

B-08-2020

## CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LA ELIMINACIÓN DE BORO EN EL AGUA MARINA DESALINIZADA PARA SU USO AGRICOLA

*Maestre-Valero J.F. <sup>(1)</sup> (P), Jodar-Conesa, F.J. <sup>(1)</sup>, Acosta-Avilés, J.A. <sup>(1)</sup>, Martín-Gorrión, B. <sup>(1)</sup>, Riquelme-Caballero, J.C. <sup>(2)</sup>, Molina del Toro, R. <sup>(2)</sup>, Martínez-Alvarez, V. <sup>(1)</sup>,*

<sup>1</sup>Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena, España. E-mail: [josef.maestre@upct.es](mailto:josef.maestre@upct.es)

<sup>2</sup>Ecohidro Agua y Medio Ambiente Ebt, SL. Pol. Ind. El Arreaque módulo 10, parcelas 4/8 30170 – Mula (Murcia), España. Email: [ruben.molina@ecohidro.es](mailto:ruben.molina@ecohidro.es)

### 1) Introducción

La escasez de agua en la Cuenca del Segura (Sureste de España) ha dado lugar a la utilización frecuente de agua marina desalinizada (AMD) para el riego. El AMD, aun teniendo una baja conductividad eléctrica, que varía entre 0,36 y 0,90 dS/m, presenta una elevada concentración de sodio, cloruro y boro. El boro es un nutriente esencial para los cultivos, puesto que tiene funcionalidad estructural y además está relacionado con la división, el crecimiento celular, la germinación y la regulación hormonal, entre otros. Sin embargo, la barrera entre la concentración a la que es adecuado y a la que puede ser tóxico para los cultivos es muy estrecha, especialmente para cultivos sensibles como los cítricos. La concentración de boro en el AMD suele superar los umbrales de toxicidad de los cultivos leñosos. En estos cultivos, la toxicidad por boro puede dañar las plantas y afectar a la producción y a la calidad de la cosecha. En la actualidad existen una gran variedad de métodos de eliminación de boro (De la Fuente García-Soto, 2000) entre los que destaca su separación por membranas de osmosis inversa. La ósmosis inversa no presenta ninguna selectividad específica por el boro y por lo tanto produce un agua prácticamente desmineralizada. En Chillón Arias (2009) se presentan las variables más importantes que afectan a la eficiencia en la eliminación del boro. Por un lado, el pH es si cabe el factor más influyente pues un incremento de pH por encima de 9 transforma el ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) en borato ( $BO_3^{3-}$ ). El  $H_3BO_3$  tiene hidrógenos ácidos y no tiene carga, por lo tanto, es capaz de formar enlaces con los grupos activos de las membranas mediante puentes de hidrogeno y atravesarlas. Sin embargo, el ion  $BO_3^{3-}$  no es capaz de formar enlaces con los grupos activos de las membranas y por lo tanto es más retenido por estas. En segundo lugar, la temperatura del agua afecta a la difusión de agua e iones disueltos a través de la membrana semipermeable. Duman y Özmetin (2014) evidenciaron que la tasa de reducción de boro en el agua permeada en función de la temperatura es de casi un 1% por cada grado centígrado. Este es el motivo por el cual los cambios de temperatura del agua pueden generar variaciones en el flujo de tratamiento y se pueden compensar mediante el ajuste de la presión del agua de entrada. Además, la presencia de otras sales disueltas en el agua a tratar influye en la ionización del  $H_3BO_3$ . Se ha comprobado que para conseguir la ionización del 50% del ácido bórico en aguas de baja salinidad, es necesario incrementar el pH hasta 9,5 (Glueckstern et al., 2003). La composición química de las membranas es otro de los factores a considerar. En este sentido, en la actualidad existen membranas para el tratamiento

de aguas con un rechazo de sales totales disueltas de hasta el 99,8% y rechazos de boro del 91 al 93% (Taniguchi et al., 2004). Finalmente, el paso de agua a través de una membrana semipermeable depende del gradiente de presiones a ambos lados de esta, y el paso de sales se encuentra en función del gradiente de concentraciones. A medida que se incrementa la presión, aumenta la conversión (cociente del caudal de agua producto entre el caudal de agua bruta) y además, la eficiencia de eliminación de boro en el agua. (Cengeloglu et al., 2008; Duman y Özmetin, 2014)

En este contexto, el objetivo de este estudio es caracterizar, desde un punto de vista técnico y energético, la reducción en parcela de la concentración de boro en AMD mediante el empleo de membranas de osmosis inversa.

## 2) Materiales y métodos

### 2.1) Sistema de reducción de boro por membranas de osmosis inversa

El ensayo experimental se ha llevado a cabo en Torre Pacheco – Murcia (37°47'30" N; 1°03'85" O). El equipo implementado para reducir la concentración de boro en el AMD (Modelo: Hidropure ZOX1; EcoHidro Agua y Medio Ambiente EBT S.A) se basa en la separación del boro por membranas de osmosis inversa. El sistema, compuesto por seis bastidores de osmosis inversa, tiene una potencia instalada de 3,87 kW, opera a una presión de 7,5 bar una vez alcanzado el régimen estacionario y permite un caudal de tratamiento máximo de 1,47 m<sup>3</sup>/h. Las membranas instaladas (Modelo: CPA7-LD 4040), permiten una reducción de sales máxima de 99,8% a una temperatura de operación de 25 °C dentro de un rango de pH de 6,5-7,0. El equipo dispone además de dos depósitos de 50L, uno de ellos para el almacenamiento de una solución de hidróxido de sodio empleada para incrementar el pH del agua previo a su entrada en las membranas y el otro para el almacenamiento de solución antiincrustante al objeto de preservar la vida útil y la eficiencia de las membranas. Los caudales de inyección de hidróxido de sodio y antiincrustante fueron de 1,5 y 0,5 L/h, respectivamente. La Figura 1 muestra una imagen del equipo de reducción de boro instalado para el ensayo experimental.

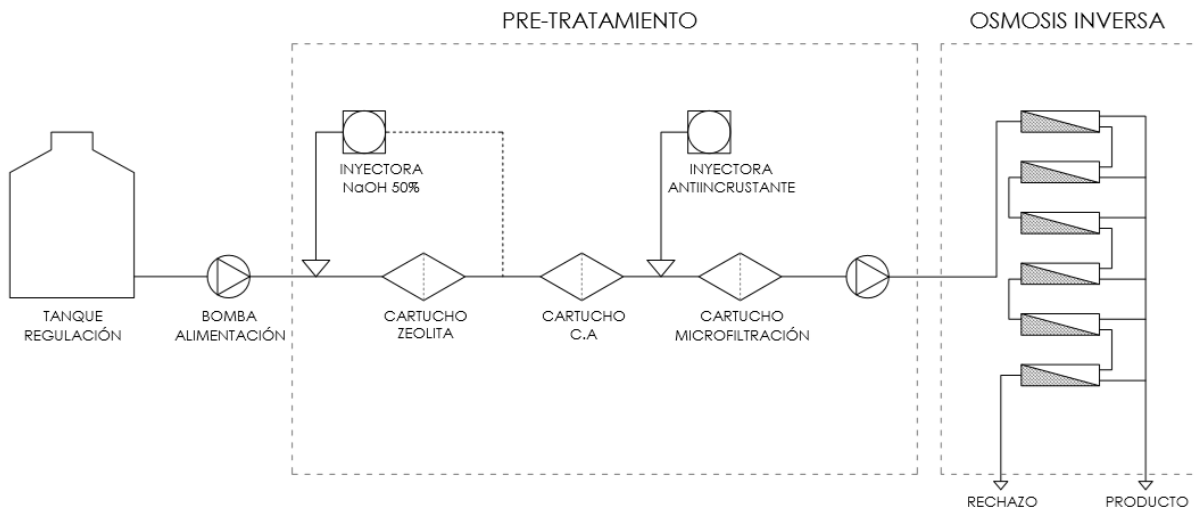


**Figura 1.** Equipo de reducción de boro en el agua de riego basado en la implementación de membranas de osmosis inversa (izquierda: parte frontal;

derecha: parte posterior). Proyecto Retos-Colaboración SEARRISOST–RTC–2017-6192-2.

## 2.2) Proceso de reducción y monitorización

En el equipo de reducción de boro, el agua se obtuvo por un bombeo de alimentación de un depósito de regulación que aseguró el suministro de AMD con altas concentraciones en boro ( $\approx 1$  ppm). Tras el bombeo de alimentación el AMD se sometió al ajuste de pH mediante la inyección automática de una solución de hidróxido de sodio a razón de 1,5 l/h. A continuación, el agua se filtró en un lecho de zeolita y posteriormente en cartuchos de carbón activo. Previo a la entrada del agua a este último filtro, se determinó el pH mediante un electrodo REDOX calibrado. A la salida del filtro de carbón activo, otra bomba dosificadora se encargó de inyectar el antiincrustante a razón de 0,5 l/h. Tras este pretratamiento, el agua se impulsó mediante un bombeo eléctrico regulado por un variador de frecuencia, hacia los bastidores de osmosis inversa que, tras el proceso de filtrado, permitió obtener agua producto con reducida concentración de boro (0,2 ppm) y agua de rechazo (boro  $\approx 3-4$  ppm). La Figura 2 muestra un diagrama del proceso descrito.



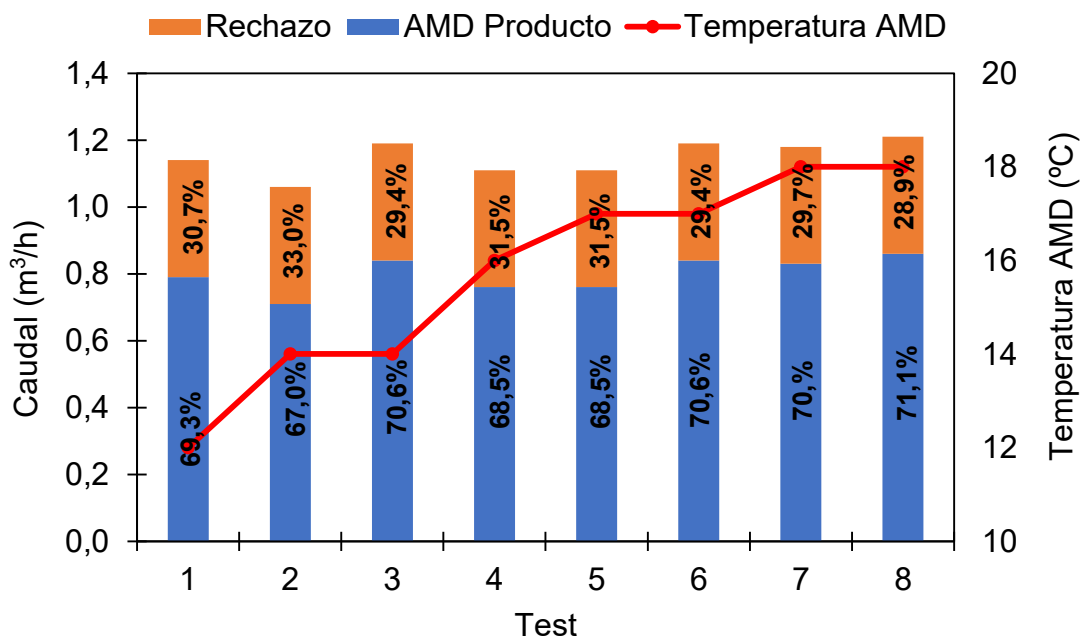
**Figura 2.** Diagrama de flujo de corrientes del sistema de osmosis Inversa descrito para la reducción del boro en el agua marina desalinizada. Proyecto Retos-Colaboración SEARRISOST–RTC–2017-6192-2.

Al objeto de evaluar la eficiencia técnica y energética del equipo de reducción de boro se realizaron dos tipos de test. El primero de ellos, en el que se realizaron ocho pruebas, se evaluó a pH y presión constantes ( $\text{pH} = 10,3 \pm 0,5$  y  $\text{Presión} = 7,5 \pm 0,1$  bar) el efecto de la temperatura del AMD sobre los caudales tratados, el AMD con reducida concentración de boro y el rechazo y la eficiencia en la reducción del boro. En el segundo test se realizaron cinco pruebas a pH y temperatura constantes ( $\text{pH} = 10,1 \pm 0,2$  y  $\text{Temperatura del AMD} = 17,4 \pm 0,5$  °C) y se evaluó el efecto de la presión sobre los caudales tratados, el AMD con reducida concentración de boro y el rechazo. Cada test, duró 10 minutos y consistió en (i) arranque del equipo de reducción de concentración de boro, (ii) monitoreo del proceso a 1 minuto, 5 minutos y 10 minutos tras el arranque y (iii) toma de muestras de AMD, AMD con reducida concentración de boro y agua de rechazo.

Para la caracterización técnica, se determinaron para cada una de las fases de funcionamiento del equipo (1, 5 y 10 minutos) las siguientes variables: (i) caudal de AMD a la entrada del equipo de reducción de boro, (ii) caudal de agua producto, (iii) caudal de agua de rechazo, (iv) pH mediante un pHmetro CRISON GLP21, (v) conductividad eléctrica mediante un conductímetro CRISON GLP31, (vi) tensión de la red eléctrica, (vii) intensidad de cada fase mediante una pinza amperimétrica, (viii) presión de trabajo y (ix) temperatura del agua. Adicionalmente, las muestras de agua (AMD, AMD con reducida concentración de boro y agua de rechazo) recogidas en la etapa de proceso comprendida entre 5-10 minutos (régimen de funcionamiento estable), se analizaron mediante plasma acoplado inductivamente (ICP-MS Agilent Technologies, Modelo 7900, Santa Clara, CA, EE. UU.) para determinar la concentración de boro y la eficiencia del equipo en su reducción. Los consumos de energía (kW·h) se valoraron económicamente teniendo en cuenta un coste medio del kW·h de 0,08 € de acuerdo a factura eléctrica.

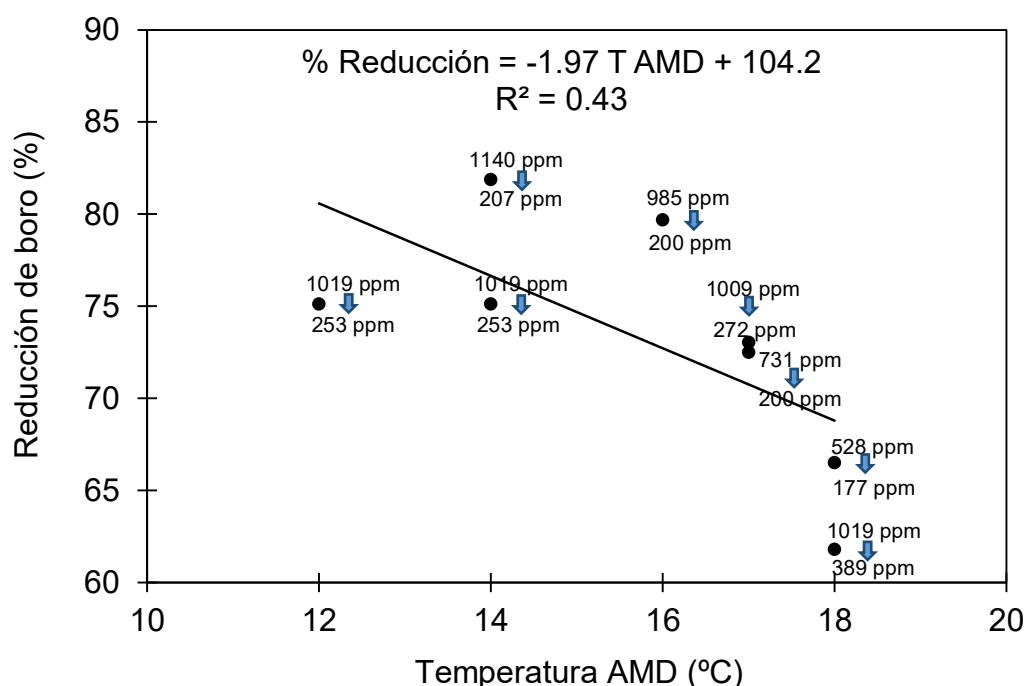
### 3) Resultados y discusión

En el primer ensayo, que consistió en ocho test a pH y presión constantes y una variación de la temperatura del AMD entre 12 y 18 °C (Figura 3), no se observó efecto de la misma sobre los caudales tratados que oscilaron entre 1,06 y 1,21 m<sup>3</sup>/h (entre 0,71 y 0,86 m<sup>3</sup>/h de AMD producto; *i.e.* aproximadamente el 70% y 0,35 m<sup>3</sup>/h de rechazo; *i.e.* aproximadamente el 30%). Este resultado fue contrario a lo observado por otros autores quienes detectaron incrementos significativos del caudal tratado asociados a incrementos de temperatura (Fregel et al., 2015). Esta diferencia podría explicarse por el reducido rango de temperaturas en este estudio (de 12 a 18 °C) comparado al experimentado por Fregel et al. (2015) (de 21 a 34,3 °C).



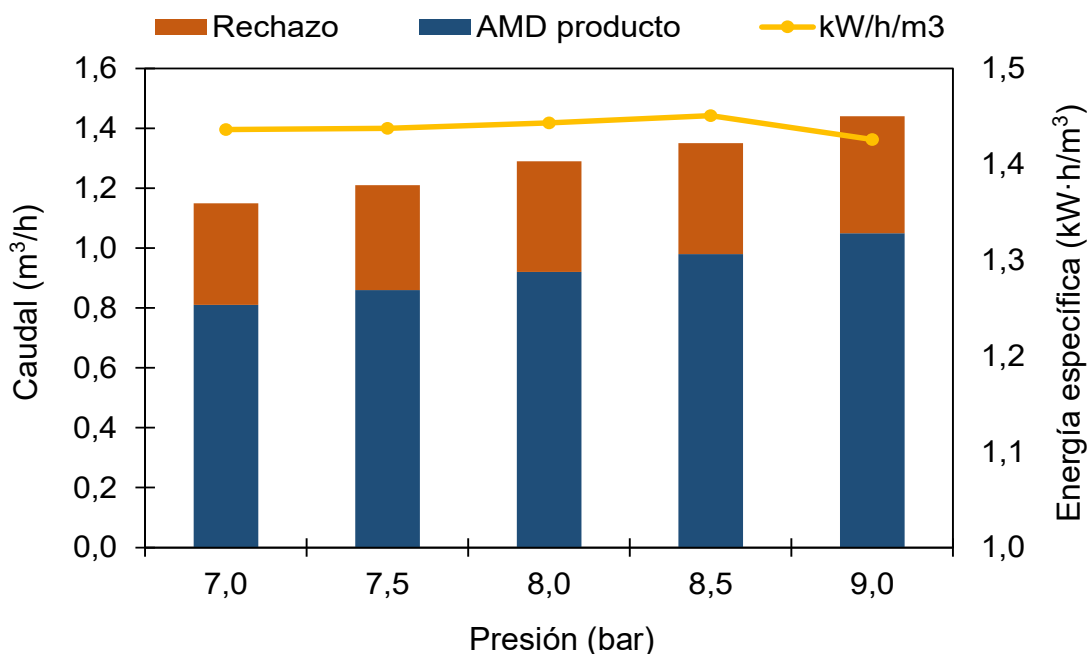
**Figura 3.** Efecto de la temperatura del agua marina desalinizada en los caudales tratados, de agua marina desalinizada con baja concentración de boro y de agua de rechazo. Ensayo realizado a pH y presión constantes (pH = 10,3±0,5 y Presión = 7,5±0,1 bar).

En este primer ensayo, la concentración media de boro en el AMD fue de  $879,3 \pm 226,0$  ppm y en el agua de rechazo de  $216,8 \pm 33,5$  ppm. El incremento de temperatura del AMD produjo una reducción notable en la eficiencia en la reducción del boro como se puede observar en la Figura 4. En este sentido, por cada incremento de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se observó una disminución de la eficiencia de reducción de boro de un 2%, valor que fue ligeramente superior a los observados por Duman y Özmetin (2014). Para temperaturas entre  $12$  y  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  la reducción media del boro fue de  $77,9 \pm 3,4\%$  mientras que para temperaturas entre  $17$  y  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  la reducción media del boro fue de  $68,5 \pm 5,3\%$  (Figura 4). Además, es importante resaltar el hecho de que un incremento de la temperatura del agua de  $12$  a  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  en un agua con una misma concentración inicial de boro ( $1019$  ppm) redujo considerablemente la eficiencia de reducción de boro (de  $75,1\%$  a  $61,8\%$ ) (Figura 4). Este resultado fue también observado en otros estudios (Fregel et al., 2015).



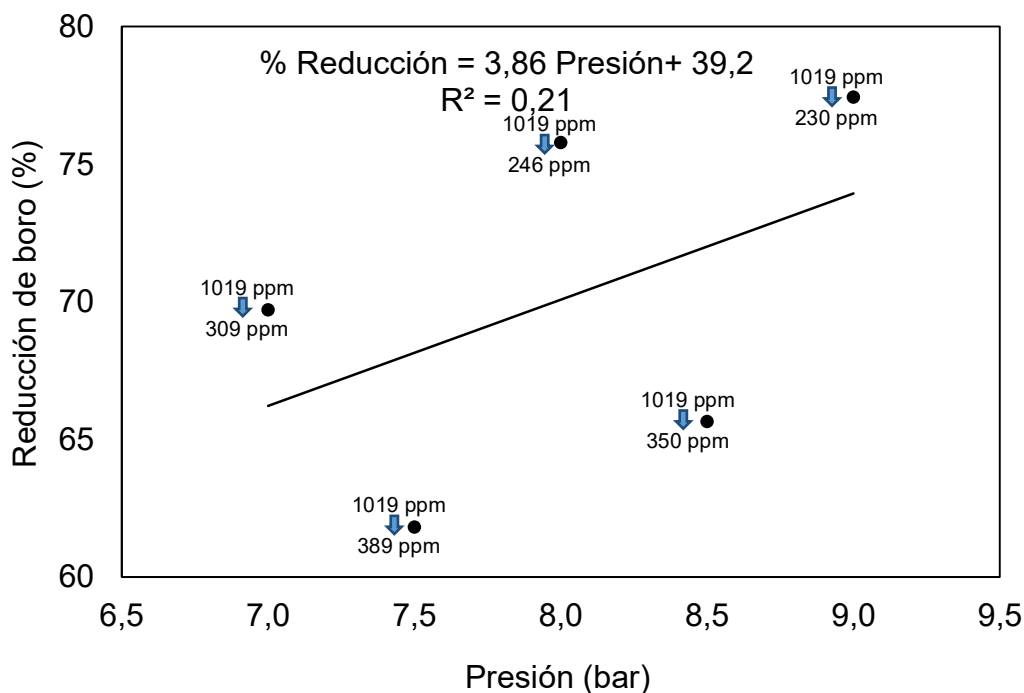
**Figura 4.** Efecto de la temperatura del agua marina desalinizada sobre el porcentaje de reducción de boro. Ensayo realizado a pH y presión constantes (pH =  $10,3 \pm 0,5$  y Presión =  $7,5 \pm 0,1$  bar).

Con respecto al estudio del efecto de la variación de la presión (entre 7 y 9 bar) en el caudal del AMD tratado, a pH y temperatura constantes, los resultados indicaron una relación lineal, de modo que el incremento de caudal fue directamente proporcional al incremento de presión (Figura 5) (Cengeloglu et al., 2008). La relación observada, *caudal de AMD tratada* =  $0,14$  Presión +  $0,14$ , presentó un elevado coeficiente de correlación,  $R^2$ , de 99,5%. A pesar de que los incrementos de presión supusieron un aumento de la energía consumida, el incremento de caudal tratado asociado propició que no se detectaran diferencias en el consumo de energía específico ( $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ) con estos incrementos de presión (Figura 5).



**Figura 5.** Efecto de la presión sobre los caudales tratados, de agua marina desalinizada con baja concentración de boro y agua de rechazo y sobre la energía específica consumida. Ensayo realizado a pH y temperatura constantes ( $\text{pH} = 10,1 \pm 0,2$  y Temperatura del AMD =  $17,4 \pm 0,5$  °C).

El incremento de la presión produjo un incremento en la eficiencia de la reducción de boro (Cengeloglu et al., 2008), aunque los resultados presentaron cierta histéresis y por lo tanto es necesario continuar con los ensayos al objeto de reunir una base datos más extensa (Figura 6). En este segundo ensayo la concentración media de boro en el AMD fue 1019,1 ppm y en el agua de rechazo  $304,9 \pm 67,4$  ppm (Figura 6).



**Figura 6.** Efecto de la presión sobre el porcentaje de reducción de boro. Ensayo realizado a pH y temperatura constantes (pH =  $10,1 \pm 0,2$  y Temperatura del AMD =  $17,4 \pm 0,5$  °C).

Finalmente, el coste económico de la energía necesaria para la reducción del boro en el AMD mediante un equipo de membranas de osmosis inversa en parcela, valorando el coste del kW·h a 0,08 € (datos extraídos de la factura del regante excluyendo el término de potencia), fue de 0,12 €/m<sup>3</sup>.

## 5) Conclusiones y recomendaciones

Este estudio evalúa, desde un punto de vista técnico y energético, la reducción en parcela de la concentración de boro en agua marina desalinizada (AMD) mediante el empleo de membranas de osmosis inversa. A diferencia de otros estudios publicados, el incremento de temperatura, a pH y presión constantes, no ha producido efectos sobre el caudal del AMD tratado, circunstancia que se explica por el rango estrecho de variación de temperatura (12 – 18 °C). Sin embargo, cada incremento unitario de temperatura ha producido una reducción de un 2% en la eficiencia de reducción del boro. El incremento de presión, a pH y temperatura constantes, ha producido un aumento de los caudales de AMD tratados y de agua producto. Un incremento unitario de presión ha significado un aumento del 4% en la eficiencia en la reducción del boro. El estudio económico sobre el consumo energético asociado a la reducción del boro ha mostrado un coste de reducción del boro de 0,12 €/m<sup>3</sup>.

Actualmente los ensayos y analíticas se encuentran en desarrollo dentro del marco del proyecto Retos-Colaboración SEARRISOST–RTC–2017-6192-2. Es por lo tanto recomendable continuar con la adquisición de datos mediante la realización de más pruebas al objeto de ampliar el abanico de condiciones de temperatura, presión y concentración del boro en el AMD. Además, en futuros trabajos es conveniente incluir en el estudio económico el coste de la inversión en el equipo y el resto de

costes de operación al objeto de obtener un valor más real del coste de reducción del boro por cada m<sup>3</sup> de AMD tratada,

## 6) Agradecimientos

El estudio agradece la financiación a través del proyecto Retos-Colaboración SEARRISOST–RTC–2017-6192-2 financiado con fondos de la Agencia Nacional de Investigación y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

## 7) Bibliografía

- Azcón Vieto, J., & Talón, M. (2008). *FUNDAMENTOS DE FISIOLOGÍA VEGETAL*. Madrid: Universidad de Barcelona.
- Cengeloglu, Y., Arslan, G., Tor, A., Kocak, I., & Dursun, N. (2008). *Removal of boron from water by using reverse osmosis*. Selcuk University, Department of Chemistry, Department of Environmental Engineering and Department of soil. Konya, Turquía: Elsevier.
- Chillón Arias, M. F. (2009). *Reducción de boro en aguas procedentes de desalación*. Universidad de Alicante, Departamento de Ingeniería Química, Alicante.
- De la Fuente García-Soto, M. d. (2000). *Diseño y desarrollo de un sistema de tratamiento para la eliminación de boro en vertidos industriales*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Duman, M. V., & Özmetin, E. (2014). *Boron removal from waste water originating in the Open Pit Mines of Bigadiç Boron work by means of reverse osmosis*. Cagis Campus, Balikesir University, Department of Environmental Engineering, Bigadiç.
- Glueckstern, P., & Priel, M. (2003). Optimization of boron removal in old and new SWRO systems. *Desalination*.
- Taniguchi, M., Fusaoka, Y., Nishikawa, T., & Kurihara, M. (2004). *Boron removal in seawater RO desalination*. Toray Industries, Inc.