



Experiencia en la operación de la planta de EDR en la ETAP Llobregat para mejorar la calidad del agua de consumo de Barcelona y de su área metropolitana

Desde 2009 opera, como parte de la estación de tratamiento de aguas potables (ETAP) del Llobregat, la mayor planta de electrodiálisis reversible (EDR) del mundo. El agua del río Llobregat tiene altas concentraciones de Na^+ , K^+ , Cl^- y Br^- y un amplio rango de conductividades y temperaturas. Los altos niveles de Br^- , la materia orgánica y la temperatura producen trihalometanos (THM) después de la desinfección con cloro, generando un perfil bromado. Durante los últimos 7 años la ETAP ha producido 377 hm^3 , de los cuales 153 hm^3 han sido tratados por EDR (40% del agua producto). El estudio muestra los resultados operacionales y de calidad, que han conseguido mejorar la calidad del agua de consumo que abastece el área de Barcelona y minimizar el nivel de THM.

Palabras clave

EDR, bromuro, ETAP, desalinización, THM.

EXPERIENCE IN THE OPERATION OF LLOBREGAT DWTP USING EDR TECHNOLOGY TO IMPROVE THE QUALITY OF DRINKING WATER OF BARCELONA AND ITS AREA

Since 2009 is in operation (as a part of the Llobregat drinking water treatment plant -DWTP-), the largest plant in the world using electro dialysis reversal (EDR) technology. Raw water from Llobregat River has high concentrations Na^+ , K^+ , Cl^- and Br^- and a wide range of conductivities and temperatures. High levels of Br^- , natural organic matter and temperature produce trihalomethanes (THM) after chlorination, showing a brominated profile. During the last 7 years the plant has produced 377 hm^3 , 153 hm^3 of which treated by the EDR step (40% of product water). The study shows the operational and quality results after seven years of plant operation which had improved the quality of drinking water supplying the Barcelona area.

Keywords

EDR, bromide, DWTP, desalination, THM.

Pere Emiliano Estapé

técnico de I+D+i y Control de Procesos de ATLL Concessionària de la Generalitat de Catalunya (ATLL CGCSA)

Àngel Barceló Martínez

responsable de tratamiento EDR de ATLL Concessionària de la Generalitat de Catalunya (ATLL CGCSA)

Fernando Valero Cervera

jefe de I+D+i y Control de Procesos de ATLL Concessionària de la Generalitat de Catalunya (ATLL CGCSA)

* Trabajo presentado parcialmente en el 13th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies, Jerez de la Frontera, junio 2016



1. INTRODUCCIÓN

La estación de tratamiento de agua potable (ETAP) del Llobregat se abastece del agua del río Llobregat. Este río tiene un caudal bajo e irregular además de un agua de baja calidad, con altos contenidos de sales como K^{+1} , Ca^{+2} , Na^{+1} , Cl^{-1} y Br^{-1} . Este hecho se asocia a la explotación minera de potasa aguas arriba desde 1920 y a la gestión de los residuos mineros que ha contribuido al incremento del contenido salino del agua del río [1].

Así mismo, la presencia del ion bromuro en el agua facilita la formación de trihalometanos (THM) después de la cloración. De esta manera, el agua producto presenta un perfil bromado muy característico, distinto del perfil clorado más común en la mayoría de aguas. La legislación europea fija un valor paramétrico de 100 $\mu g/L$ para la suma de las concentraciones de cuatro THM: cloroformo ($CHCl_3$), bromoformo ($CHBr_3$), bromodiclorometano ($CHBrCl_2$) y dibromoclorometano ($CHBr_2Cl$). Estudios realizados muestran una toxicidad variable según la especie, bromoformo > dibromoclorometano > bromodiclorometano > cloroformo, lo que sugiere una influencia de los átomos de bromo en el aumento de la citotoxicidad de los THM [2].

La importancia estratégica de los recursos hídricos de la cuenca del Llobregat es fundamental para el sistema de abastecimiento de agua de Barcelona y de su área metropolitana [3]. Por esta razón, es necesario

contar con un tratamiento robusto para garantizar la mejor calidad del agua para el abastecimiento.

La ETAP del Llobregat (**Figura 1**) está actualmente operada por la compañía ATLL Concessionària de la Generalitat de Catalunya (ATLL), que abastece agua potable a más de 4,5 millones de personas, distribuyendo agua de consumo en alta a los depósitos municipales. La ETAP puede procesar hasta 3,2 m^3/s con el tratamiento convencional, incluyendo: preoxidación con permanganato potásico, ajuste del pH con dosificación de CO_2 , coagulación, floculación, decantación, oxidación con dióxido de cloro, filtración con arena, filtración con carbón activado (GAC), y la cloración final utilizando $NaClO$.

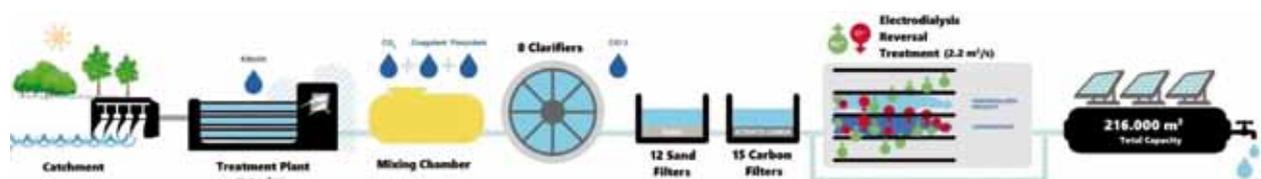
Después de los filtros de carbón activado, es posible derivar una parte del caudal para procesar hasta 2,2 m^3/s mediante la etapa de electrodiálisis reversible (EDR). El agua producto de la EDR es mezclada con el agua filtrada por carbón en la proporción necesaria para obtener un agua final (producto ETAP) con la calidad objetivo. Esta mezcla evita el paso de remineralización con $Ca(OH)_2$ y CO_2 , que se activaría si toda el agua captada se tratase por la línea de EDR y se distribuyese directamente. La EDR inició su funcionamiento con una puesta en marcha en Junio de 2008, y luego comenzó la operación normal en abril de 2009 [4].

La EDR es un proceso donde los minerales y otros componentes en el agua se separan en función de

la carga eléctrica de sus iones [5], aplicando corriente continua entre dos electrodos (uno negativo y uno positivo). La EDR es una variación del procedimiento de electrodiálisis en el cual se utilizan cambios periódicos de polaridad para limpiar automáticamente la superficie de las membranas. Cuando se invierte la polaridad (habitualmente cada 20 minutos), la corriente de agua producto y la de concentrado (salmuera) también se invierten de la misma manera que lo hacen las reacciones químicas en los electrodos. En el electrodo negativo, las reacciones producen hidrógeno gas e iones hidróxido. El hidróxido eleva el pH del agua lo que causa la precipitación de carbonato de calcio, que se minimizan mediante la dosificación de ácido clorhídrico. En el electrodo positivo, las reacciones producen ácido, oxígeno y cloro. El ácido tiende a disolver el carbonato de calcio presente y a evitar la precipitación de otras sales.

El proceso de EDR de la ETAP del Llobregat incluye nueve módulos con dos etapas de EDR con un total de 576 pilas con 600 pares de celdas en cada pila (MARK-IV-2). Cada pila original agrupa 600 pares de celdas entre dos electrodos metálicos de Pt-Ti. El proceso utiliza corriente continua (DC) para transferir las especies iónicas del agua de alimentación, atraídas por los electrodos: cátodo (iones cargados positivamente) y ánodo (iones cargados negativamente), hacia una corriente de concentrado (salmuera) creando una

FIGURA 1. Diagrama de proceso ETAP Llobregat.



corriente más diluida o producto [6]. Un par de celdas está constituido por:

- Membrana aniónica selectiva.
- Espaciador de concentrado (salmuera).
- Membrana catiónica selectiva.
- Espaciador de diluido (producto).

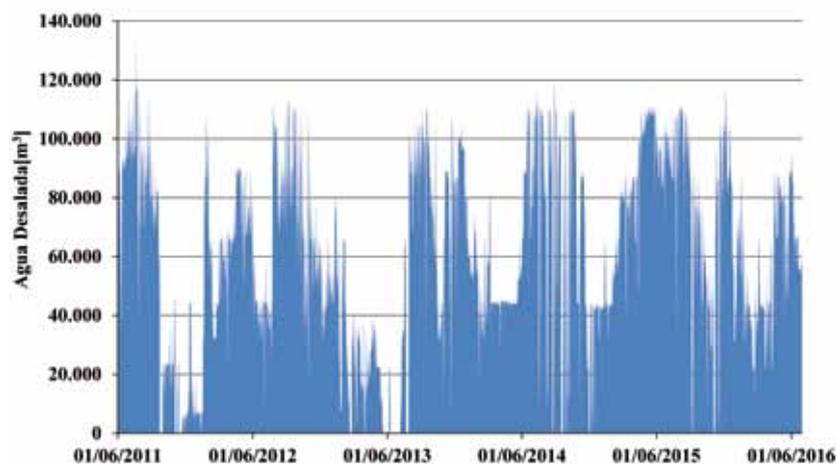
2. MATERIAL Y MÉTODOS

La etapa de desalinización por EDR en la ETAP Llobregat ha estado operando con regularidad desde junio de 2009 y es una etapa necesaria teniendo en cuenta las condiciones del agua cruda. Durante los últimos 7 años la ETAP ha producido 377 hm³, de los cuales 153 hm³ han sido tratados por EDR, lo que representa un 40% del agua producto. Cada una de los nueve módulos ha trabajado más de 17.000 h, cuando el tiempo esperado de trabajo de los electrodos originales (metálicos de Pt-Ti) se estimaba en 13.000 h.

Los resultados de este trabajo recogen datos desde junio 2011 hasta julio de 2016, con 206 muestreos. Los puntos de muestreo fueron agua filtrada por carbón (alimentación de la etapa de EDR), etapa 1 y 2 de EDR, agua producto de EDR y salmuera. Los parámetros químicos analizados han sido parámetros fisicoquímicos: pH, CE, T, UV (254 nm), TOC, amonio, Br⁻¹, Cl⁻¹, ClO₂⁻¹, ClO₃⁻¹, turbidez, SO₄⁻², alcalinidad total (TAC), LSI, elementos inorgánicos, THM totales y THM-FP (25 °C), utilizando adaptaciones de los *Standard Methods*.

Se debe considerar que el estudio se ha llevado a cabo siguiendo el plan de muestreo establecido para el control de calidad del proceso y la operación diaria de la planta de EDR, de este modo la tecnología no ha sido forzada durante el es-

FIGURA 2. Caudal (m³/día) de agua desalinizada por la etapa de EDR en la ETAP Llobregat.



tudio. La periodicidad de muestreos es de aproximadamente cada dos semanas.

El estudio analiza la reducción de sales del agua durante estos años a través del porcentaje de eliminación de los diferentes parámetros seleccionados. El alto número de muestras, el largo periodo de estudio y el hecho de que los muestreos se hayan hecho con el funcionamiento normal hace que el estudio tenga una base firme y los resultados describan con veracidad el comportamiento real de la tecnología.

La etapa de EDR ha tratado 113,5 hm³ de agua en el período del estudio, comprendido entre junio de 2011 a julio de 2016 con un caudal variable en función de la temporada (**Figura 2**). El agua de alimentación presenta un rango muy amplio de conductividades (800-2.000 µS/cm, pudiendo llegar hasta 2.500 µS/cm, y estando la planta parametrizada hasta 3.000 µS/cm) y temperaturas (2-26 °C). En este período, el agua desalinizada ha representado aproximadamente el 45% del agua producto de la ETAP. Los nueve módulos han estado operando alternativamente en función de las inciden-

cias, el mantenimiento y la operación de la ETAP. El objetivo es mantener un número similar de horas para cada módulo. Hasta julio del año 2016 los módulos han operado entre 17.500 y 19.000 horas desde su puesta en servicio en junio de 2009. Se trata de un factor importante porque los electrodos metálicos de las pilas tienen una vida media estimada de 13.000 h, por lo tanto permite evaluar si la acumulación de horas operativas causa una disminución de la eficiencia de la etapa de EDR y la degradación de los electrodos.

La tecnología de EDR presenta dos importantes ventajas frente a la ósmosis inversa (OI): un menor consumo energético y una mayor recuperación hidráulica. Con el fin de aumentar la recuperación de agua, tres corrientes principales son recicladas: salmuera, agua fuera de especificaciones (*off-spec*) y el caudal de electrodos. Así, estos flujos pueden ser incorporados de nuevo hacia el bucle de salmuera de manera que se minimiza el agua de alimentación y se aumenta la recuperación hidráulica. En el período de tiempo entre 2011 y 2016 el promedio de recuperación de agua es superior al 91%.



» La tecnología de EDR presenta dos grandes ventajas frente a la ósmosis inversa: un menor consumo energético y una mayor recuperación hidráulica. En el caso de la ETAP de Llobregat, y tras 7 años de operación, la tecnología de EDR se ha mostrado como una tecnología robusta, capaz de asumir los cambios operativos y de la calidad del agua, con un rendimiento hidráulico superior al 91% y con un consumo energético para el proceso de 0,58 kWh/m³

En relación al consumo total de energía, la tecnología se opera intentando alcanzar el menor coste posible. En la actualidad, el consumo medio de energía para el proceso de EDR en el periodo entre 2011 y 2016 es de aproximadamente 0,58 kWh/m³ (incluyendo la corriente directa a los rectificadores y los bombeos de alimentación, salmuera y aportación). No hay evidencias tangibles de que la recuperación hidráulica o la evolución del consumo energético anual, se hayan visto afectadas por el envejecimiento de la instalación.

Además, la tecnología necesita un mantenimiento preventivo y correctivo. El mantenimiento principal se basa en el reemplazo y la limpieza manual de membranas, limpiezas químicas, detección de *hot spots*, y el mantenimiento de los electrodos. Estas acciones se centran básicamente en la prevención y la eliminación de las incrustaciones y las sales precipitadas. En general, las tecnologías de membrana no permiten la limpieza de estas y, por tanto, si la membrana tiene mucha incrustación la única solución es su sustitución. Por lo tanto, la posibilidad de limpiar membranas y repararlas es un beneficio económico

importante de la tecnología. Así, la tasa anual de sustitución de membranas ha sido muy inferior al 3% esperado. En concreto en el periodo estudiado se han reemplazado unas 8.100 membranas aniónicas, cerca de 800 membranas catiónicas y 900 espaciadores. Las características del agua en origen (mucho materia orgánica cargada negativamente) provocan que las membranas aniónicas se ensucien y dañen más que las membranas catiónicas.

La tecnología está en mejora continua. En general, los cambios se han probado primero en la planta piloto de la ETAP, de 20 m³/h (con dos líneas de EDR independientes de 10 m³/h), para implementarlos después en la planta industrial. La configuración actual de la planta incluye dos tipos de electrodos en las pilas: hay 512 pilas con electrodos metálicos (Pt-Ti) y 64 pilas con electrodos de carbono, resultado del progreso científico-técnico de la tecnología aportada por el fabricante GE W&P. Los electrodos de carbono son los más nuevos y no producen gas en los compartimentos de electrodos.

Además, se está trabajando simultáneamente con dos tipos de membranas aniónicas: los modelos

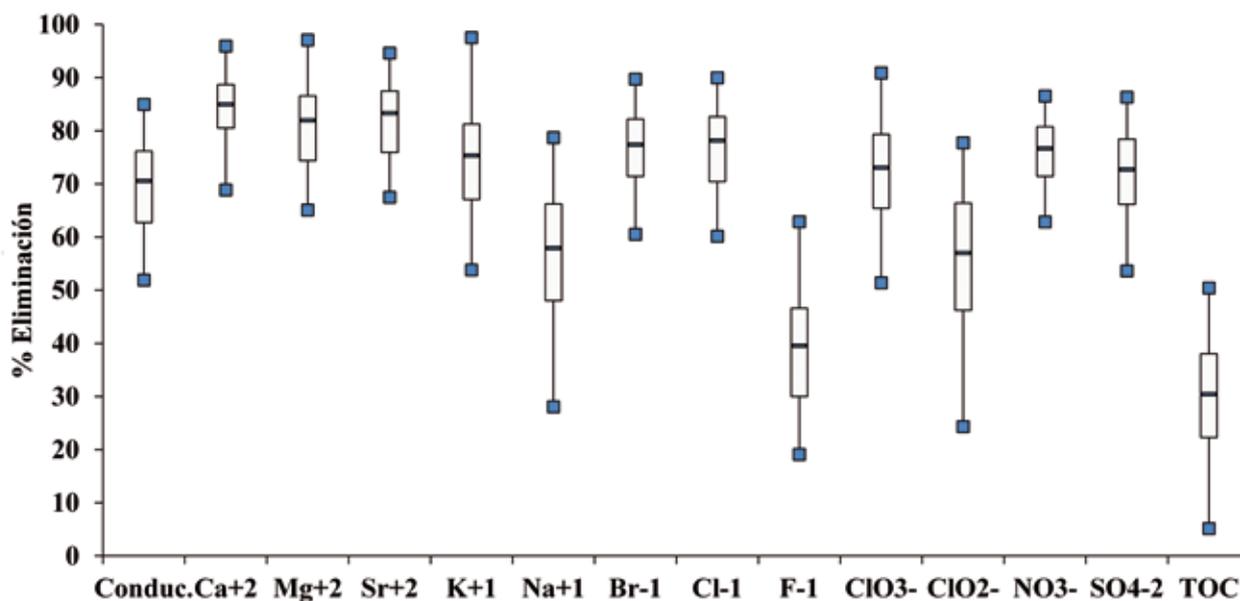
AR204 (originales) y AR908. Las membranas aniónicas AR908 permiten un rango mayor de pH en los procesos de limpieza y proporcionan una vida útil mayor. Las membranas de intercambio de iones son membranas selectivas formadas por copolímeros reticulados de monómeros de vinilo y que contienen grupos de intercambio aniónico de amonio cuaternario o grupo de intercambio catiónico de ácido sulfónico. Esto, en la práctica, significa que la etapa de EDR en la ETAP Llobregat está trabajando con diferentes configuraciones entre módulos y pilas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los principales resultados obtenidos tras el análisis completo de los datos del período de muestreo indican una elevada reducción en la concentración de sales. La EDR reduce el contenido de parámetros significativos del agua filtrada por filtros de carbón. Los datos analíticos muestran la reducción media de los parámetros principales durante el período de junio de 2011 a julio de 2016 (n = 206). Los resultados expresados como media ± std fueron los siguientes: conductividad, 70±8%; Ca⁺², 85±5%; Mg⁺², 82±7%; Sr⁺², 83±7%; K⁺¹, 75±9%; Na⁺¹, 58±10%; Br⁻¹, 77±7%; Cl⁻¹, 78±8%; F⁻¹, 40±10%; ClO₃⁻¹, 73±9%; ClO₂⁻¹, 57±12%; NO₃⁻¹, 77±6%; y SO₄⁻², 73±8%. Además, la EDR también elimina TOC 30±10% a pesar de que no es el objetivo de la tecnología. La **Figura 3** representa los datos más detallados de cada parámetro.

De manera teórica, sin considerar el efecto específico de la temperatura ni de la conductividad de trabajo, la reducción es de aproximadamente del 50% por etapa. Teniendo en cuenta que el proceso de EDR tiene 2 etapas, la eliminación esperada

FIGURA 3. Box plot que representa el porcentaje de eliminación de distintos parámetros durante el periodo de junio de 2011 a julio de 2016. Los resultados se han obtenido de 206 muestras. (El box plot muestra el valor mínimo, el cuartil 25, la mediana, el cuartil 75 y el valor máximo).



sería del 75%. En realidad la conductividad y la temperatura son factores muy importantes. La temperatura favorece la movilidad de los iones y con ello la atracción hacia los electrodos que facilita su eliminación, por lo que en invierno esta reducción es claramente inferior al verano. El valor medio de reducción de sales, medida como conductividad ha sido durante el período de $(71 \pm 8\%)$.

El porcentaje de eliminación de los iones divalentes es superior al de los monovalentes. Este hecho es razonable porque los iones divalentes tienen una carga eléctrica mayor. Como resultado, los iones divalentes tienen más movimiento en la corriente de desalinización y se eliminan más fácilmente del agua filtrada por carbón: Ca^{+2} ($85 \pm 5\%$), Mg^{+2} ($82 \pm 7\%$) y Sr^{+2} ($83 \pm 7\%$) e incluso su eliminación promedio es mayor que la eliminación teórica esperada.

El comportamiento de los iones monovalentes positivos y negativos

es similar entre ellos. Sin embargo, Na^{+1} ($58 \pm 10\%$) y F^{-1} ($40 \pm 10\%$), se eliminan en menor grado en comparación con los otros iones monovalentes: K^{+1} ($75 \pm 9\%$), Br^{-1} ($77 \pm 7\%$) y Cl^{-1} ($78 \pm 8\%$). La explicación radica en sus radios hidratados, dado que la permeabilidad de los iones a través de las membranas muestran una fuerte correlación con su tamaño cuando se hidratan. Los iones con radios iónicos relativamente pequeños tienen radios hidratados mayores [7] debido a que la atracción de las moléculas de agua alrededor de un ion depende de su densidad de carga. Ello significa que están más rodeados de moléculas de agua y que presentan menos capacidad de ser atraídos por los electrodos y por lo tanto menos eliminados por la EDR. En iones monovalentes positivos, Na^{+1} ($3,58 \text{ \AA}$) presenta un radio hidratado mayor que K^{+1} ($3,31 \text{ \AA}$) y por tanto se elimina menos. En cuanto a los iones monovalentes negativos, el radio hidratado de F^{-1} ($3,52 \text{ \AA}$) es también mayor

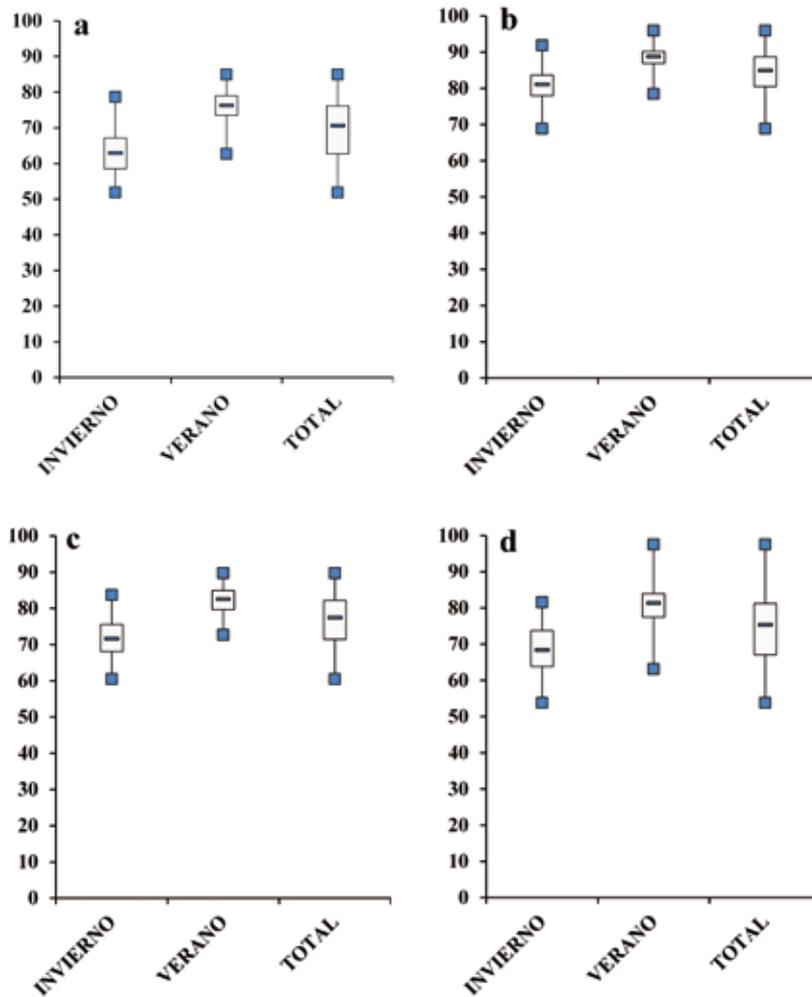
que el Br^{-1} ($3,30 \text{ \AA}$) y Cl^{-1} ($3,32 \text{ \AA}$) y también presenta un valor de reducción menor [8].

La eliminación de Br^{-1} ($77 \pm 7\%$) es importante porque, a diferencia de la mayor parte de las aguas de río, el río Llobregat tiene un alto contenido de bromuro debido a la geología de su cuenca. Dado que el Br^{-1} actúa como precursor de la formación de THM, su elevada eliminación permite fijar un valor objetivo realista de THM inferior a $40 \mu\text{g/L}$ para el agua producida por la ETAP una vez mezclada el agua procedente de la EDR con el agua del proceso convencional. Este valor permite obtener un valor de THM inferior al límite legislado en los puntos de entrega en la red de distribución, teniendo en cuenta los correspondientes tiempos de residencia.

El proceso de desalinización también comporta la reducción de otros parámetros que permiten mejorar la calidad del agua. Uno de ellos es el cloruro, que se encuentra legislado en aguas de consumo y que en este



FIGURA 4. Box plots que representan el porcentaje de eliminación de diferentes parámetros dividiendo los 206 muestreos en dos grupos: invierno (de noviembre a abril) y verano (de mayo a octubre) durante el periodo que va de junio de 2011 a julio de 2016. a) Conductividad; b) Ca^{+2} ; c) Br^{-1} ; y d) K^{+1} .



caso es un elemento principal de la composición del agua del río Llobregat. También es el caso de ClO_3^{-1} y ClO_2^{-1} que son subproductos de desinfección (DBP), que se generan después de la oxidación con ClO_2 , una alternativa a la oxidación con cloro. La oxidación química y la desinfección se realizan con ClO_2 por distintas razones: es un biocida eficaz en un amplio rango de pH; es más eficaz que el cloro y que la cloramina; no genera subproductos halogenados ni THM; mejora el sabor y olor y precipita compuestos de hierro y de manganeso [9,10]. El

proceso de EDR muestra altas eliminaciones para ambos, especialmente para ClO_3^{-1} ($73\pm 9\%$).

El NO_3^{-1} está presente en el río Llobregat debido principalmente al uso de fertilizantes en la zona agrícola. La eliminación de NO_3^{-1} ($77\pm 6\%$) del agua filtrada por carbón tiene los mismos porcentajes de eliminación que los iones divalentes. Así mismo, los muestreos indican un conjunto de datos robustos con una desviación mínima.

Los SO_4^{-2} son otra sal contaminante en el agua cruda de la ETAP del Llobregat. Los residuos de la mine-

ría y el uso de fertilizantes son las principales fuentes de sulfatos. La reducción de los sulfatos ($73\pm 8\%$) es similar a la de los nitratos.

La eliminación de carbono orgánico total (TOC) es uno de los objetivos del tratamiento convencional, dado que incluye distintos compuestos de materia orgánica que son parte necesaria para la formación de los THM. Aunque la etapa de EDR no está diseñada para reducir el TOC se observa un efecto colateral (positivo para el tratamiento), de eliminación con altas temperaturas del agua cruda, que puede llegar a eliminar una media de $30\pm 10\%$.

La temperatura del agua es un parámetro esencial en el proceso de EDR. Se ha observado una variación en la eficiencia con temperaturas bajas o altas del agua bruta. El análisis se ha realizado clasificando las muestras en dos grupos: invierno (noviembre a abril) y verano (mayo a octubre). La clasificación permite estudiar la eficiencia de la tecnología operando en condiciones distintas. Se tienen 105 muestras de invierno con una temperatura media de $9,7\pm 3,7$ °C y 101 muestras de verano con $20,5 \pm 2,9$ °C. Por lo tanto, el rango de temperaturas es muy amplio.

Los resultados muestran una diferencia en la eliminación de todos los parámetros en función de si la temperatura del agua cruda es mayor o menor. Se han seleccionado cuatro parámetros para presentar los resultados: conductividad, Ca^{+2} , Br^{-1} y K^{+1} . Por lo tanto, son representativos de iones divalentes, iones negativos y positivos monovalentes y conductividad. El porcentaje de eliminación de la conductividad (**Figura 4a**) aumenta de un $63\pm 6\%$ a un $76\pm 4\%$ en los meses considerados como verano con una diferencia de

10 °C. La remoción del Ca⁺² (Figura 4b) tiene un menor, pero notable incremento del 81±4% a 89±3%. El Br⁻¹ (Figura 4c) tiene un incremento similar al del Ca⁺², 72±5% a 83±4%. Por último, el K⁺¹ (Figura 4d) la eliminación aumenta de un 68±7% a un 81±4%.

Los principales resultados obtenidos muestran una mayor eficiencia de reducción a temperaturas altas. Este factor ayuda a minimizar las concentraciones de THM, que se incrementan durante el verano, debido a que sus cinéticas de formación son más rápidas con elevadas temperaturas.

El proceso de EDR está operativo desde hace 7 años y los requisitos de calidad del agua son los mismos o más restrictivos. Por esta razón, es importante conocer si la respuesta de la tecnología disminuye con el paso del tiempo. Tomando como ejemplo la eliminación del Br⁻¹ se observa que se mantiene bastante estable durante el periodo estudiado (Figura 5a). La eliminación media en el año 2011 es de 79±6% (n=27); en el año 2012, 78±7% (n=48); en el año 2013, 75±6% (n=45); en el año 2014, 79±7% (n=47); en el año 2015, 78±8% (n=26); y en el año 2016, 77±6% (n=13). La eliminación media máxima aparece puntualmente en 2014 cuando la tecnología había operado más de 12.000 horas.

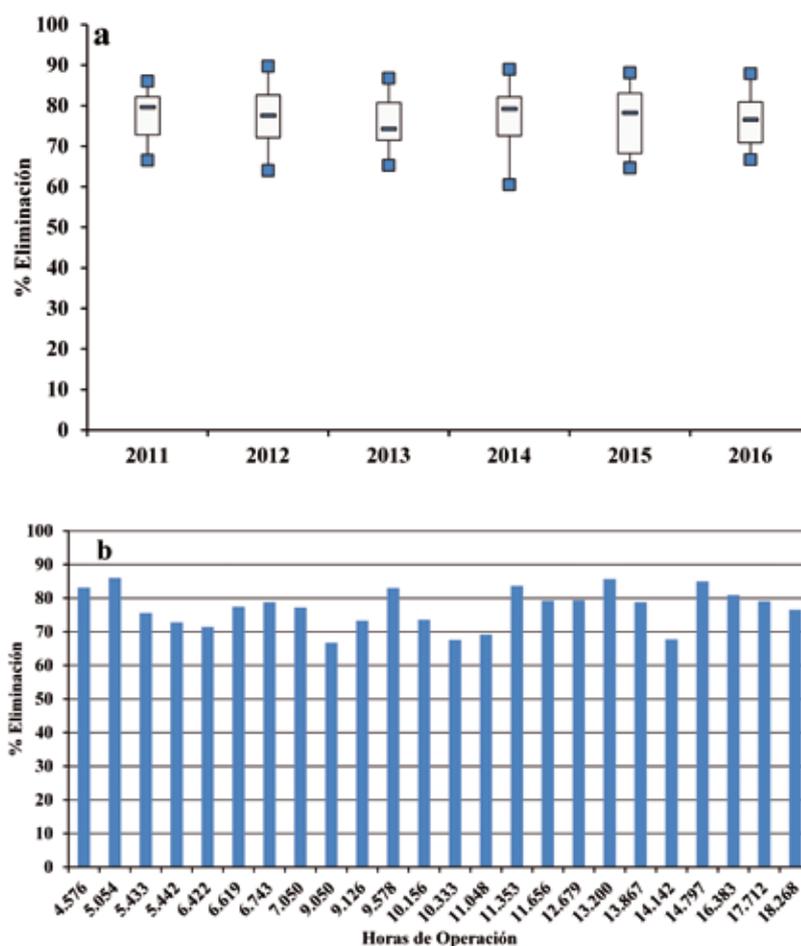
Esta eficiencia se mantiene estable teniendo en cuenta la suma de los 9 módulos como un solo proceso, pero es conveniente comprobar que el comportamiento de un único módulo sea similar y que el resultado anterior no haya estado enmascarado por el comportamiento global de la planta (Figura 5b). Así, se toman los 25 muestreos realizados en el módulo 2 durante el periodo estu-

do. El primer muestreo fue en Junio de 2011 con cerca de 7.000 horas de funcionamiento y el último fue en mayo de 2016 y más de 18.000 horas. La gráfica indica un comportamiento estable en el corte del ion bromuro durante esas 10.000 horas de funcionamiento a pesar del envejecimiento asociado a las diferentes unidades implicadas. Durante este período estudiado, el módulo ha sido sometido a las tareas de mantenimiento habituales tanto de carácter preventivo como de correctivo, incluyendo reparación de *hot spots* y limpieza y cambio de membranas, sin que aparentemente haya perdido capacidad de desalinización.

4. CONCLUSIONES

La baja calidad del agua cruda en la ETAP Llobregat hizo necesaria la incorporación de una nueva etapa de tratamiento por membranas que comportó la inclusión de una etapa de desalinización por electrodiálisis reversible (EDR) en 2009. Uno de los objetivos era minimizar la formación de THM en el agua producto, reduciendo el nivel de sales, especialmente del ion Br⁻¹. La EDR ha permitido mejorar durante los últimos siete años de operación la calidad del agua potable de la red de abastecimiento de ATLL que distribuye a más de 4,5 millones de habitantes de Barcelona y sus alrededores.

FIGURA 5. Evolución de la eficiencia del proceso de EDR durante el periodo de junio de 2011 hasta julio de 2016. a) Box plot que representa la evolución de la eliminación del Br⁻¹ año a año. b) Gráfico de barras del porcentaje de eliminación de Br⁻¹ en los 25 muestreos del módulo 2 y más de 10.000 horas de operación.





» La tecnología de EDR ha sido una buena solución para controlar la formación de THM en la ETAP Llobregat y mejorar significativamente la calidad del agua de abastecimiento al área metropolitana de Barcelona. Los resultados muestran una elevada reducción de las principales sales presentes en el río Llobregat, sobre todo del Br^{-1} como precursor de la formación de THM, así como una mejora del sabor del agua, lo que aumenta la satisfacción de los consumidores de Barcelona ciudad y su área metropolitana, que son más de 4,5 millones de habitantes

El estudio recoge 206 muestreos realizados entre junio de 2011 y julio de 2016. Los resultados muestran una elevada reducción de las principales sales presentes en el río Llobregat. En concreto, se ha demostrado elevada y estable la eliminación del Br^{-1} como precursor de la formación de THM, con un valor cercano al 80%. Además, la reducción general de sales mejora el sabor del agua y aumenta la satisfacción del consumidor [11].

Así mismo, la materia orgánica, que es base para la formación de los THM, se reduce en un 30%, medida como TOC, como efecto colateral de la tecnología. Este hecho es muy importante con altas temperaturas y concentraciones elevadas de TOC en el agua cruda.

Se ha corroborado que las altas temperaturas permiten un 10% de reducción de sales mayor que a temperaturas bajas. Esta característica es positiva en la ETAP Llobregat, debido a que la formación de THM aumenta con temperatura alta y, por tanto, es en la época en la que la EDR tiene más rendimiento.

La tecnología mantiene la eficacia a pesar del paso de los años y el envejecimiento de las instalaciones. El mantenimiento preventivo y correctivo permite al proceso de EDR que no haya una disminución en la eficiencia remarcable. Los

procedimientos de O&M se han ligado con las necesidades diarias de acuerdo a la calidad del agua y la producción del volumen necesario para suministrar al sistema. Además, se han ido incorporando los avances tecnológicos, con cambios en las características de membranas y electrodos, sin influencia negativa aparente en el comportamiento de la tecnología, incluyendo el hecho de que en la mayoría de los módulos se está operando con electrodos metálicos cuya vida estimada era de 13.000 h y actualmente se encuentran superando las 17.000 h, pendientes de su sustitución paulatina por los nuevos electrodos de carbón.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que en conjunto tras 7 años de operación, teniendo en cuenta la calidad y la inestabilidad de agua cruda, la tecnología de EDR se ha mostrado como una tecnología robusta, capaz de asumir los cambios operativos y de la calidad del agua, con un rendimiento hidráulico superior al 91% y con un consumo energético para el proceso de $0,58 \text{ kWh/m}^3$. Ha sido por tanto, una buena solución para controlar la formación de THM en la ETAP Llobregat y mejorar significativamente la calidad del agua de abastecimiento al área metropolitana de Barcelona.

Bibliografía

- [1] Valero, F.; Arbós, R. (2009). Desalination of brackish river water using electro dialysis reversal (EDR). Control of the THMs formation in the Barcelona (NE Spain) area. *Desalination*, núm. 253, págs. 170-174.
- [2] Plewa, M.J.; Wagner, E.D.; Mueller, E.D.; Hsu, K.M.; Richardson, S.D. (2008). Occurrence, formation, health effects and control of disinfection by-products in drinking water. Chapter 3. Mammalian cell toxicity of N-DBPs and C-DBPs. American Chemical Society, Washington, DC, págs. 36-50.
- [3] Sabater, S.; Ginebreda, A.; Barceló, D. (2012). *The Llobregat, the story of a polluted Mediterranean River*. Springer.
- [4] Valero, F.; Barceló, A.; Medina, E.; Arbós, R. (2013). Barcelona, three-years of experience in brackish water desalination using EDR to improve quality. New O&M procedures to reduce low-value work and increase productivity. *Desalination and Water Treatment*, vol. 51, págs. 4-6.
- [5] Hays, J. (2000). Iowa's first electro dialysis reversal water treatment plant. *Desalination*, núm. 132, págs. 161-165.
- [6] Valero, F.; Barceló, A.; Arbós, R. (2010). *Desalination, trends and technologies*, Chapter 1, 3-20, InTech.
- [7] Tansel, B.; Sager, J.; Rector, T.; Garland, J.; Strayer, R.; Levine, L.; Roberts, M.; Hummerick, M.; Bauer, J. (2006). Significance of hydrated radius and hydration shells on ionic permeability during nanofiltration in dead end and cross flow modes. *Separation and Purification Technology*, núm. 51, págs. 40-47.
- [8] Volkov, A.; Paula, S.; Deamer, D.W. (1997). Two mechanisms of permeation of small neutral molecules and hydrated ions across phospholipid bilayers. *Bioelectrochem. Bioenergetics*, núm. 42, págs. 153-160.
- [9] Korn, C.; Andrews, R.; Escobar, M. (2001). Development of chlorine dioxide-related by-products models for drinking water treatment. *Water Research*, núm. 36, págs. 330-342.
- [10] Schmidt, W. (2004). Using chlorine dioxide for drinking water disinfection by the application of the chlorine/chlorite process. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, núm. 32, págs. 48-60.
- [11] García, A.; Fernández, M.E.; Medina, O.; Ferrer, J.; Cortina, L.; Valero, F.; Devesa, R. (2015). Flavour assessment of blends between desalinated and conventionally treated sources. *Desalination & Water Treatment*, núm. 53, págs. 3.466-3.474. 