidad del suelo. Los resultados obtenidos por las condiciones de los suelos volcánicos de la Isla, hacen que el agua desalada aumente la salinidad de los suelos entre dos y tres veces y las concentraciones de boro entre 1.8 y 1.9 veces respecto a los suelos control que no son suelos regados.

En Israel, más del 50% de todo el agua de riego se origina en aguas residuales efluentes o aguas subterráneas salobres que se caracterizan por concentraciones significativas de sales disueltas (Qadir *et al.*, 2010). Es el país que más ha trabajado en el uso del agua desalinizada en cultivos. Uno de los primeros estudios en analizar los problemas asociados a la aplicación del agua desalinizada en cultivos fue el estudio de Yermiyahu *et al.* (2007) donde observó que la aplicación de agua desalinizada a cultivos como tomates, albaca y ornamentales provocaba una deficiencia en Magnesio en los cultivos, y una deficiencia en Azufre (para cultivos exigentes en este elemento). Estos problemas de equilibrios de magnesio en las disoluciones nutritivas utilizadas para tomate regado con agua desalinizada también han sido tratados por Bar-Tal *et al.* (2017). Otros autores como

Silber *et al.* (2015) identificaron los aumentos de producción tras la aplicación de agua desalada a plantaciones de bananas. En ellos observaron que prácticamente se obtenían las mismas producciones con aplicaciones de riego que en volumen eran la mitad en el agua desalada (2086 mm de fuente convencional frente 1060 mm de agua desalada con rendimientos de manojo por planta de 24.6 kg y 25.1 kg respectivamente). Las conductividades eléctricas medidas (suelo: agua, 1:2) en estas condiciones de ensayos fue alrededor de 0.8 dS/m para aguas convencionales y 0.35 dS/m para las agua desaladas.

Raveh y Ben-Gal (2016) han citado el problema que tiene la agricultura Israelí en cuanto a la salinización de sus suelos por el uso de aguas de mala calidad y consideran que la desalinización del agua es una posible solución no solo para obtener producciones de alta calidad y rendimientos sino para poder revertir esta tendencia de los suelos en un futuro cercano.

Muy pocos estudios, para nuestro conocimiento, se han realizado en la solución de la mezcla de aguas desalinizadas como alternativa a la mejora de la calidad de agua y la rentabilidad. Ben –Gal et al. (2009) realiza un estudio en Israel sobre pimiento cultivado en invernadero y llegan a la conclusión que el incremento de producción de la utilización de un agua de 0.40 dS/m (desalinizada) respecto al agua de las fuentes utilizadas de 3.20 dS/m es de más de un 50 % . Ellos indican que el agua desalinizada debe ser remineralizada con calcio, magnesio y azufre y eso supone un coste adicional de 3500 €/ha por lo que la rentabilidad de esa agua desalinizada se pone un duda. Los autores indican que la situación óptima es de la mezcla de aguas compuesta en su estudio por 70 % de agua desalinizada y 30 % salina que produciría un agua de 1.35 dS/m donde la rentabilidad y desarrollo del cultivo sería el óptimo.

Aunque existen estudios en otros países como EEUU, Australia, Kuwait y Marruecos estos son estudios de prospección, costes y situación futura en el país por el uso del agua desalinizada para el riego en agricultura, pero no se tienen datos de la repercusión del uso de esa agua a los cultivos. Desde un punto de vista general cabe destacar el documento elaborado por la FAO en la reunión de expertos en 2004, donde indican que el uso de esta agua se limita casos muy concretos con cultivos de alto valor añadido o con

subvenciones públicas que hagan rentable su empleo (Martínez- Beltran y Koo- Oshima, 2006) .

3. 2. EL PROBLEMA DEL PRECIO DEL AGUA DESALINIZADA PARA LA AGRICULTURA.

La desalinización, gracias a que la tecnología de osmosis inversa ha avanzado mucho en los últimos años, se ha vuelto económicamente factible y se puede ver como una solución para el riego. Esto cobra un especial interés en las regiones secas donde los costes de producción y precios de agua pueden ser muy altos o incluso el agua no este disponible. Aunque los costes de la desalinización pueden ser todavía excesivos para la mayoría de la agricultura de regadío, el uso de agua desalinizada ha sido validado a precios actuales tales como hortalizas y flores de invernadero (Martínez - Beltrán *et al.*, 2006). Es importante destacar que el coste de agua desalinizada depende en gran medida del tamaño de la planta desalinizadora así como de la calidad de agua (sales disueltas) a la entrada en la planta. Así lo refleja en su estudio Sarari Atab *et al.* (2016) exponiendo que el coste de m^3 de una planta desalinizadora muy pequeña ($50 m^3$ al día) puede ser $4.7 GBP/m^3$ mientras que un planta de similares característica de agua en la entrada de $46000 m^3/día$ puede estar en torno a $0.17 GBP/m^3$ (en el estudio se considera $1GBP = 1.37 €$). El estudio considera aguas salobres de $5000 ppm$ por lo que el agua de mar considerablemente aumentaría este coste.

En los últimos años se está empezando a analizar los umbrales de rentabilidad de determinados cultivos en función del precio de agua desalinizada, así Barron *et al.* (2015) cita que los agricultores australianos no pagarían más de $1 \$$ australiano por m^3 de agua (en el momento de estudio los agricultores pagaban $0.18 -0.50\$$ australianos por m^3 de otras fuentes).

En California (EEUU) Welle *et al.* (2017) indica en su estudio que la desalinización del agua en el Valle Central de California sólo sería rentable en el 4% del Valle y tras una severa sequía. Además los autores indican que realmente los costes de desalinización deberían reducirse entre un 70-90 % para que fuera una opción a considerar por el agricultor. El precio medio que han barajado los autores para realizar estos cálculos ha sido de $1 \$/m^3$,

precio considerado considerablemente elevado en nuestras condiciones, pero que los autores justifican por la gestión de los volúmenes de la salmuera que provocan precios de rangos de 0.4 a 1.8 \$/m³.

En España Zarzo *et al.* (2013) fue uno de los primero que señaló que en determinados cultivos es posible afrontar el coste de agua desalinizada con márgenes razonables. Más recientemente en España, Martínez-Álvarez *et al.* (2017) indican que cultivos en invernadero como pimiento y tomate con un margen neto de 1.99 €/m³ y 2.42 €/m³ respectivamente, se sitúan muy por encima del coste del agua desalinizada fijada en torno a 0.5 €/m³. Otros cultivos como el melocotonero (con margen neto de 0.65 €/m³) o lechuga (0.68€/m³) se encuentran en el límite de la rentabilidad. Sin embargo cultivos como cítricos o brócoli se encuentran muy por debajo de la rentabilidad con agua desalada, con valores de margen neto de 0.36 y 0.30 €/m³ respectivamente. Calatrava y Martínez-Granados (2012) encontraron valores marginales del agua para toda la cuenca entre valores de 0.52 y 0.81 €/m³, aunque hay una variación en función de las zonas. Aparicio *et al.* (2017) realiza un estudio de pequeñas plantas desalinizadoras de agua salobre para cítricos en Campo de Cartagena donde demuestra que su rentabilidad depende de la planta desalinizadora, así como la composición de agua en la entrada en la planta desalinizadora. Herramientas recientes han sido realizadas para conocer la rentabilidad de un determinado cultivo bajo aplicación de agua desalinizada. Kaner *et al.*, (2017), desarrolla una aplicación muy local detectando el problema de que los parámetros utilizados para su cálculo son limitados, centrándose fundamentalmente en la conductividad eléctrica del agua. Herramientas para la decisión a una escala mayor han sido desarrollados muy recientemente con un nuevo sistema espacial de apoyo a la decisión (sDSS) para optimizar el uso de agua desalinizada para la agricultura en una región (Multsch *et al.*, 2017) en Arabia Saudí.

En los últimos años tras la preocupación de los precios y gastos energéticos existen algunos estudios con la finalidad de vincular los sistemas de desalinización con sistemas fotovoltaicos de captación de energía (Jones *et al.*, 2016; Perakis *et al.*, 2017).

El precio del agua desalinizada siempre se ha visto y se sigue viendo como el problema más grande a la hora de implementar este sistema en la agricultura. Aznar –Sánchez *et al.* (2017) en una encuesta dirigida a los agricultores de la zona de Nijár identificó que no sólo es el precio uno de los factores que más les preocupa a la hora de adoptar este sistema, sino todo lo relacionado con la producción de sus cosechas y la calidad del agua de riego, teniendo una percepción negativa de la misma.

4. INDICADORES

La calidad del agua para el riego se puede clasificar desde diferentes puntos de vista: físicas, biológicas y químicas.

- Físicas: problemas causados por sólidos en suspensión produciendo sedimentación y problemas en obturación de goteros. Generalmente estos problemas físicos no son graves y se solucionan con hidrociclones y diferentes filtros en los cabezales de riego.
- Biológicos: problemas causados por agentes patógenos como bacterias y/o nematodos. Estos problemas se suelen dar en aguas que proceden de aguas residuales y donde la Organización Mundial de la Salud (WHO, 1996) marca unos niveles de estos patógenos en función del sistema de riego y el cultivo.
- Químicos: Problemas causados por la cantidad y calidad de las sales que están disueltas en el agua de riego.

Desde el punto de vista agronómico siempre se ha prestado una mayor atención a las propiedades químicas, ya que los problemas asociados a agentes físicos y biológicos en la mayoría de los casos son más fáciles de erradicar. También, para el caso de las aguas procedentes de las plantas desaladoras el problema fundamental se centra en las características químicas del agua para el riego.

La aptitud del agua para el riego depende de diferentes variables directas o indirectas (Aragües, 2011). En la Tabla 2 se exponen las variables y parámetros de medida que la definen. Estas variables son las que establecen en gran medida la calidad de la solución del suelo, que es la variable determinante de la respuesta de cultivos y suelos. En cultivos hidropónicos la solución del suelo con relación al agua de riego tiene una variación mucho menor. Aragües indica que *"las clasificaciones de la calidad basadas únicamente en las variables directas o analíticas del agua de riego no proporcionan la información suficiente para establecer su aptitud de uso ya que otras variables indirectas (evapotranspiración, sistema y manejo del riego) son determinantes en la calidad final de la solución del suelo."*

Además la aptitud de un agua depende de la tolerancia de los cultivos y suelos a dicha calidad. Por tanto, la aptitud de un agua de riego es **ambiente dependiente**".

Tabla 2. Variables y parámetros de medida que definen la calidad del agua de riego desde el punto de vista químico. (Aragües, 2011)

VARIABLES DIRECTAS	PARÁMETRO DE MEDIDA
Salinidad	Conductividad eléctrica (CE, dS/m)
Sodicidad	Relación de absorción de Sodio (RAS, (mmol/L) ^{0,5})
Alcalinidad	pH
Toxicidad iónica específica	Concentraciones de Na, Cl y B

VARIABLES INDIRECTAS	PARÁMETRO DE MEDIDA
Tolerancia de los cultivos a la Salinidad	CE _e umbral, Pendiente
Tolerancia de los Suelos al efecto combinado de la salinidad, sodicidad y alcalinidad	CE, RAS (o RAS ajustado), pH
Riego	Sistema de riego, Fracción de lavado
Clima	Precipitación, Evapotranspiración, Déficit hídrico

Existen numerosas técnicas de desalación de agua: Adsorción, depuración química (precipitación), cambio iónico, electrodiálisis, extracción con disolvente, congelación, evaporación y ósmosis inversa (Chillón Arias, 2009). En los últimos años la tecnología derivada de los procesos de ósmosis inversa (OI) han evolucionado mucho hasta el punto de ser la técnica más utilizada en las plantas desalinizadoras. La ósmosis es un proceso natural que ocurre en todas las células vivas que hace que el agua fluya de zonas más puras a zonas de mayor concentración de sales hasta que su potencial hídrico (ψ_h) se compense. La OI es el fenómeno que invierte este proceso natural y hace que aplicando una presión superior a la presión osmótica del agua salada y pasándolo por una membrana semipermeable se obtiene el agua libre parcialmente de sales. En la Tabla 3 se expone la eliminación de las sales en una planta desaladora. En todos los casos el

rendimiento para la eliminación de las sales se encuentra en valores del por encima del 90 % y muy cercanos al 99%, excepto en el Boro que se encuentra en valores más próximos al 76%. Si se observa la proporción de las sales de cada agua (entrada y salida) tienen un perfil muy parecido aunque en el agua desalinizada (salida) los porcentajes de sulfatos, calcio y magnesio se encuentran en valores un poco inferiores. Los cloruros y potasio más o menos se mantienen constantes. Sodio y Boro aumentan, sobre todo el Boro. El bicarbonato aumenta también considerablemente respecto al dato relativo. El pH del agua salina varía entre 7,5 y 8,4 en función de temperatura y profundidad entre otros factores y el pH de la salida suele tener valores entre 4,2 y 6,2, es decir, más ácidos que el agua de mar. Estos desajustes en las sales que se obtienen en el agua osmotizada (salida) hace que se “coloque” el agua en valores que no son deseables para la agricultura. Además, es importante considerar que parte de las sales, que las aguas continentales tienen, funcionan como nutrientes para las plantas por lo que supondría un coste adicional su incorporación (Ben-Gal, et al. 2009). Posteriormente a la OI se suele realizar una remineralización del agua procedente de las membranas el contenido de sales y pH se reajustan.

Tabla 3. Rendimiento medio de las membranas de ósmosis inversa en plantas desaladoras (Hernández, 2007).

Variable	Entrada (mg/L)	Salida (mg/L)	Rendimiento (%)	Entrada (% de sales respecto al total)	Salida. (% de sales respecto al total)
STD	35079	367	99.0	100	100
Sulfatos	2712	11	99.6	7.7	3.0
Magnesio	1290	6	99.5	3.7	1.6
Calcio	412	2	99.5	1.2	0.5
Potasio	399	4	99.0	1.1	1.1
Cloruro	19354	208	98.9	55.2	56.7
Sodio	10770	128	98.8	30.7	34.9
Bicarbonatos	142	8	94.4	0.4	2.2
Boro	4.5	1.1	75.6	0.01	0.3

La calidad de agua para el riego de cultivos ha sido estudiada ampliamente. En el año 1985 la FAO publica unos estándares (Tabla 4) en los cuales los cultivos se desarrollan de

forma óptima, aunque esto dependerá también de la especie a cultivar (Ayers y Westcost, 1985)

Tabla 4. Valores Normales de Análisis de agua de riego según FAO (Ayers y Westcost, 1985)

VARIABLES	UNIDADES	RANGO
SALINIDAD		
Conductividad Eléctrica	CE (dS/m)	0-3
Total de sólidos en solución	ST (mg/l)	0-2000
Calcio	meq/l	0-20
Magnesio	meq/l	0-5
Sodio	meq/l	0-40
Carbonatos	meq/l	0-0.1
Bicarbonatos	meq/l	0-10
Cloruros	meq/l	0-30
Sulfatos	meq/l	0-20
NUTRIENTES		
Nitrógeno (Nitrato)	mg/l	0-10
Nitrógeno (Amonio)	mg/l	0-5
Fósforo (Fosfato)	mg/l	0-2
Potasio	mg/l	0-2
OTROS		
Boro	mg/l	0-2
pH	-	6-8.5
RAS	-	0-15

Como se puede observar en un principio por comparación entre la Tabla 3 y Tabla 4 el agua procedente de las desaladoras es apta para el riego. Aunque el agua es apta para el riego, es necesario considerar algunos aspectos relacionados a las especies vegetales o al coste que puede suponer remineralizar el agua para una calidad óptima.

También es necesario conocer cada situación indicando siempre la especie a cultivar, el sistema de aplicación del agua de riego, el suelo en el que se encuentra y, partiendo de estas premisas, ajustar esa calidad requerida del agua de riego. A continuación se pasan a describir los aspectos más importantes a considerar en el agua desalinizada, muchos

autores han tratado estos parámetros como claves (Martínez Alvarez *et al.* 2017; Hernández 2017a)

4.1. SALINIDAD DEL AGUA

La salinidad del agua de riego es el principal parámetro de la calidad de agua que afecta sobre los cultivos. La salinidad del agua de riego se cuantifica por la conductividad eléctrica o por la concentración de sales que se relacionan según la Expresión 1.

$$Cs = 0.64 \cdot CE \quad (1)$$

Donde: EC es la Conductividad Eléctrica en dS/m

Cs es la concentración de Sal en g/l

Según Eyars y Westcost (1985) se establecen unas categorías de agua en función de la Conductividad eléctrica:

- $CE < 0.7$ dS/m \rightarrow Sin restricción para el riego
- 0.7 dS/m $> CE > 3.0$ dS/m \rightarrow Restricción Moderada
- > 3.0 dS/m \rightarrow Restricción Severa.

La tolerancia de los cultivos a la salinidad se cuantifica en función de la variable de la CEe umbral, que es la conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo por encima del cual el cultivo desciende su rendimiento, y de la pendiente que es el porcentaje de descenso lineal del rendimiento del cultivo por incremento unidad de la CEe por encima del CEe umbral (Expresión 2).

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - (CEe - CEe_{umbral}) \cdot \frac{b}{100} \quad (2)$$

Dónde: Y_a = Rendimiento Real (kg/ha)

Y_m = Rendimiento potencial sin limitación por sales (kg/ha)

EC_e = Conductividad Eléctrica en extracto de saturación dS/m

$EC_{eumbral}$ = Conductividad Eléctrica en extracto de saturación umbral dS/m

b = Pendiente de descenso de rendimiento por cada incremento de una unidad de la CEe

En definitiva, **la tolerancia de los cultivos a la salinidad determina en gran medida la aptitud de un agua para el riego**, ya que cuanto más tolerante es un cultivo pueden utilizarse aguas más salinas sin descenso de producción. Eyars y Westcost (1985) en su publicación de la FAO dan valores de $CE_{eumbral}$ y de pendientes de acuerdo con la Expresión 2 pero para una fracción de lavado (FL) del orden de 0.15-0.20. La FAO con esta fracción de lavado asume que la CE de extracto de saturación del suelo (CE_e) es igual a 1.5 veces la Conductividad Eléctrica del agua de riego (CE_{ar}). La CE_{max} es la definida como la CE en el Extracto de saturación del suelo tan elevado que no se puede obtener una cosecha por mínima que sea en ese cultivo.

En el **Anexo I** se exponen los coeficientes de $CE_{eumbral}$, las pendientes Conductividad Máxima y la Clase de Tolerancia de los diferentes cultivos (Allen *et al.* 1998). Se puede apreciar como por regla general las hortícolas son más sensible que los cereales.

En la Fig.1 y Tabla 5 se observan cómo se distribuyen los diferentes cultivos en función de la tolerancia a la salinidad con una fracción de lavado de 0.15-0.2.

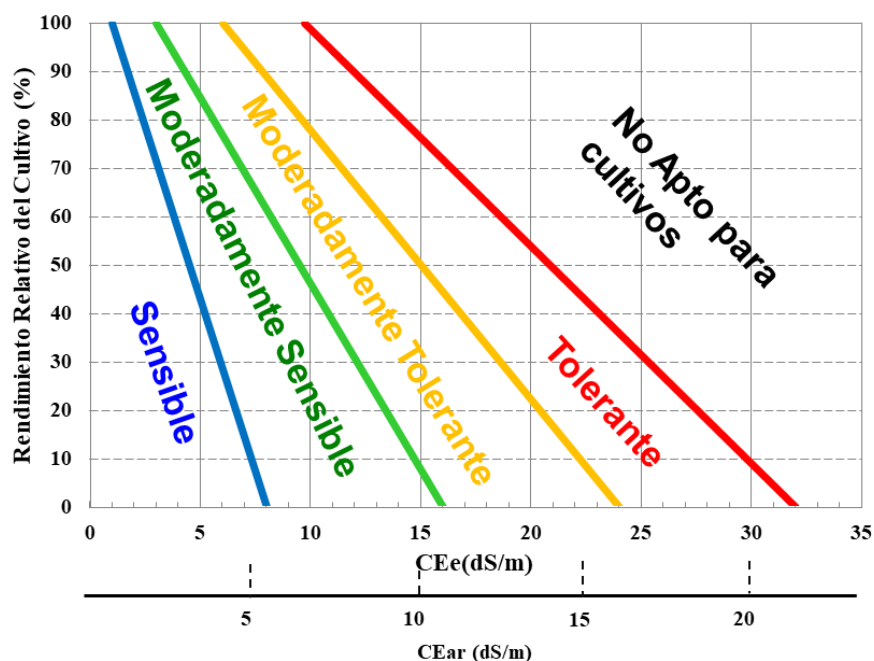


Fig. 1. Clasificación de los diferentes cultivos a la tolerancia a las sales. (Ver Anexo I)

Tabla 5. Tolerancia relativa de los cultivos a la salinidad (Ayers and Westcot, 1985)

Tolerancia relativa de los cultivos a la salinidad	Salinidad del suelo a extracto de saturación (EC _e) en el que empieza la pérdida de rendimiento
Sensible	< 1.3 dS/m
Moderadamente sensible	1.3 – 3.0 dS/m
Moderadamente Tolerable	3.0 – 6.0 dS/m
Tolerante	6.0 – 10.0 dS/m
Inadecuado para la mayoría de los cultivos (a menos que el rendimiento reducido sea aceptable)	> 10.0 dS/m

Los estudios que se han realizado se basan principalmente para la determinación de la CE_e, ya que es el volumen donde las raíces de la plantas se desarrollan, pero evidentemente hay una relación con la CE_{ar}. Esta relación está fuertemente condicionada por la fracción de Lavado tal como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Relación entre la Conductividad eléctrica del suelo a extracto de saturación (CE_e), la conductividad del agua de riego (CE_{ar}) y la Fracción de Lavado (FL). $CE_e = CE_{ar} \cdot X$, en función de FL.

Fracción de lavado (FL)	Agua aplicada necesaria (Porcentaje de ET _c)	Factor de Concentración (X)
0.05	105	3.2
0.10	111	2.1
0.15	118	1.6
0.20	125	1.3
0.25	133	1.2
0.30	143	1.0
0.40	167	0.9
0.50	200	0.8
0.60	250	0.7
0.70	333	0.6

El manejo es un factor clave a la hora de determinar si un agua es apta para el riego con una determinada CE_{ar}, ya que para una determinada CE_{ar} en función de la FL la CE_e cambia considerablemente. Es decir, para un agua con una CE_{ar} a mayor FL la CE_e es menor por lo que las especies “no notarían” el efecto de la salinidad.

Desde el punto de vista de Calidad de agua desalada los valores de la conductividad eléctrica de las aguas desalinizadas se sitúan todos por debajo de 0.7 dS/m o 448 mg/l, por lo que no existe problema para ninguna especie desde el punto de vista de salinidad del suelo y afección a cultivos. Comparadas con aguas superficiales de una buena calidad no tiene un efecto positivo la baja CE del agua desalada. Pero, si lo comparamos con valores de CE_{ar} más alto (caso muy generalizado en países semiáridos como el nuestro) llevaría asociado un incremento de la producción para algunos cultivos más sensibles como los que fueron reportados por Zarzo *et al.* 2013 en naranjo, Ben-Gal *et al.* 2009 en pimientos o Silber *et al.* (2015) en bananas. Los valores de plantas desaladas se suelen situar en torno a 0.5 dS/m de CE_{ar} (Martinez-Alvarez *et al.* 2017). De cualquier forma es necesario conocer con análisis la calidad de esa agua ya que en función de la remineralización del agua puede cambiar ligeramente (Hernández, 2017).

Es conveniente resaltar que la baja CE_{ar} permitía un uso más eficiente del agua ya que la FL sería mucho menos y el manejo del agua sería más eficiente (menor volumen de agua necesaria). Por otro lado, los riegos en invernadero con fertirrigación y soluciones nutritivas a medida para los cultivos, se puede considerar el agua es ideal, ya que se parte de un agua prácticamente "pura" que permite incorporar el tipo y cantidad de sales necesarias sin miedo a situarse en CE_{ar} demasiadas elevadas para el cultivo. Aunque esta última característica tiene el inconveniente del incremento del coste de fertilización al agricultor por incorporación de fertilizantes en mayor medida para compensar esas deficiencias en elementos que el agua con una mayor CE suele tener (Ben-Gal *et al.* 2009)

Es posible obtener una indicación de la calidad del agua simplemente con la variable de la CE, pero es importante también considerar las concentraciones de determinados iones como Na^+ , Cl^- y B^{3+} . También es necesario conocer el manejo ya que la fracción de lavado (FL) aplicada es determinante para su evaluación (ver apartado 4.4)

4.2. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS ESENCIALES (Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-})

El Calcio, Magnesio y Azufre se consideran macronutrientes en las plantas y sin estos elementos las plantas no podrían completar su desarrollo y no es posible su sustitución por otro elemento. Los porcentajes de peso seco que se encuentran en las plantas son del 0.5 % para el Ca, 0.2% para el Mg y 0.1% para el S (Alcántar-González y Trejo-Tellez, 2007). Las funciones de estos elementos en las plantas desde un punto de vista general se puede resumir como (Moratiel, 2017):

Azufre (S): Se encuentra en muchas proteínas e interviene en reacciones de intercambio de energía como el P. Se absorbe en forma de sulfatos (SO_4^{2-}) por las raíces aunque puede tomarlo en forma de gas SO_2 a través de las hojas pero este no es suficiente para cubrir sus necesidades. Suele encontrarse la mayor parte de S en la fracción orgánica del suelo y su comportamiento en el suelo es similar al nitrógeno. El ión sulfato no es retenido por la solución del suelo, como ocurre con el P, y normalmente existe un transporte de en la solución del suelo a la rizosfera.

Calcio (Ca): Importante en la división celular y estabilidades de la membrana y pared celular, también es asociado a determinadas proteínas. El calcio (Ca^{2+}) en el suelo se encuentra como fracción absorbida por el complejo de intercambio catiónico del suelo y el la solución del suelo. El movimiento del Ca^{2+} en la solución del suelo hacia la rizosfera suele ser muy superior a la absorción de la planta.

Magnesio (Mg): Componente de la clorofila y se encuentra presente como cofactor o activador de muchas reacciones enzimáticas, también participa en la transferencia de energía ATP. El magnesio (Mg^{2+}) en el suelo suele encontrarse como fracción absorbida del complejo de intercambio catiónico del suelo y la solución del suelo (similar al Ca^{2+}).

Las agua naturales suelen presentar cantidad suficiente de iones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-} , pero las aguas desaladas, es decir, agua marinas osmotizadas (ROSW) contienen una cantidad media aproximada de 11, 6 y 2 mg /L de SO_4^{2-} , Mg^{2+} y Ca^{2+} , respectivamente o incluso valores menores (Hernández, 2007). Los valores tan bajos de estos iones no suponen ningún problema para el agua de riego desde el punto de vista de calidad de

utilización de esa agua para el riego, pero es conveniente pensar que el aporte de los nutrientes de Ca, Mg y S son necesarios para las plantas y si el agua no los aporta, es necesario aportarlos por medio de fertilizantes que se deben incorporar. Este problema hace que el agricultor o empresario agrícola deba asumir este coste (ejemplo en pimiento en Israel supone un coste adicional de 3500 \$/ha, Ben-Gel et al, 2009) de fertilización extra que con otro tipo de agua pasaría a un segundo plano.

Fundamentalmente existen tres soluciones para corregir estos desequilibrios (Martínez Álvarez y Martínez Gorrioz, 2014):

- Postratamientos de remineralización en plantas desalinizadoras.
- Incorporación de fertilizantes a nivel de parcela.
- Mezclas con aguas continentales.

Generalmente el agua que procede de las desaladoras tienen un proceso posterior a la obtención del agua marina osmotizada (ROSW) que hace que se conviertan en Aguas Marinas Desalinizada y remineralizada (DSW). El proceso de la remineralización del agua se realiza principalmente para reducir la corrosividad del agua e implica un aumento de pH, la alcalinidad (bicarbonatos y carbonatos) y el contenido de calcio (Hernández 2017b). Realmente el objetivo fundamental de la remineralización es facilitar el cumplimiento de la normativa de la UE regulada por el RD 140/2003 de agua para abastecimiento (Hernández 2010). El agua desalada destinada para el abastecimiento de la población (única agua con unas regulaciones, ya que la que se destina a riego no existe tal regulación) tiene que ser estable en contacto con la atmósfera y por ello necesita la remineralización. Debe tener suficiente capacidad tampón, es decir, mayor alcalinidad y suficientemente equilibrada para que no sufra una disminución o aumento del pH por la absorción o pérdida de CO₂ durante el trasiego en la Red.

Para el caso del agua para regadío, la remineralización aumenta el contenido de calcio respecto al sodio con lo que pasa a ser más beneficiosa para terrenos y cultivos al modificarse la Relación de Absorción de Sodio (SAR). Pero también se debe considerar que la remineralización implica una subida de pH superior a 7,5 y muy cercano a 8, por lo

que puede afectar a la absorción radicular de microelementos, especialmente al hierro. La remineralización para la mejora de aguas de regadío es recomendable emplear H_2SO_4 en vez de CO_2 (Hernández, 2017b) al obtenerse un pH más bajo que facilita la absorción de diferentes microelementos (Fig.2) En la Tabla 7 se muestran los valores de las características del agua tras el proceso de la remineralización.

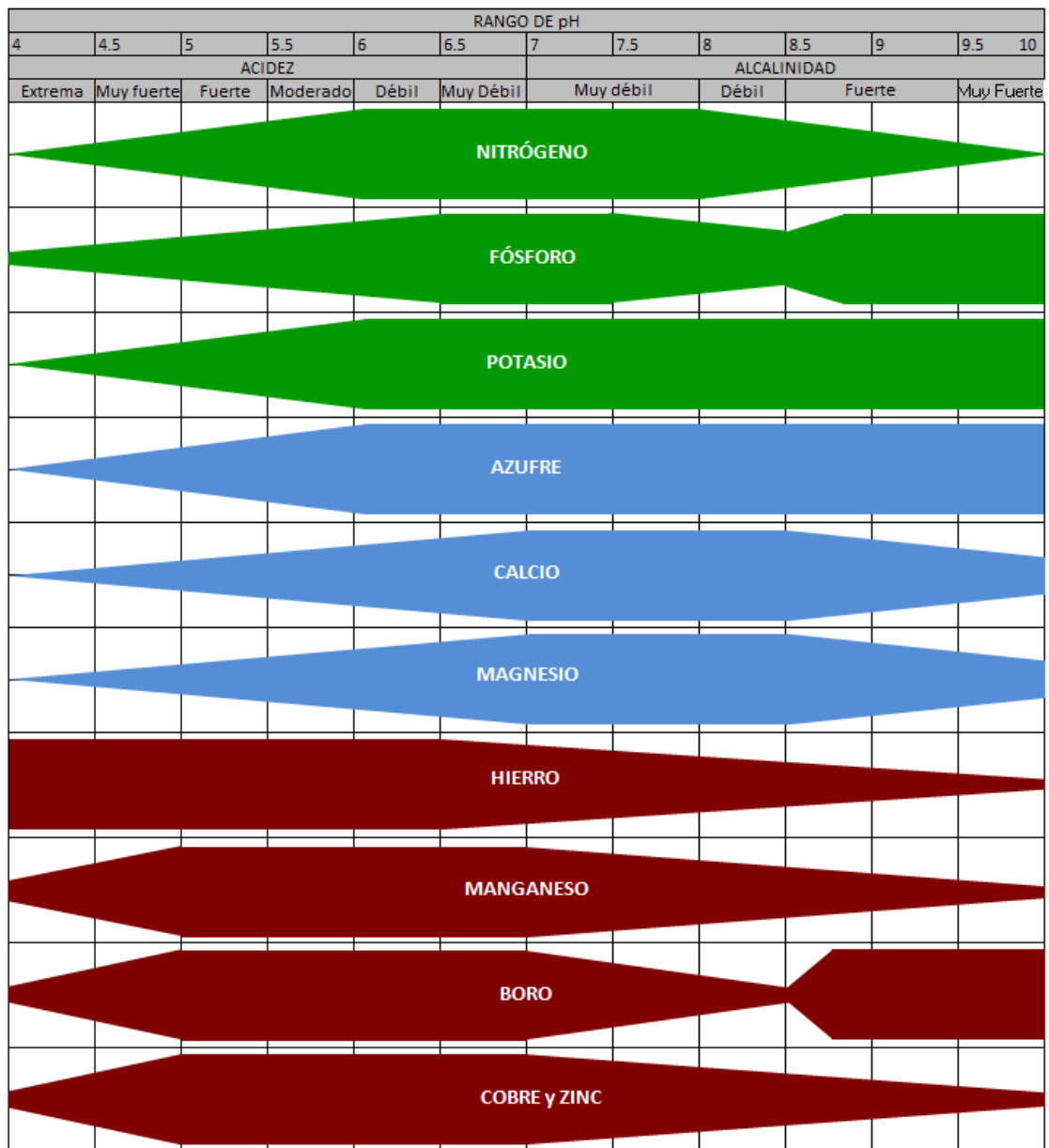


Fig. 2. Disponibilidad de nutrientes para las plantas en función del rango de pH (Moratiel , 2017)

Tabla 7. Valores medios de propiedades químicas del agua tras el proceso de remineralización. (Hernández 2017a)

AGUAS	pH	CE (dS/m)	Iones (mg/L)						
			Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Sin remineralizar	6.3	0.75	84.50	4.00	1.00	2.30	157.00	3.60	2.56
Remineralizado con CO ₂	8.0	0.85	84.50	4.00	23.00	2.30	157.00	3.60	70.00
Remineralizado con H ₂ SO ₄	7.4	0.85	84.50	4.00	59.00	2.30	157.00	3.59	42.62

La remineralización, tal como se expone en la Tabla 7 se modifica fundamentalmente el contenido de Ca del agua, a través de lechos de calcita, mientras que el Mg y S no cambia prácticamente. En la remineralización se suele añadir Mg, aunque no es añadido específicamente por medio de la remineralización. Toda la información referente a la adicción de Mg en el agua es para que dicho agua cumpla con la recomendación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) donde sitúa el valor mínimo de 10 mg/L (para agua de riego se consideran valores ligeramente superiores 12-18 mg/L, Yermiyahu, 2007). La adicción de Mg se puede realizar de diferentes formas (Hernández 2017b):

- **MgSO₄**: Adición de 30 mg de MgSO₄/L después del tratamiento de calcita. Esta solución sería muy valorable para el regadío por la adicción de S. Para el uso de aguas potable la riqueza de MgSO₄ debería de ser tal alta que lo haría inviable.
- **MgCl₂**: Adición de 30 mg de MgCl₂/L después del tratamiento de calcita. En agricultura no se recomienda por la adicción de Cl que puede incrementar el riesgo en cultivos (sobre todo en riego por aspersión).
- **Mg(OH)₂**: Adición de 18 mg de Mg(OH)₂ después del tratamiento de calcita. Opción no viable ni en agua potable ni en agua de riego por la subida del pH a valores de 9.5 por lo que se tendría que añadir CO₂ para bajarlo a un 8.4.
- **MgCa(CO₃)₂**: Hacer circular al agua por la dolomita o MgCa(CO₃)₂ el problema que tiene es que la disolución de Ca es más lento que la calcita y además requiere mucho tiempo de contacto, por lo que no es la mejor alternativa tanto en agua potable como de regadío.
- **Mg(CO₃)₂**: La magnesita tiene un contenido insoluble elevado en torno a un 10 % que lo hace inviable para su uso.

- **Mezclas de lechos.** Tecnología de lechos de calcita + dolomita permite optimizar la remineralización de Mg y Ca. En el mercado existen estas plantas Mixtas como las del tipo DrinTec™ que cumplen las necesidades de la remineralización.

Desde el punto de vista económico la remineralización no supone un coste excesivo en el cómputo de la desalación de agua, ya que se estima en un precio de 0.02-0.03 €/m³ (Comunicación Personal, 2017).

Para aguas de riego se ha visto que la deficiencia de estos elementos (Ca, Mg y S) en el agua desalinizada, no supone en sí un problema para los cultivos. Aún así, es necesario considerar que estos elementos son esenciales para los cultivos y es necesario incorporarlos en diferentes proporciones en función del agua, cultivo y suelo, entre otros factores. Estos elementos se encuentran de manera suficiente en aguas naturales, por lo que el agricultor se "ahorraría" la incorporación de esos elementos para los cultivos. Se podrían remineralizar las aguas al igual que se hace con las aguas potables ya que los costes no son elevados por m³ de agua. La solución más económica y fácil es la mezcla de aguas (generalmente con altos contenidos de Ca, Mg y S) ya que eso haría que la mezcla se situaría en valores mayores de Ca, Mg y S, con el consecuente ahorro de fertilización en esos elementos. Además permitiría obtener volúmenes mayores de agua de mejor calidad al mezclar dichas aguas. Uno de los problemas de esta solución es la composición no homogénea del agua procedente de las plantas desalinizadoras donde la composición no está regulada y no permitiría obtener unas patrones de agua desalinizada que ajustaría las proporciones de las mezclas.

4.3. PROBLEMAS DE INFILTRACIÓN DEL AGUA Y RIESGO DE SODICIDAD.

El Na^+ es un ion que afecta negativamente en las estructuras de los suelos. Un alto Na intercambiable provoca la dispersión de los coloides del suelo y la degradación de la estructura del mismo. Esta degradación provoca la baja capacidad de trasmisión de agua debido al sellado de la superficie y formaciones de costras (baja infiltración). Esto su vez provoca una mayor escorrentía y el riesgo de erosión (Villalobos y Fereres, 2017)

La velocidad de infiltración del agua en el suelo es un factor a considerar, ya que puede originar que las plantas no dispongan del agua necesaria para sus exigencias. La velocidad de infiltración viene determinada por las características físicas y químicas del suelo. Tal como expone Fuentes Yagüe (2003) respecto a este problema nos centraremos en problemas de infiltración en la química del suelo y provocados por el agua del riego, donde intervienen, tanto el contenido de sales disueltas (CE) como la proporción alta de sodio respecto al calcio y magnesio. De forma general se puede afirmar que una concentración alta de sales aumenta la velocidad de infiltración, mientras que una relación baja de sales o una alta proporción de sodio respecto al calcio y magnesio disminuye esa velocidad.

El indicador para el agua de riego o una solución que se utiliza para evaluar este riesgo es el SAR ó RAS (Relación de Adsorción de Sodio), mientras que el indicador para el suelo es el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI). Las ecuaciones 3 y 4 muestran las expresiones de SAR y PSI respectivamente.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (3)$$

Dónde: Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} representan las concentraciones de sodio, calcio y magnesio del agua de riego expresada en meq/L.

$$PSI = \frac{100 \cdot (-0.0126 + 0.01475 \cdot SAR)}{1 - 0.0126 + 0.01475 \cdot SAR} \quad (4)$$

Estos índices están fuertemente condicionados por el suelo, por lo que el suelo que recibirá un agua con un determinado SAR responderá de diferente forma en el entorno de la zona radicular de la planta. En la Tabla 8 se exponen los diferentes tipos de suelo en función de sus características.

Tabla 8. Clasificación de suelos en función de variables químicas relacionadas con el extracto de saturación de suelo.

SUELO	CEe (dS/m)	SAR	PSI	pH
Salino	$\geq 4,0$	< 12	< 15	$< 8,5$
Sódico	$< 4,0$	≥ 12	≥ 15	$> 8,5$
Salino-Sódico	$\geq 4,0$	≥ 12	≥ 15	$< 8,5$

Después del riego, el contenido de calcio disuelto en el agua se puede modificar mientras que el sodio no cambia. Para evaluar este efecto aparece el indicador de $SAR_{\text{corregido}}$ donde el valor de Ca^{2+} es sustituido por Ca_x^{2+} , que es concentración final de calcio que permanece en la solución del suelo, teniendo en cuenta la conductividad del agua aplicada, presión parcial de CO_2 en los primeros milímetros del suelo y el contenido de bicarbonato y carbonato en relación a su propio contenido de calcio (Expresión 5 y Expresión 6). Es conveniente destacar que el SAR ajustado (propuesto por la FAO 1976) no se recomienda su utilización porque se ha comprobado que sobrevalora la peligrosidad del sodio (Fuentes Yagüe, 2003)

$$SAR_{\text{corregido}} = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca_x^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (5)$$

Dónde: Na^+ , Ca_x^{2+} y Mg^{2+} representan las concentraciones de sodio, calcio corregido y magnesio del agua de riego expresada en meq/L.

$$Ca_x^{2+} = \exp \left[0.0552 + 0.1637 \sqrt{CE_{ar}} - 0.668 \ln \left(\frac{HCO_3 + CO_3}{Ca} \right) \right] \quad (6)$$

Dónde: CE_{ar} es la Conductividad eléctrica del agua en dS/m y HCO_3^- , CO_3^{2-} y Ca es la concentración del bicarbonato y carbonato y calcio en meq/L.

Desde el punto de vista de la calidad de agua procedente de la desalinización del agua de mar se puede indicar que el SAR suele tener valores altos por encima de 9, por lo que existe un riesgo de sobre la estructura de los suelos agrícolas. Tras el proceso de remineralización los valores de SAR suelen situarse en valores por debajo del 6. Martínez-Álvarez *et al.* (2017) muestran SAR de plantas desalinizadoras del levante español (Torrevieja, Águilas, Escombreras y Valdentisco) con valores de rango 4.0-7.0 después de la remineralización del agua. En la Tabla 9 se expone los riesgos potenciales a medio – largo plazo sobre la estructura de un suelo debido al SAR y a la CE (Ayers y Westcot, 1985).

Tabla 9. Riesgos potenciales a medio –largo plazo sobre la estructura de un suelo debido al SAR y a la CE (Ayers y Westcot, 1985).

Relación de absorción de Sodio (SAR)	RESTRICCIÓN DE USO		
	CEar (dS/m)		
	NINGUNA	LIGERA a MODERADA	SEVERA
SAR = 0 - 3	> 0.7	0.7-0.2	<0.2
SAR = 3 - 6	>1.2	1.2-0.3	<0.3
SAR = 6 - 12	>1.9	1.9-0.5	<0.5
SAR = 12 - 20	>2.9	2.9-1.3	<1.3
SAR = 20 - 40	>5.0	5.0-2.9	<2.9

Aunque el SAR de las aguas procedentes de la ósmosis inversa es un indicativo del riesgo de la sodicidad de los suelos y de la ruptura de la estructura por el desplazamiento de Ca^{2+} y Mg^{2+} por el Na^+ es necesario considerar el tipo de suelo en el que se está realizando la aplicación. En las zonas de problemas de aguas y utilización de plantas desalinizadoras se encuentran en la España Caliza por lo que la variable de SAR corregido es más representativo de lo que ocurrirá en la zona radicular del cultivo. El $SAR_{corregido}$ presupone la existencia en el suelo de minerales de calcio y la ausencia de

precipitaciones de magnesio (situación que se da en la mayoría de los suelos cercanos a donde se encuentran las plantas desalinizadoras). El SAR corregido respecto al SAR puede fluctuar en gran medida en las aguas procedentes de la Osmosis inversa (sin tratamiento de remineralización) ya que las concentraciones de Ca^{2+} y HCO_3^- son muy bajas, que al realizar el SAR corregido cambian considerablemente. Un agua procedente de OI puede tener valores de 10 que al corregirse pueden dar lugar a $\text{SAR}_{\text{corregido}}$ de 3. Aunque el SAR en un principio puede orientar la aptitud de un agua para el riego, esta variable se debe unir al suelo en el que esa agua se aplica, ya que los efectos reflejados sobre los cultivos pueden ser muy diferentes.

4.4. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TÓXICOS (Na^+ , Cl^- y B^{3+})

Algunos iones que son absorbidos por las plantas en exceso pueden provocar efectos tóxicos para las plantas. La magnitud de estos daños depende de la concentración, del volumen de agua absorbida, transpirada y la tolerancia del propio cultivo, además estos efectos son más rápidos cuando la temperatura es más elevada (Fuentes Yagüe, 2003). Todos los iones disueltos en el agua de riego deben estar recogidos en unos umbrales, ya que si se superan los umbrales marcados podrían afectar al cultivo. Evidentemente existen unos iones que son más comunes en el agua y que la probabilidad de causar fitotoxicidad son mayores que otros. Los iones más problemáticos desde el punto de vista de cultivos son el Cloruro (Cl^-), el sodio (Na^+) y el Boro (B^{3+}).

Uno de los problemas más importantes en las aguas procedentes de las desaladoras son las proporciones de los iones de Cl y Na en relación a otros. Las aguas desaladas aproximadamente el 72 % de sus sales es ClNa. Suelen tener valores un poco superiores del ion Cl^- que de Na^+ . Los valores, aunque depende de las plantas desalinizadores, se suelen encontrar entre 70- 150 mg/ L para el Na^+ y entre 120 y 300 mg/l para el Cl^- (Martínez Álvarez y Martínez Gorriiz, 2014; Martínez-Álvarez et al. 2017; Hernández, 2007). En la Fig 3. se expone las proporciones de los iones del agua de mar y del agua osmotizada. Como se puede observar las proporciones respecto al Cl^- y el Na^+ son muy

similares en ambos casos, con las diferencias de la alta conductividad del agua de mar y la baja del agua osmotizada.

La sintomatología de toxicidad en plantas por exceso de Cl^- se presenta como deshidratación y secado de los tejidos foliares que se inicia por los ápices y se extiende a lo largo de los márgenes a medida que la severidad y toxicidad aumenta, que si es muy alta viene acompañada de la necrosis y defoliación en último término. Para plantas sensibles los síntomas aparecen cuando las hojas acumulan entre 0.3 y 1% de cloruros en peso seco (García, 2012). Para el caso del Na^+ la toxicidad se centra en quemaduras y encrespamiento de la hoja que es más común en los bordes externos de la misma, los efectos se producen antes en las hojas más viejas. Los valores de las especies más sensibles al Na^+ aparecen con valores de 0.25-0.5% de peso seco de las hoja.

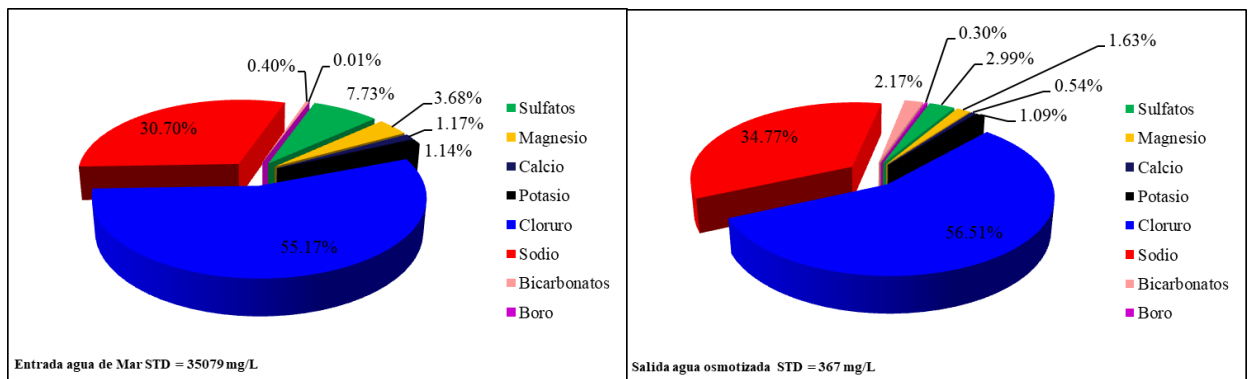


Fig. 3. Proporciones de los iones de agua de mar y osmotizada. Adaptado de Hernández (2007)

Existen recomendaciones y valores promedios de los efectos tóxicos que estos iones pueden provocar en los cultivos, aunque deben tomarse como referencia ya que en función del clima, suelo, manejo e incluso variedad de cultivo estos valores pueden cambiar. En la Tabla 10 se muestra lo valores referencia para la evaluación preliminar del riesgo del agua de riego.

Tabla 10. Valores referencias para la evaluación preliminar de la aptitud del agua para el riego en función de los iones de Na^+ y Cl^- (Ayers y Westcot, 1985)

UNIDAD*		RESTRICCIÓN DE USO		
		NINGUNA	LIGERA a MODERADA	SEVERA
Sodio (Na^+)				
Riego Superficie	RAS	<3	3-9	>9
Riego Aspersión	mg/L	<69	>69	
	meq/l	< 3	>3	
Cloruro (Cl^-)				
Riego Superficie	mg/L	<141	141-354	>354
	meq/l	<4	4-10	>10
Riego Aspersión	mg/L	<106	>106	
	meq/l	<3	>3	

*Para cultivos anuales que no son tan sensible a estos elementos como los frutales los daños son causados por la tolerancia a la salinidad más que la toxicidad específica de Na^+ y Cl^- .

El sistema de aplicación del agua es un aspecto a tener en cuenta a la hora de valorar la aptitud para el riego de un agua con problemas de cloro y sodio. El agua aplicada por aspersión con alto contenido en cloro o sodio puede provocar problemas de toxicidad en plantas sensibles, ya que las sales se concentran en las hojas pudiendo ser absorbidas por las hojas en cantidades excesivas. La absorción y su toxicidad depende de factores que favorecen la evapotranspiración como la alta temperatura, el fuerte viento, la baja humedad relativa y la alta radiación. En la Tabla 11 se muestra la tolerancia relativa de algunos cultivos a concentraciones de Na^+ y Cl^- en el agua. Notar como las especies más sensibles son las especies leñosas que se sitúan con valores umbrales en concentraciones de Na^+ y Cl^- de 3 meq/L.

Tabla 11. Tolerancia relativa de algunos cultivos al riego por aspersión con aguas de diferentes concentraciones de iones Na^+ y Cl^- (Ayers y Westcot, 1985)

Na^+ ó Cl^- (meq/L)	< 3	5-10	10-20	>20
Na^+ (mg/L)	< 69	115-230	230-460	>460
Cl^- (mg/L)	<106	177-355	355-709	>709
ESPECIES CULTIVADAS	Albaricoque Almendro Cítricos Ciruelo	Patata Pimiento Tomate Vid	Alfalfa Pepino Cártamo, Cebada Maíz, Sorgo	Algodón Coliflor Girasol Remolacha Azucarera

En lo que respecta a los iones de Na^+ y Cl^- de las aguas procedentes de la desalinización de agua de mar, cabe citar que los problemas que se pueden dar son los relacionados

con el uso de riego por aspersión en frutales, ya que los valores de Na^+ y Cl^- se encuentran en valores límites para estas especies. Si es necesario regar con esta agua a las especies más sensibles, las medidas que se debería tomar tal como indica Fuentes Yagüe (2003) serían las que se indican a continuación (medidas encaminadas a reducir la evaporación del agua en el momento del riego y contacto con hojas):

- Regar en las horas de la noche (evitando la evaporación)
- Evitar riego con fuertes vientos
- No utilizar aspersores que pulvericen mucho el agua (bajar la evaporación)
- La velocidad de giro del aspersor superior a una revolución por minuto para lavar las sales acumuladas en las hojas.
- Mayor intensidad de aplicación de agua si el suelo lo permite , para disminuir el tiempo de mojado de las hojas
- En frutales, aspersores debajo de la copa de los árboles para reducir el volumen de follaje mojado.

Uno de los iones más problemáticos en las aguas desalinizadas es el Boro (B^{3+}). Como se observa en la Fig. 3 su proporción en el agua desalinizada es superior al que se muestra en el agua de mar, lo que demuestra como las membranas de osmosis inversa no son altamente eficientes en la selección de este ion. El Boro interviene en el metabolismo y transporte de carbohidratos y en la síntesis de pared celular. El boro es absorbido por la plantas en forma de ácido bórico (BO_3H_3) que se mantiene en la disolución del suelo sin disociar a concentraciones muy bajas en suelos alcalinos y calizos. En suelos ácidos con exceso de humedad y abundantes pérdidas de lavado y en periodos muy secos en suelo con bajos valores de B pueden presentar problemas de deficiencia en cultivos. Para la mayoría de cultivos la sintomatología de toxicidad por exceso de B aparecen cuando las concentraciones foliares exceden de 250 – 350 mg/kg de peso seco. Éstos se muestran con amarilleamiento de hojas más viejas, deshidratación y secado de lo ápices de los bordes con unas deformaciones, estos daños suelen evolucionar internervialmente hacia el centro de la hoja.

Al igual que ocurre con el Cl^- y Na^+ existen unos valores orientativos sobre la concentración de Boro en las aguas y los posibles efectos tóxicos a los cultivos. En el extracto del suelo el Boro suele tener la misma concentración que el agua de riego por lo que el agua de riego se concierte en el indicativo de lo que ocurriría a nivel radicular. En la Tabla 12 se listan los cultivos en función a su sensibilidad relativa a las concentraciones de boro en el agua de riego. En la Tabla 13 se realiza otra clasificación muy similar a la anterior donde el máximo de Boro es fijado en 4 mg/l (Guy Fipps, 1996).

Tabla 12. Concentraciones de Boro en el extracto saturado del suelo y sensibilidad de diferentes especies. (Ayers y Westcot, 1985). Se considera que la concentración de extracto saturado de suelo es similar a la concentración del agua de riego.

Muy Sensible	Sensible		Mod. Sensible	Mod. Tolerable	Tolerable	Muy Tolerable
< 2.0 meq/L	2.0-3.0 meq/L	3.0-3.9 meq/L	3.9-7.9 meq/L	7.9-15.7 meq/L	15.7-23.6 meq/L	23.6-59.1 meq/L
<0,5 mg/L	0.5-0.75 mg/L	0.75-1.0 mg/L	1.0-2.0 mg/L	2.0-4.0 mg/L	4.0-6.0 mg/L	6.0-15.0 mg/L
Limón Mora	Naranja Cereza Ciruela Cebolla	Fresa Ajo Trigo Judía	Zanahoria Guisante Patata Pepino	Lechuga Repollo Maíz Tabaco	Tomate Alfalfa Remolacha	Espárrago Algodón

Tabla 13. Concentraciones de sensibilidades al Boro. El primer nombre del grupo es el más tolerante y a medida que se desciende es el menos tolerante (Guy Fipps, 1996)

Sensibles de 0.3 a 1 mg/L	Semitolerantes de 1 a 2 mg/L	Tolerantes de 2 a 4 mg/L
Pera Manzana Vid Cereza Melocotón Haba Nueces Ciruelo Albaricoque Naranja Pomelo Limón	Girasol Patata Algodón Rábano Olivo Cebada Trigo Maíz Avena Batata Lima Calabaza	Espárrago Palmera Canaria Palmera Dactilífera Remolacha azucarera Alfalfa Gladiolo Cebolla Nabo Col Lechuga Zanahoria

Los niveles de Boro en el agua desalinizada desde el punto de vista de aptitud de agua para el riego es el mayor problema. Esto se debe en gran parte, como se ha comentado anteriormente, al bajo rendimiento de las membranas a este elemento. Los niveles de Boro procedentes de la literatura consultada se encuentran en valores menores de 1 mg/L. Yermiyahu *et al.* (2007) indica valores en la planta de Ashekon Israel de 0.2 mg/L. Martínez- Álvarez *et al.* (2017) reporta valores promedios para las plantas de Torre Vieja, Águilas, Escombreras y Valdentisco de 0.56, 0.85, 0.9 y 0.92 mg/L⁺. Díaz *et al.* (2013) indican valores que fluctúan entre 0.5 y 1.1 mg/L en las plantas de Lanzarote.

Según el RD 140/2003 el límite máximo permitido en B para aguas de consumo humano es de 1 mg/L (la OMS establece como límite máximo 0.5 mg/L). Con los valores promedios donde nunca se alcanzan límite de 1 mg/L de las diferentes plantas desalinizadoras es importante considerar que cultivos sensibles como los frutales, cítricos podrían tener problemas en el riego por la utilización de esas aguas ya que cultivos como el limonero o mora presentan problemas a niveles de 0.5 mg/L.

Existen varios métodos en las plantas desalinizadoras para la reducción de este elemento tal como indica Chillón (2009), pero quizás el método más barato e intuitivo es la dilución o mezcla de aguas desalinizadas con otras aguas. Por lo general, las aguas naturales tienen contenidos de boro que van de 0 a 1.5 mg/L (Martínez- Álvarez *et al.* 2016), aunque con aguas continentales superficiales se puede reducir considerablemente las cantidades de B, ya que son aguas que tienen valores más bajos. Por ejemplo, el agua procedente del trasvase Tajo- Segura con valores de los 0.13 ± 0.06 mg/L (Martínez- Álvarez *et al.* 2017).

Con relación a la toxicidad de Na^+ , Cl^- y B^{3+} es necesario prestar especial atención a estos indicadores para la aptitud de agua para el riego. En la mayoría de los casos las necesidades de estos elementos para los cultivos no son comparables a los estándares fijados para el agua de consumo humano por el RD140/2003: cloruros con 250 mg/L, boro con 1 mg/L y sodio con 200 mg/L. Con estos valores los cultivos más sensibles pueden tener problemas de toxicidad, por lo que en muchos casos, el limitante de uso del agua desalinizada para el riego son estos iones, especialmente el boro. Una de las

soluciones más económica es la mezcla de volúmenes de aguas de diferentes naturalezas con la finalidad de diluir esas concentraciones de iones (siempre que el agua tenga una menor concentración de los mismos).

4.5. OTROS TÓXICOS NO IMPORTANTES EN AGUAS DESALINIZADAS

El agua desalinizada no suele tener problemas con otros elementos diferentes a los tratados en los puntos anteriores debido a su composición. En algunos casos de aguas residuales si se pueden encontrar toxicidades por excesos de algunos metales pesados, y aunque en el agua desalinizada no es importante se ha considerado indicar los rangos en los que los vegetales pueden acusar los efectos de las altas concentraciones de otros elementos. En muchas ocasiones que se plantean las mezclas de aguas con el agua desalinizada, el agua resultante puede tener algunas restricciones para el uso agrícola debido principalmente a la incorporación de tóxicos de las masas de agua no procedentes del agua desalinizada. En la Tabla 14 se muestran los rangos de aquellos elementos en los que los vegetales pueden mostrar síntomas de toxicidad.

Tabla 14. Rangos por encima de los cuales los vegetales pueden presentar toxicidad de otros elementos. Elementos sin importancia en el agua desalinizada bajo condiciones trabajo normales pero que pueden aparecer en masas de aguas de mezclas con otras fuentes de agua de peor calidad (aguas regeneradas).

ELEMENTO		RANGO (mg/l)
Aluminio	(Al)	5 - 20
Arsénico	(As)	0.1 - 2
Berilio	(Be)	0.75 - 2
Cadmio	(Cd)	0.01 - 0.05
Cromo	(Cr)	0.1 - 1
Cobalto	(Co)	0.05 - 5
Cobre	(Cu)	0.2 - 5
Fluoruros	(F-)	1 - 15
Hierro	(Fe)	5 - 20
Plomo	(Pb)	5 - 10
Litio	(Li)	2.5 - 2.5
Manganeso	(Mn)	0.2 - 10
Molibdeno	(Mo)	0.01 - 0.05
Niquel	(Ni)	0.2 - 2
Selenio	(Se)	0.02 - 0.02
Vanadio	(V)	0.1 - 1
Zinc	(Zn)	2 - 10

4.6. ESTABILIDAD DEL AGUA.

El pH a la salida de los bastidores de una planta de ósmosis inversa fluctúa entre 5.3 y 6.7 (Hernández, 2010). El agua también se caracteriza por su baja salinidad (280 mg/L). Esto hace que el agua sin realizar ningún tratamiento posterior de remineralización tenga un carácter muy corrosivo, es decir, tiende a “disolver los metales”. Su carácter corrosivo debido a la baja alcalinidad, bajo calcio y bajo pH unido a la alta proporción de cloruros y sulfatos respecto a bicarbonatos hace que sea necesaria su corrección para su no dañar a los canales de conducción del agua. La estabilidad química depende fundamentalmente de la capacidad del agua que tiene para amortiguar los cambios de pH (muy relacionada con el contenido de carbonatos y bicarbonatos, es decir, la alcalinidad), de la capacidad para precipitar CaCO_3 (medido por el índice de Langerier, LSI; o el potencial de precipitación del carbonato cálcico, CCP) y la concentración de Ca^{2+} (Martínez –Álvarez, 2014).

La Alcalinidad, medida como mg/L de CaCO_3 , es una medida estándar considerada para medir la capacidad tampón del agua. Agua con bajos valores de Alcalinidad son muy sensibles a cambios de pH mientras valores altos son más estables a que se produzcan esos cambios de pH. El índice Langerier está relacionado con la precipitación del calcio, según el cual, el carbonato de calcio precipita cuando alcanza su límite de saturación en presencia de bicarbonato. Este índice se define por la diferencia entre el pH actual del agua pH_a y el pH teórico que el agua alcanzaría en equilibrio con el CaCO_3 (pH_{sat}). Este índice lo deseable es que se sitúe en valores próximos a cero, ya que si es negativo el agua tendería a disolver CaCO_3 mientras que si fuera positivo tendería a precipitar ese CaCO_3 .

Los valores que según el RD140/2003 para agua de consumo humano se fijan son de pH entre 6.5 y 9.5 y un LSI de ± 0.5 . Hernández (2017b) indica que el rango de las calidades para la remineralización de agua desaladas encontradas en la práctica sitúan valores de pH de 7.0-8.4 y LSI de 0-0.3 (Tabla 15)

Tabla 15. Rango de calidades para la remineralización de aguas desaladas encontradas normalmente en la práctica (Hernández 2017b).

Parámetro	Valor
Δ STD (mg/L)	< 200
pH	7.0-8.4
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	50-80
Dureza Total (mg CaCO ₃ /L)	50-80
Calcio (mg/L)	22-27
Turbidez (NTU)	<1
LSI	0-0.3

Desde el punto de vista de los cultivos estas propiedades en principio no serían limitantes en la producción y riego. En algunos casos como la fertirrigación la estabilidad del pH sería importante, ya que con la adición de fertilizantes al agua podrían dar fluctuaciones de pH que provocarían cambios en el pH del agua resultante y esto a su vez podría afectar a la absorción de algunos nutrientes para las plantas (Fig.2). Por otro lado los valores fijados de LSI de ± 0.5 realmente se fija para proteger a las redes de distribución de la agresividad y corrosión.

Generalmente los procesos de remineralización con lechos de Calcita hacen que los contenidos de Ca²⁺ y contenido de bicarbonatos sean los requeridos indicados en la Tabla 15. En la gran mayoría de los casos para alcanzar valores de la Tabla 15 se mantiene el agua en los lechos de calcita por un tiempo que se encuentran entre 11 y 20 min, dependiendo del agua osmotizada, que permite alcanzar una alcalinidad entre 50 y 60 mg/L, pH en torno a 8.2 y niveles del calcio entre 20 y 25 mg/L (Hernández, 2017b).

Es necesario considerar que como alternativa a la remineralización del agua la mezcla de masas de agua puede compensar esta inestabilidad y así obtener aguas de calidad óptima para el riego si necesidad de la remineralización. En casos que se utilice el agua para cultivos hidrópicos donde los niveles de fertirrigación y control de pH son muy precisos, en algunos casos se puede plantear la alternativa de no remineralizar el agua y proceder a la fertilización a nivel de explotación. En este caso hay que prestar especial atención a las tuberías y canales de distribución de agua para evitar problemas de corrosión. Si se

plantea esta opción los costes de la fertilización de Ca^{2+} como se ha visto en el apartado 4.3 repercutiría en el propio agricultor (Ben-Gal et al. 2017).

Desde el punto de vista de la estabilidad del agua las aguas desaladas no suponen un problema para el riego. Es necesario considerar la aplicación final de esa agua ya que quizás interese no remineralizar el agua y se realice a nivel de explotación. Aunque esta opción es factible, se recomienda realizar una remineralización que aumente la estabilidad del agua durante su conducción y manejo.

4.5. APLICACIÓN INFORMÁTICA EN EXCEL® PARA MEZCLAS DE MASAS DE AGUA.

Con la finalidad de orientar al lector se ha generado una aplicación informática llamada ***Aplicación para la Estimación de la Aptitud del Agua de Riego (AEAR)***, que desde un punto de vista general y práctico permite obtener una idea de la calidad del agua para el riego en función de sus características físico químicas.

La aplicación se compone de dos partes: La primera donde se introducen las características químicas del agua de riego y a la vez que se introducen va indicando su potencial uso en función de esa característica. Es posible introducir dos aguas diferentes. También se puede realizar una simulación de las diferentes proporciones de mezclas de las aguas introducidas, ya que este aspecto es uno de los más importantes dentro del uso del agua desalinizada para la agricultura (Fig.4).

El segundo Bloque de la aplicación AEAR se dedica a relacionar los cultivos con las aguas introducidas. En esta parte se presta especial atención a los problemas principales que muestran las aguas para el riego agrícola: salinidad, Boro, Sodio y Cloro. En la aplicación se introducen los datos de los cultivos de los que se tiene información y referencias bibliográficas viables, pero tal como se indica *"Estos datos son sólo una indicación. La tolerancia varía dependiendo del clima, condiciones del suelo y prácticas culturales. No se dispone de la orientación para todos los cultivos"*.

AGUA 1				MEZCLA				AGUA 2			
PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR	OBSERVACIONES	PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR	OBSERVACIONES	PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR	OBSERVACIONES
Temperatura	°C	22	Sin problema	Temperatura	°C	21.21	Sin problema	Temperatura	°C	21.2	Sin problema
pH	(0-14)	8.44	Valor Normal para pH del problema de abstracción con el agua natural (p.e. Huelva)	pH	(0-14)	8.12	Valor Normal para pH del problema de abstracción con el agua natural (p.e. Huelva)	pH	(0-14)	8.09	Valor Normal para pH del problema de abstracción con el agua natural (p.e. Huelva)
CE ₂₅	dS/m	0.5	Sin restricción por el Riego	CE ₂₅	dS/m	0.4773	Sin restricción por el Riego	CE ₂₅	dS/m	0.477	Sin restricción por el Riego
HCO ₃ ⁻	mg/L	67.1	Sin Problema. Valor deseable	HCO ₃ ⁻	mg/L	228.5	Sin problema por potencial problema derivado de la acidez y pH del agua natural	HCO ₃ ⁻	mg/L	236.38	Sin problema por potencial problema derivado de la acidez y pH del agua natural
CO ₃ ²⁻	mg/L	1.5	Valor normal deseable. Su exceso eleva el pH que afecta a la abstracción de algunos elementos (p.e. Hierro)	CO ₃ ²⁻	mg/L	1.94	Valor normal deseable. Su exceso eleva el pH que afecta a la abstracción de algunos elementos (p.e. Hierro)	CO ₃ ²⁻	mg/L	0	Valor deseado
Cl ⁻	mg/L	156	Problema Ligero	Cl ⁻	mg/L	148.1	Problema Ligero	Cl ⁻	mg/L	148	Problema Ligero
SO ₄ ²⁻	mg/L	0	Sin problema de riesgo. Necesaria Atención para incorporación de SO ₄ en fertilización.	SO ₄ ²⁻	mg/L	0	Sin problema de riesgo. Necesaria Atención para incorporación de SO ₄ en fertilización.	SO ₄ ²⁻	mg/L	0	Sin problema de riesgo. Necesaria Atención para incorporación de SO ₄ en fertilización.
NO ₃ ⁻	mg/L	0	Sin problema	NO ₃ ⁻	mg/L	0	Sin problema	NO ₃ ⁻	mg/L	0	Sin problema
Ca ²⁺	mg/L	21.34	Sin problema. Valor Deseable	Ca ²⁺	mg/L	67.91	Sin problema	Ca ²⁺	mg/L	68.57	Sin problema
Mg ²⁺	mg/L	0	Sin problema de riesgo. Necesaria Atención para incorporación de Mg en fertilización.	Mg ²⁺	mg/L	0	Sin problema de riesgo. Necesaria Atención para incorporación de Mg en fertilización.	Mg ²⁺	mg/L	0	Sin problema de riesgo. Necesaria Atención para incorporación de Mg en fertilización.
Na ⁺	mg/L	68	Sin problema	Na ⁺	mg/L	143.9	Problema Ocasional	Na ⁺	mg/L	145	Problema Ocasional
K ⁺	mg/L	0	Sin problema	K ⁺	mg/L	0	Sin problema	K ⁺	mg/L	0	Sin problema
B ³⁺	mg/L	0.8	Restricción Media	B ³⁺	mg/L	0.011	Sin problema. Valor deseable	B ³⁺	mg/L	0	Sin problema. Valor deseable
STD	mg/L	277.2	Sin restricción por el Riego	STD	mg/L	284.69	Sin restricción por el Riego	STD	mg/L	284.8	Sin restricción por el Riego
Alcalinidad CaCO ₃	mg/L	57.50	Medio	Alcalinidad CaCO ₃	mg/L	191.85	Muy Alta	Alcalinidad CaCO ₃	mg/L	193.75	Muy Alta
SAR	(mmol/L) ^{0.5}	4.05	Riesgo potencial de la estructura del suelo por Sal en función del SAR corregido y Conductividad eléctrica del agua: LIGERA A MODERADA	SAR	(mmol/L) ^{0.5}	4.82	Riesgo potencial de la estructura del suelo por Sal en función del SAR corregido y Conductividad eléctrica del agua: C	SAR	(mmol/L) ^{0.5}	4.81	Riesgo potencial de la estructura del suelo por Sal en función del SAR corregido y Conductividad eléctrica del agua: SEVERA
SAR _{corregido}	(mmol/L) ^{0.5}	3.07		SAR _{corregido}	(mmol/L) ^{0.5}	6.67		SAR _{corregido}	(mmol/L) ^{0.5}	6.60	
Índice de Langerier	(LI)	-0.06	Sin problema. Aceptable	Índice de Langerier	(LI)	0.60	Aceptable	Índice de Langerier	(LI)	0.62	Aceptable

Fig. 4. Aspecto visual del primer bloque que muestra la aplicación AEAR, diseñada específicamente para este proyecto.

SELECCIÓN DEL CULTIVO									
Salinidad	CULTIVO	CE ₂₅ (dS m ⁻¹)	b (‰ dS m ⁻¹)	C _{max}	Clase	AGUA 1	AGUA 2	MEZCLA	
		Cítricos (Naranja)	1.7	16	7.95	S	Sin problemas aparentes sobre el rendimiento del Cultivo por problemas de salinidad de agua	Sin problemas aparentes sobre el rendimiento del Cultivo por problemas de salinidad de agua	Sin problemas aparentes sobre el rendimiento del Cultivo por problemas de salinidad de agua
						Pérdida de Rendimiento potencial [%] por salinidad	Pérdida de Rendimiento potencial [%] por salinidad	Pérdida de Rendimiento potencial [%] por salinidad	
						0	0	0	
	<small>Enter determine de una orientación. La tolerancia varía de acuerdo al clima, condiciones de suelo y prácticas culturales. Se considera que la fracción de lavado es 0.15-0.20. Las clases son: T, Tolerante; MT, Moderadamente Tolerante; MS, Moderadamente Sensible; S, Sensible. Para las salinidades se utilizan los valores de restricción, es decir, el valor máximo de CE admisible y la menor conductividad (S). Según Allen et al. 1995.</small>								
BORO	CULTIVO	Concentración a partir de la cual el cultivo se considera sensible (mg/L)	Clase	AGUA 1	AGUA 2	MEZCLA			
	Cítricos (Naranja)	0.3	S	Posibles problemas en el cultivo por exceso de Boro	Sin Problemas aparentes por Boro	Sin Problemas aparentes por Boro			
	<small>Enter determine de una orientación. La tolerancia varía de acuerdo al clima, condiciones de suelo y prácticas culturales. Hace depend de la orientación para todas las cultivos. Según Gray 1996.</small>								
SODIO	CULTIVO	Sistema Riego			AGUA 1	AGUA 2	MEZCLA		
	GENERAL*	Superficie	SAR = 4.1	Restricción de uso de LIGERA A MODERADA	SAR = 4.8	Restricción de uso de LIGERA A MODERADA	SAR = 4.8	Restricción de uso de LIGERA A MODERADA	
		Aspersión	Na+ = 68 mg/L	Restricción de uso NINGUNA	Na+ = 145 mg/L	Restricción de uso de LIGERA A MODERADA	Na+ = 143.9	Restricción de uso de LIGERA A MODERADA	
Cítricos (Naranja)**	Aspersión	Tolerancia del Cultivo (mg/L)	<69	Sin Problemas por Sodio	Posibles problemas en el cultivo por Sodio	Posibles problemas en el cultivo por Sodio			
	<small>*Valores referencias para la evaluación preliminar de la aptitud del agua para el riego en función de los iones de Na+ y Cl- (Ayers y Westcot, 1985) **Tolerancia relativa de algunos cultivos al riego por aspersión con aguas de diferentes concentraciones de iones Na+ y Cl- (Ayers y Westcot, 1985)</small>								
CLORO	CULTIVO	Sistema Riego			AGUA 1	AGUA 2	MEZCLA		
	GENERAL	Superficie	Cl- = 156 mg/L	Restricción de uso de LIGERA A MODERADA	Cl- = 148 mg/L	Restricción de uso de LIGERA A MODERADA	Cl- = 148.1	Restricción de uso de LIGERA A MODERADA	
		Aspersión	Cl- = 156 mg/L	Restricción de uso de LIGERA A MODERADA	Cl- = 148 mg/L	Restricción de uso de LIGERA A MODERADA	Cl- = 140.1	Restricción de uso de LIGERA A MODERADA	
Cítricos (Naranja)	Aspersión	Tolerancia del Cultivo (mg/L)	<106	Posibles problemas en el cultivo por Cloro	Posibles problemas en el cultivo por Cloro	Posibles problemas en el cultivo por Cloro			
	<small>*Valores referencias para la evaluación preliminar de la aptitud del agua para el riego en función de los iones de Na+ y Cl- (Ayers y Westcot, 1985) **Tolerancia relativa de algunos cultivos al riego por aspersión con aguas de diferentes concentraciones de iones Na+ y Cl- (Ayers y Westcot, 1985)</small>								

Fig. 5. Aspecto visual del segundo bloque que muestra la aplicación AEAR, diseñada específicamente para este proyecto.

5. CONCLUSIONES

La incertidumbre que se genera por la disponibilidad de agua para los cultivos en países semiáridos como España es uno de los factores más importantes a la hora de plantearse el cultivo de una determinada especie. La desalación de agua permite disponer de ese recurso prácticamente de forma inagotable.

En los últimos años las técnicas de osmosis inversa se han perfeccionado y evolucionado mucho, de forma que los costes de producción de esa agua desalada se han reducido considerablemente. Aún así, los costes de producción del agua son muy altos en comparación con otros sistemas de abastecimiento de agua para el riego. Los costes de actualmente del m³ de agua desalada se sitúan, en el mejor de los casos, 5 veces por encima del coste de agua por otro sistema de abastecimiento. Los costes de producción de agua desalada de mar puede oscilar entre 0.75 -0.8 €/m³, dato de la Cuenca Hidrográfica del Segura (Martínez –Alvarez *et al.* 2017). Con independencia del coste total de producción, el precio pagado por el agricultor es de 0.38-0.57 €/m³ lo que implica que existen ayudas al sector por parte del gobierno de España, en parte para mitigar los efectos de la escasez de agua en el suministro Tajo –Segura. Estos costes también vendrán fuertemente influenciados por el precio de la energía, otro factor a tener en cuenta a la hora de determinar el precio final. La energía utilizada para este fin también provocará gases de efecto invernadero que es importante cuantificar en una sociedad cada vez más preocupada por los efectos provocados por este incremento.

Desde el punto de vista técnico es necesario tener en cuenta varios factores a la hora de determinar la calidad de agua apta para el riego procedente de las plantas desalinizadoras. Uno de ellos es la propia **agua** procedente de la desaladora; el segundo es el **cultivo**, las especies tienen diferente comportamiento y susceptibilidad a determinados parámetros del agua. Es decir, **la calidad de agua de riego es necesaria ligarla al cultivo** ya que una calidad de agua aceptable para un cultivo para otro puede ser inviable. Por último el **suelo**, es otro factor a tener en cuenta en cuanto al uso de un

determinado agua. Al final el suelo es el punto de confluencia del agua de riego con la especie cultivada y de donde la planta toma el agua.

El agua desalada tiene un proceso posterior a la desalación denominado remineralización donde se reponen las sales necesarias del agua y cuyo objetivo es generalmente producir un agua con un índice de Langelier próximo a cero. Las aguas desaladas se caracterizan por ser aguas con baja salinidad, donde el porcentaje de ClNa es muy alto (por encima del 70% de las sales) y contenidos muy bajos en carbonatos, calcio y magnesio. En España existe una legislación para el agua destinada para uso humano recogida en el RD140/2003, pero no existe nada a nivel de agua de riego. En otros países con tradición en la desalinización de agua (Israel y países de Oriente Medio) tampoco hay legislaciones vigentes para el agua de riego y en algún caso existen escasas recomendaciones o patrones a seguir.

Desde el punto de vista del agua existen varios indicadores que son necesarios considerar:

- **SALINIDAD:** medida por la conductividad eléctrica (CE, dS/m). Esta se puede considerar la variable que tiene un mayor efecto sobre los cultivos. Desde un punto de vista agronómico interesa que esta variable sea la más baja posible. El agua procedente de desaladoras no tiene problemas de salinidad. Las aguas desaladas responden a una solución con un contenido medio en sólidos totales disueltos de 280 mg/L (Hernández –Suarez, 2009). Es importante destacar que la mayoría de los cultivos pueden tolerar aguas de 1280 mg/L (salvo los muy sensibles), sobre todo en riego localizado de alta frecuencia. Por esta parte, en principio **no es un problema para el uso del agua en agricultura**. En algunos casos esta agua con baja conductividad puede dar en algunos suelos muy pesados problemas de infiltración de agua, aunque esto depende en gran medida en el contenido de Na⁺.
- **CONCENTRACIONES EN Ca²⁺, Mg²⁺ y SO₄²⁻:** El agua procedente de las plantas desalinizadoras tienen concentraciones bajas en Ca²⁺, Mg²⁺ y SO₄²⁻, desde el punto de vista del riego y técnico **la ausencia estos elementos no son un problema** para

el uso del agua aplicado a cualquier cultivo. Pero por otro lado se debe considerar que estos iones juegan un papel secundario en la fertilización de los cultivos. La mayoría de las aguas utilizadas para el riego suelen contener cantidades suficientes en esos elementos como para satisfacer las necesidades de los cultivos, por lo que el agricultor presta una menor atención a los mismos. **Si las aguas desalinizadas no se remineralizan, este efecto se debe considerar, ya que el coste de los fertilizantes para incrementar esos elementos debería ser soportado por otro agente, generalmente el propio agricultor.**

- **CONCENTRACIONES EN Na^+ , Cl^- y B^{3+} :** A diferencia de los iones anteriores, los iones de Cl^- , Na^+ y B^{3+} si son un problema que pueden condicionar el uso de un agua de riego. Además, estos se encuentran a altas concentraciones en el agua desalinizada. Los valores, aunque son relativamente altos, en la mayoría de los casos están presentes por debajo de los umbrales de daño. De todos los aspectos más limitantes en la producción vegetal sobre los riegos con agua desalinizada es el exceso de Boro el más problemático. En algunos cultivos sensibles al B (por ejemplo, cítricos) y técnicas de riego por aspersión (poco común ya que las zonas donde se localizan las desalinizadoras donde riego de la agricultura es mayoritariamente localizado) con agua en exceso de Cl^- y Na^+ se puede presentar alguna restricción a su uso. Las soluciones más comunes para solventar este problema es la utilización de membranas más eficaces, etapas secuenciales para eliminar esos elementos o la dilución de la concentración con aguas de mejor calidad. Una de las medidas más fáciles de implementar es la mezcla con agua continentales con contenido de Boro, Cloro y Sodio inferior y determinar cuál sería la relación de mezcla ideal para no tener problemas con dicho elemento sobre los cultivos regados.
- **PROBLEMAS DE INFILTRACIÓN DEBIDO A LA SODICIDAD.** Respecto a los problemas que pueden llegar a ocasionar en la estructura de los suelos, estas aguas se encuentran con valores de SAR por encima de 9 por lo que puede llegar

a ser un problema en la infiltración de los suelos. En este caso hay que considerar la variable medida en extracto de saturación del suelo de $SAR_{\text{corregido}}$ ya que en los suelos calizos españoles es favorable y hace que el SAR alto del agua se sitúe en valores mucho más bajos en $SAR_{\text{corregido}}$ que es lo que realmente afecta al cultivo.

- **ESTABILIDAD DEL AGUA.** Desde el punto de vista de la estabilidad química, y que afecta sobre todo en las conducciones del agua y estabilidad del agua a cambio de pH, es conveniente destacar que es una variable que **no afectan directamente a los cultivos**. Las aguas desaladas suelen tener un índice de Langelier (LSI), inferior a -4, con lo que tiende a disolver el carbonato cálcico y es altamente corrosiva. Es necesario considerar que puede afectar a las conducciones por lo que se debe tener en cuenta si se conduce el agua no remineralizada a otros emplazamientos.

Con los índices que se han expuesto anteriormente es conveniente destacar que, aunque se puede regar la mayoría de los cultivos con agua desalinizada, en función del manejo y la situación de partida del propio agua, cultivos y suelos; algunos índices son necesarios corregir. Los mayores problemas serían los del propio agua que afectan directamente a los cultivos: presencia de iones tóxicos, Cl^- , Na^+ y B^{3+} . Otros índices afectan en el manejo del riego, y si no se modifican, es necesario conocer muy bien las repercusiones en campo ya que en muchos casos estos valores de los índices se encuentran en el límite del umbral para su utilización.

En este aspecto de la remineralización y “corrección” del agua se pueden tomar varias medidas:

- **Corrección del agua en la propia explotación agraria**, por medio de aplicación de fertirrigación. Es una práctica habitual, en cultivos bajo invernaderos y especialmente en cultivos hidropónicos. Esta medida se puede realizar en aquellos cultivos que disponen generalmente de cabezales de fertirriego. El coste suele ser directamente asumido por el propio agricultor

- **Corrección del agua en la planta desaladora**, por medio de la remineralización del agua con lechos carbonato cálcico y carbonato de magnesio. El coste de la remineralización suele ser entre 0.02-0.03 €/m³ por lo que el coste no son cifras muy elevadas.
- **Corrección de agua por mezclas de aguas**. Se realiza la corrección por las mezclas de diferentes masas de agua, ya que los elementos deficientes o umbrales próximos a los daños se diluyen al mezclarlos con aguas de otra calidad (de mejor calidad) . Además, esto permite un volumen de agua mayor para el riego y reducir las concentraciones de los valores de elementos tóxicos que con la remineralización no se pueden conseguir.

Por todo lo anterior es conveniente, estudiar el caso antes de tomar cualquier decisión. Aunque, desde un punto de vista general sería conveniente realizar algún postratamiento al agua osmotizada para garantizar su uso sin mayor problemas e inconvenientes, además es necesario considerar que el coste de este tratamiento es muy bajo (0.02-0.03 €/kg).

Desde el punto de vista técnico los posibles problemas que pueden aparecer al utilizar el agua desalada para el riego son subsanables. Sin embargo, el principal problema al que se enfrenta el uso del agua desalada para la producción vegetal es el coste final, que hace que sólo sea rentable el uso de esta agua en determinados cultivo de alto valor añadido.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ALCÁNTAR GONZÁLEZ, G.; TREJO-TÉLLEZ, L. 2007. Nutrición de cultivos. Ed. Mundiprensa. 438 p.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper no. 56. FAO, Rome. 298 p.
- APARICIO, J.; CANDELA, L.; ALFRANCA, O.; GARCÍA-ARÓSTEGUI, J.L. 2017. Economic evaluation of small desalination plants from brackish aquifers. Application to Campo de Cartagena (SE Spain). *Desalination* 411: 38-44.
- ARAGÜÉS R. 2011. Agricultura de regadío y calidad de aguas a nivel fuente y sumidero. *Riegos y Drenajes XXI*, 182: 24-33
- AYERS, R. S.; WESTCOST, D.W. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 (Rev.1), Rome, 174p.
- AZNAR-SÁNCHEZ, J.A.; BELMONTE-UREÑA, L.J.; VALERA, D.L. 2017. Perceptions and Acceptance of Desalinated Seawater for Irrigation: A Case Study in the Níjar District (Southeast Spain). *Water* 9, 408. doi:10.3390/w9060408.
- BAR-TAL, A.; YERMIYAHU, U.; BEN-GAL, A.; SCHATZ, A.; FAINGOLD, I.; SELIGMANN, R. 2017. Optimization of calcium and magnesium concentrations for fertigation of tomato with desalinated water. *Israel Journal of Plant Science*. Doi: 10.1080/07929978.2017.1288466
- BEN-GAL, A.; YERMIYAHU, U.; COHEN, S. 2009. Fertilization and Blending Alternatives for Irrigation with Desalinated Water *Journal Environmental Quality* 38: 529–536.
- CALATRAVA, J.; MARTÍNEZ-GRANADOS, D. 2012. El valor de uso del agua en el regadío de la cuenca del Segura y en las zonas regables del trasvase Tajo-Segura. *Economía Agraria y Recursos Naturales*. 12: 5-32
- COMUNICACIÓN PERSONAL. 2017. Conversación con Dr. Manuel Hernández Suárez Directo Gerente de Fundación Centro Canario del Agua (FCCA). 7 Octubre de 2017.

- CHILLÓN ARIAS, M.A. 2009. Reducción de Boro en aguas procedentes de la desalación. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Departamento de ingeniería Química, Universidad de Alicante. 289 p.
- DÍAZ, J.A.; TEJEDOR, M.; JIMÉNEZ, C.; GRATTAN, S.R.; DORTA, M.; HERNÁNDEZ, J.M. 2013. The imprint of desalinated seawater on recycled wastewater: Consequences for irrigation in Lanzarote Island, Spain. *Agricultural Water Management*, 116: 62-72.
- FOLEY, J.A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K.A., CASSIDY, E.S.; GERBER, J.S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N.D.; O'CONNELL, C.; RAY, D.K.; WEST, P.C.; BALZER, C.; BENNETT, E.M.; CARPENTER, S.R.; HILL, J.; MONFREDA, C.; POLASKY, S.; ROCKSTRÖM, J.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.; TILMAN, D.; ZAKS, D.P.M. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*. 478: 337-342.
- FUENTES YAGÜE, J.L. 2003. Técnicas de Riego, Ed Mundiprensa y Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 4 edición. 483 p.
- FUNDACIÓN AQUAE. 2017. Cifras sobre la desalinización.
<http://www.fundacionaquae.org>
- GARCIA, A.O. 2012. Criterios modernos para la evaluación de agua de riego. 2 parte IAH 7- Septiembre 2012. 9 p.
- GUY FIPPS. 1996. Irrigation Water Quality Standards and Salinity Management Strategies, Texas Agricultural Extensión Service, The Texas A&M University System. 20 p.
- HERNADEZ, M. 2007. La calidad del agua desalada y su impacto en los suelos agrícolas, los cultivos y las instalaciones: Problemas, experiencias y medidas correctoras. XII Master Internacional de Ingeniería de Riego y Drenajes. 17 mayo 2007.
- HERNÁNDEZ, M. 2010. Guía para la remineralización de aguas desaladas. 2 Ed: ACUAMED y Fundación Centro Canario del Agua. 77 p.
- HERNANDEZ, M. 2017a. Irrigation with desalinated water. *El manantial*, 67: 3-4. Ed. Fundación Centro Canario del Agua
http://fcca.es/documentos/03_boletines/english/2017/67-El-Manantial-May-2017-F1.pdf

- HERNANDEZ, M. 2017b. Remineralización de aguas desaladas. Ed. Fundación Centro Canario del Agua. 79 p.
- JONES, M.A.; ODEH, I.; HADDAD, M.; MOHAMM, A.H.; QUINNA, C. 2016. Economic analysis of photovoltaic (PV) powered water pumping and desalination without energy storage for agriculture. *Desalination*, 387: 35-45.
- KANER, A.; TRIPLER, E.; HADAS E.; BEN-GALA, A. 2017. Feasibility of desalination as an alternative to irrigation with water high in salts. *Desalination* 416: 122-128
- MAPAMA (2017). Nota de prensa 3 de agosto de 2017.
http://www.mapama.gob.es/es/prensa/170803obrasemergenciaincrementoaguadesaladamct_tcm7-464633_noticia.pdf.
- MARTÍNEZ-ALVAREZ, V.; MARTÍN GÓRRIZ, B. 2014. Antecedentes y problemática de la aplicación de agua marina desalinizada al riego agrícola. Informe preliminar promovido por el Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo-Segura (SCRATS). 74 p.
- MARTÍNEZ-ALVAREZ, V.; MARTÍN GÓRRIZ, B.; SOTO-GARCÍA, M. 2016. Seawater desalination for crop irrigation-a review of current experiences and revealed key issues. *Desalination*. 381: 58-71.
- MARTÍNEZ-ALVAREZ, V.; GONZÁLEZ-ORTEGA, B.; MARTÍN GÓRRIZ, B.; SOTO-GARCÍA, M. MAESTRE-VALERO, J.F. 2017. The use of desalinated seawater for crop irrigation in the Segura River Basin (South –eastern Spain) . *Desalination*. 422: 153-164.
- MARTÍNEZ BELTRÁN, J.; KOO OSHIMA, S. 2006. Water desalinations for agricultural applications. FAO Land and water discussion paper N° 5, 48 p.
- MORATIEL, R. 2017. Riego en Cultivos Fundamentos y manejo. Ed Mundiprensa 194 p.
- MULTSCH, S.; GRABOWSKI, D.; LÜDERING, J.; ALQUWAIZANY, A.S.; LEHNERT, K.; FREDE, H-G.; WINKER, P.; BREUE, L. 2017. A practical planning software program for desalination in agriculture - SPARE:WATER^{opt}. *Desalination*, 404: 121-131.
- PERAKIS, C.; EL SHENAWY, E.T.; EL GHETANY, H.H.; KYRIAKARAKOS, G. 2017. Design of autonomous PV/RO desalination systems – Case studies for Egypt and Greece *Desalination and Water Treatment*.74: 12-20

- PHYSICAL GEOGRAPHY. 2017. <http://www.physicalgeography.net/>
- PTEA (2015). La I+D+i del agua. Plataforma Tecnológica Española del Agua. a. www.plataformaagua.org
- QADIR, M.; BAHRI, A.; T. SATO, T.; AL-KARADSHEH, E. 2010. Wastewater production, treatment, and irrigation in Middle East and North Africa. *Irrigation Drainage and Systems*, 24: 37-51.
- RAVEH, E., BEN-GAL, A. (2016). Irrigation with water containing salts: Evidence from a macro-data national case study in Israel. *Agricultural Water Management* 170: 176-179.
- SARAI ATAB, M.; A.J. SMALLBONE, A.J.; ROSKILLY, A.P. 2016. An operational and economic study of a reverse osmosis desalination system for potable water and land irrigation. *Desalination*, 397:174-184.
- SILBER, A.; ISRAELI, Y.; ELINGOLD, I.; LEVI, M.; LEVKOVITCH, I.; RUSSO, D.; ASSOULINE, S. 2015. Irrigation with desalinated water: A step toward increasing water saving and crop yields, *Water Resources Research* 51: 450–464.
- VILLALOBOS, F.; FERERES, E. 2017. *Fitotecnia: Principios de agronomía para una agricultura sostenible*. Ed Mindiprensa. 603 p.
- WELLE, P.D.; MEDELLÍN-AZUARA, J.; VIERS, J.; MAUTER, M.S. 2017. Economic and policy drivers of agricultural water desalination in California's central valley. *Agricultural Water Management*, 194: 192-203.
- WHO. 1996. *Analysis of Wastewater for Use in Agriculture A Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques*. World Health Organization. Geneva. 35 p.
- YERMIYAHU, U.; TAL, A.; BEN-GAL, A.; BAR-TAL, A.; TARCHISKY, J.; LAHAV, O. 2007. Rethinking desalinated water quality and agriculture. *Science*. 318: 920-921.
- ZARZO, D.; ELENA CAMPOS, E.; TERRERO, P. 2013. Spanish experience in desalination for agriculture. *Journal Desalination and Water Treatment* 51: 53-66



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS



**ANEXO I: TOLERANCIA A SALES DE LOS CULTIVOS AGRÍCOLAS (Fuente: FAO
56, Allen et al. 1998)**

CULTIVO	CE _e umbral (dS m ⁻¹)	b (%/ dSm ⁻¹)	Cemax	Clase
a. Hortalizas pequeñas				
Brócoli	2.8	9.2	13.7	MS
Col de Bruselas	1.8	9.7	12.1	MS
Repollo	1.0-1.8	9.8-14.0	11.2-8.9	MS
Zanahorias	1.0	14.0	8.1	S
Coliflor	1.8	6.2	17.9	MS
Apio (Céleri)	1.8-2.5	6.2-13.0	17.9-10.2	MS
Lechuga	1.3-1.7	12.0	9.6-10.0	MS
Cebolla	1.2	16.0	7.5	S
Espinaca	2.0-3.2	7.7-16.0	15.0-9.4	MS
Rábano	1.2-2.0	7.6-13.0	14.4-9.7	MS
b. Hortalizas-Familia Solanáceas				
Berenjena	-	-	-	MS
Pimientos	1.5-1.7	12.0-14.0	9.8-8.8	MS
Tomate	0.9-2.5	9.0	12.0-13.6	MS
c. Hortalizas-Familia Cucurbitáceas				
Pepino	1.1-2.5	7.0-13.0	15.4-10.2	MS
Melones	-	-	-	MS
Calabaza de Invierno	1.2	13.0	8.9	MS
Calabacín (zucchini)	4.7	10.0	14.7	MT
Calabaza	3.2	16.0	9.5	MS
Sandía	-	-	-	MS
d. Raíces y Tubérculos				
Remolachas rojas	4.0	9.0	15.1	MT
Chirivía	-	-	-	S
Papa o Patata	1.7	12.0	10.0	MS
Camote o Batata	1.5-2.5	10.0	11.5-12.5	MS
Nabos	0.9	9.0	12.0	MS
Remolacha azucarera	7.0	5.9	23.9	T
e. Leguminosas				
Frijoles o Judías	1.0	19.0	6.3	S
Habas	1.5-1.6	9.6	11.9-12.0	MS
Caupis (cowpeas)	4.9	12.0	13.2	MT
Maní o cacahuete	3.2	29.0	6.6	MS
Guisantes o arveja	1.5	14.0	8.6	S
Soja	5.0	20.0	10.0	MT
f. Hortalizas perennes (con letargo invernal y suelo inicialmente desnudo o con mantillo)				
Alcachofa	-	-	-	MT
Espárragos	4.1	2.0	54.1	T
Menta	-	-	-	-
Fresas	1.0-1.5	11.0-33.0	-	S
g. Cultivos Textiles				
Algodón	7.7	5.2	26.9	T
Lino	1.7	12.0	10.0	MS
h. Cultivos Oleaginosos				
Ricino y Girasol	-	-	-	MS
Cártamo	-	-	-	MT

CULTIVO	CE _e umbral (dS m ⁻¹)	b (%/ dSm ⁻¹)	Cemax	Clase
i. Cereales				
Cebada	8.0	5.0	28.0	T
Avena	-	-		MT
Maíz grano	1.7	12.0	10.0	MS
Maíz dulce	1.7	12.0	10.0	MS
Mijo				M
Sorgo	6.8	16.0	13.1	MT
Arroz (valores CE de agua del suelo al estar la planta sumergida)	3.0	12.0	11.3	S
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	6.0	7.1	20.1	MT
Trigo semi-enano (<i>T. aestivum</i>)	8.6	3.0	41.9	T
Trigo durum (<i>Triticum turgidum</i>)	5.7-5.9	3.8-5.5	32.0-24.1	T
j. Forrajes				
Alfalfa	2.0	7.3	15.7	MS
Cebada (forraje)	6.0	7.1	20.1	MT
Bermuda	6.9	6.4	22.5	T
Trébol, Bersín	1.5	5.7	19.0	MS
Trébol (ladino, rojo, fresa)	1.5	12.0	9.8	MS
Caupis (forraje)	2.5	11.0	11.6	MS
Festuca (pasto fescue)	3.9	5.3-6.2	22.8-20.0	MT
Foxtail	1.5	9.6	11.9	MS
Pasto Harding	4.6	7.6	17.8	MT
Lovegrass	2.0	8.4	13.9	MS
Maíz (forraje)	1.8	7.4	15.3	MS
Pasto Ovillo (orchard grass)	1.5	6.2	17.6	M
Rye-grass (perenne)	5.6	7.6	18.8	MT
Sesbania	2.3	7.0	16.6	MS
Sphaerophysa	2.2	7.0	16.5	MS
Pasto Sudán	2.8	4.3	26.1	MT
Trebol pequeño, hoja estrecha	5.0	10.0	15.0	MT
Trébol grande	2.3	19.0	7.6	MS
Vetch común	3.0	11.0	12.1	MS
Trigo forrajero alto	7.5	4.2	31.3	T
Trigo forrajero, cresta amplia	7.5	6.9	22.0	T
Trigo forrajero, cresta estándar	3.5	4.0	28.5	MT
Pasto Wildrye, beardless	2.7	6.0	19.4	MT
k. Caña de Azúcar	1.7	5.9	18.6	MS
l. Frutas tropicales y Árboles				
Banana	-	-		MS
Café	-	-		
Palma datilera	4.0	3.6	31.8	T
Arboles de palma	-	-		T
Piña (cultivo multi-anual)	-	-		MT
Té	-	-		-
m. Uvas y Moras				
Mora negra	1.5	22.0	6.0	S
Boysenberry	1.5	22.0	6.0	S
Uvas	1.5	9.6	11.9	MS
Lúpulo	-	-		-

CULTIVO	CE _e umbral (dS m ⁻¹)	b (%/ dSm ⁻¹)	Cemax	Clase
n. Árboles Frutales				
Almendras	1.5	19.0	6.8	S
Aguacate	-	-	-	S
Cítricos (Naranja)	1.7	16.0	8.0	S
Cítricos (Limón)	-	-	-	S
Cítricos (Lima)	-	-	-	S
Cítricos (Pomelo)	-	-	-	S
Cítricos (Mandarina)	-	-	-	S
Coníferas	-	-	-	MS/MT
Huertos de hoja caduca				
Manzana	-	-	-	S
Durazno o melocotón	1.7	21.0	6.5	S
Cereza	-	-	-	S
Pera	-	-	-	S
Albaricoque	1.6	24.0	5.8	S
Ciruela	1.5	18.0	7.1	S
Granada	-	-	-	MT
Olivo	-	-	-	MT

⁽¹⁾ Reducción de la productividad por incremento de CE [%/(dS m-1)]