

DESALINIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS POR ÓSMOSIS INVERSA CON PRETRATAMIENTO CONVENCIONAL

Domingo Zarzo, Rafael Buendía y Carlos García

SOCIEDAD ANÓNIMA DEPURACIÓN Y TRATAMIENTOS (SADYT)

C/ Platería, nº 6, 30004 MURCIA

Tel: +34968354028 / Fax: +34968213716

dzarzo@sadyt.com / rbuendia@sadyt.com / csoto@sadyt.com

RESUMEN

El presente artículo pretende describir el diseño y funcionamiento de una planta desalinizadora por ósmosis inversa de 2.500 m³/día (pendiente de ampliación hasta 5.000 m³/día) tratando agua residual procedente de una EDAR urbana con el fin de reducir su salinidad para ser utilizada en el riego de un campo de golf en Benidorm, Alicante.

El objeto de la planta era reducir la salinidad elevada del agua procedente de la EDAR de Benidorm (en valores entre 2.000 y 3.000 µS/cm) hasta valores inferiores a 600 µS/cm para su uso en el *green* del campo de golf.

La planta trata agua residual urbana procedente de un tratamiento secundario y se decidió instalar un pretratamiento sencillo, consistente en varias etapas de filtración en serie, descartando en este caso un sistema de micro/ultrafiltración por su elevado coste. Contra todo pronóstico, la planta, a pesar de los problemas iniciales, ha operado, aunque de modo discontinuo, de forma correcta y sin problemas graves.

En la presente ponencia se expondrán los datos de operación de la instalación desde su puesta en marcha y se comentarán los aspectos “históricos” de su funcionamiento, y que tuvo lugar en varias etapas y con algunas innovaciones hasta llegar al modo de operación actual.

A pesar de la discontinuidad de la operación, los datos obtenidos son suficientemente significativos como para ser publicados.

1. INTRODUCCIÓN

En marzo del año 2003, y después de varias negociaciones con los promotores de un complejo turístico ubicado en Benidorm, consistente en varios hoteles, promociones de viviendas y un campo de golf, se firma el contrato para la construcción de una planta de tratamiento terciario para desalinizar agua residual urbana procedente, en origen, de la EDAR de Benidorm.

El agua a desalinizar tenía una salinidad entre 2.000 y 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo el objetivo obtener un agua con destino al riego del campo de golf inferior a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La construcción de la planta fue finalizada en un periodo de 5 meses, incluida la nave de obra civil, y las primeras pruebas y ensayos de puesta en marcha se realizaron en septiembre de 2003, prolongándose hasta final de ese año.

Se construyó una primera fase capaz de producir 2.500 $\text{m}^3/\text{día}$ de agua con conductividad inferior a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dejando preparada la nave para una ampliación posterior hasta la capacidad total prevista de 5.000 $\text{m}^3/\text{día}$; ampliación que previsiblemente se realizará el próximo año.

La planta fue financiada por el constructor y explotada en régimen de BOT a 15 años. Durante los dos años de operación ha funcionado de modo intermitente, de acuerdo a las necesidades de agua demandadas por el campo de golf. Podría decirse que es realmente ahora, en el año 2006, cuando el campo de golf está absolutamente operativo y se demandará de la planta la totalidad de la producción.



El análisis suministrado de partida y que sirvió para el diseño de la instalación, fue el siguiente;

Temperatura: variable entre 15-18 °C

Calcio: 164 ppm

Magnesio: 12 ppm

Sodio: 297 ppm

Cloruros: 582.5 ppm

SAR: 6,02

Sílice: 15,0

D.B.O.₅: 4 mg/l

S.S.: 2,7-8mg/l

pH: 7,34

Conductividad: 3.401 (μs/cm)

Boro: 0,2 ppm

Este análisis fue obtenido como valores estimados conservadores en base a los análisis medios disponibles obtenidos a lo largo del año anterior por la propiedad, aunque era esperable una variabilidad debida a la lógica evolución del tratamiento en la EDAR de origen. El contrato permitía una desviación de hasta el 15% de los parámetros descritos.

2. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

Cuando se planteó el problema del tratamiento del agua residual urbana procedente de secundario por medio de desalinización, se estudiaron varias opciones de tratamiento, incluyendo sistemas de Micro/Ultrafiltración continua.

Se analizaron diversos sistemas de membranas como pretratamiento, que fueron descartados por su elevado coste, que superaba prácticamente el de la propia ósmosis inversa.

La experiencia de SADYT en la utilización de sistemas de filtración en serie como pretratamiento de aguas con elevada carga de sólidos y materia orgánica nos impulsó a la decisión de utilizar este tipo de pretratamiento, y aunque se trataba de una decisión que podría parecer algo arriesgada en principio, la adoptamos basándonos en nuestras experiencias anteriores positivas, entre las que destacan las siguientes;

- Planta desalinizadora de la C.R. de Pulpí, en Almería (11.000 m³/día);
 - o planta tratando agua superficial procedente de una rambla, con alto contenido en sólidos en suspensión y materia orgánica. Pretratamiento: físico-químico con decantación lamelar, filtración sobre sílex, filtración sobre lecho mixto de sílex/ antracita y microfiltración sobre cartuchos, y por supuesto, dosificación de reactivos (inicialmente coagulante y floculante, ácido, hipoclorito sódico, bisulfito sódico y antiincrustante)
- Planta de reutilización de drenajes del campo de Cartagena (San Pedro del Pinatar, 6.000 m³/día)
 - o planta tratando agua superficial procedente de drenajes agrícolas, con alto contenido en sólidos en suspensión y materia orgánica. Pretratamiento: físico-químico con decantación lamelar, filtración sobre sílex, filtración sobre lecho mixto de sílex/ antracita y microfiltración sobre cartuchos, y por supuesto, dosificación de reactivos (inicialmente coagulante y floculante, cal, ácido, hipoclorito sódico, bisulfito sódico y antiincrustante)

- Planta piloto de tratamientos terciarios de agua residual (Proaguas Costablanca)
 - o Planta piloto de 100 m³/día incluyendo tratamiento físico-químico con decantación lamelar, filtración sobre sílex, filtración sobre sílex/antracita, microfiltración sobre cartuchos, distintas Micro y Ultrafiltraciones, nanofiltración y ósmosis inversa. La planta ha sido instalada a lo largo de un periodo de 8 años en las EDAR de Benidorm, Rincón de León (Alicante capital), Denia, Elche, Torreveja, Alcoy, Canals-L'Alcudia de Crespins y Guardamar, durante periodos en cada EDAR entre 6 meses y 1 año, con excelentes resultados, que han dado lugar a varias ponencias técnicas en Congresos y revistas especializadas.

Aunque es muy difícil generalizar una experiencia de muchos años, como conclusiones generales de estas experiencias cabría resaltar las siguientes;

-se observó que los tratamientos físico-químicos no tenían prácticamente rendimiento salvo que se tratara de aguas muy cargadas y con alto contenido en sólidos en suspensión

- para un sistema de reutilización con desalinización no compensaba la instalación de una nanofiltración en lugar de ósmosis inversa, ya que, jugando con una cierta mezcla de agua sin tratar, compensaba económicamente la mayor capacidad de mezcla de la ósmosis inversa que el menor consumo energético de la NF (ya hay muy poca diferencia de consumos entre la NF y las membranas de OI de última generación)

- Los pretratamientos de ultrafiltración parecen ser los más adecuados, en general, para este tipo de aguas, pero no están exentos de dificultades y problemas. Durante estos años se han probado varios sistemas y algunos han sido realmente ineficientes. Creemos, sin embargo, que en el momento actual, hay productos en el mercado con excelente comportamiento, que hacen que la tendencia sea ir hacia este tipo de tecnología.

- El sistema de filtración en varias etapas es un sistema muy eficiente de pretratamiento para ósmosis inversa tratando aguas muy cargadas

Finalmente se decidió implantar la siguiente línea de tratamiento;

Bombeo de agua bruta

Filtración sobre malla de acero inoxidable de 100 micras de paso

Filtración sobre lecho de arena silíceo

Filtración sobre lecho de sílex /antracita

Desinfección mediante radiación UV

Microfiltración sobre cartuchos de 10 micras de paso

Bombeo de alta presión

Desalinización mediante ósmosis inversa con membranas antifouling

Equipo de limpieza de membranas

Y Mezcla de agua producto con agua prefiltrada para obtener la conductividad deseada; automática mediante regulación con lazo de control gobernado por caudal y conductividad.



Se descartó el tratamiento físico-químico por los motivos expresados anteriormente y se añadió un sistema de microfiltración de malla previo de 100 micras de paso, con el fin de que actuara como microtamizado.

La planta de ósmosis se diseñó de capacidad 2.100 m³/día por tren, mezclando con 400 m³/día de agua pretratada, para obtener la calidad esperada (< 600 μS/cm)

Aunque químicamente y teóricamente, con los análisis de partida, se podía alcanzar valores de conversión superiores al 75%, se decidió diseñar la instalación para una conversión de diseño del 70%, con el fin de contar con un cierto sobredimensionamiento del pretratamiento. Análisis posteriores en

operación obligaron a trabajar a conversiones algo inferiores debido fundamentalmente a los fosfatos presentes en el agua.

La configuración de membranas fue de 19:8, con 7 membranas de 8" por tubo, y la membrana elegida fue la Trisep X-20 (8040-X201-TSA), membrana antifouling.

Cabe destacar que en el tren de membranas se instalaron 2 tubos de sacrificio: 2 tubos de presión de 4" con una membrana del mismo tamaño instrumentados con medida de caudal y presión, para detectar los posibles problemas de ensuciamiento, antes de que estos se produzcan en las membranas principales; uno de ellos fue instalado en derivación en cabeza del tren (es decir en la salida de la impulsión de la bomba de alta, para recibir directamente el agua bruta) y otro en derivación a la salida del rechazo de la planta. De este modo podemos detectar rápidamente el ensuciamiento debido a materia orgánica y sólidos (por la membrana colocada en cabeza de tratamiento) o por posibles precipitaciones químicas en el rechazo (por la membrana colocada en rechazo).

3. PUESTA EN MARCHA. PROBLEMÁTICA PLANTEADA

Durante el periodo de puesta en marcha se detectó un notable empeoramiento de la calidad del agua suministrada respecto a los valores utilizados para el diseño de la instalación que estaban basados en análisis realizados aproximadamente un año antes.

Durante aproximadamente 2 meses, fue necesario realizar una serie de ensayos, análisis y pruebas de dosificación química con objeto de conseguir un agua susceptible de ser tratada adecuadamente en la planta de tratamiento terciario.

Los análisis realizados en el agua bruta que alimenta la planta de tratamiento suministraron los siguientes valores durante la fase de puesta en marcha (valores significativos del análisis):

Turbidez: 10-25 NTU

SS: 18-50 mg/l

PH: 8,5-9,5

DBO5: 16-60 mg/l

DQO: 30-120 mg/l

Nitratos: 7-8 mg/l

Nitritos: 1-2 mg/l

Fosfatos; 2,5 ppm



Cabe destacar que la calidad del agua era muy variable y que hubo días con un agua de peor calidad de la que reflejan estos análisis (lo cual se demostró por los valores muy elevados de turbidez detectados con el analizador de la planta).

El agua contenía una elevada concentración de sólidos suspendidos y turbidez (ésta última aparentemente está producida por algas, que además dan un color verde característico al agua).

El agua bruta no es agua que procede directamente de la EDAR de Benidorm, sino que pasa a través de diversos bombeos, depósitos de almacenamiento y balsas descubiertas, lo cual genera un crecimiento tremendo de algas y otros organismos vivos, incrementando los valores de materia orgánica, microorganismos y sólidos suspendidos.

La concentración de fosfatos obligó a trabajar a conversiones inferiores al 70%, prefiriéndose por parte del explotador y de la propiedad reducir algo la conversión frente a incrementar excesivamente la concentración de ácido.

4. ENSAYOS REALIZADOS. INNOVACIONES PLANTEADAS.

A raíz de los resultados obtenidos se fueron realizando ensayos diversos durante los meses siguientes que consistieron en;

1) Se realizó una serie de ensayos de coagulación-floculación (Jar Test) utilizando coagulantes convencionales (cloruro férrico, sulfato férrico, etc.) y un gran número de polielectrolitos como floculantes. Los resultados obtenidos demostraron un rendimiento de eliminación de SS y MO muy reducido, y un SDI inmedible, por lo que se decidió continuar con los ensayos y desechar en principio este tipo de tratamiento.

2) Posteriormente se ensayó la dosificación de permanganato potásico, por sus características oxidantes, en dosis de 2-4 ppm, combinado con una elevación del pH hasta valores de 10,5 a 11 con cal o sosa y 0,2 ppm de polielectrolito, lo cual producía una reducción muy importante de sólidos y materia orgánica con un agua con valores de turbidez próximos a 1 y SDI de aproximadamente 4,5. Sin embargo, las dosificaciones óptimas implicaban una dosis de reactivo básico de 200-300 ppm con un posterior consumo muy importante de ácido (hasta 400 ppm de HCl) para reequilibrar el pH, lo cual hacía inviable económicamente la explotación.



Además del elevado coste de explotación de estas dosificaciones técnicamente también era inviable la operación de la instalación, ya que los filtros de arena se saturaban tras pocos minutos de funcionamiento, debiendo realizar lavados de los mismos a unos intervalos muy reducidos.

3) Por estos motivos, se decidió eliminar la dosis de permanganato potásico y la de reactivos alcalinizantes, manteniendo únicamente la dosificación de ácido (y por supuesto, antiincrustante). Puntualmente se realizarían también choques de hipoclorito sódico (y por supuesto eliminación del cloro residual con bisulfito sódico).

Evidentemente éramos conscientes de que esto produciría unos mayores costes de explotación debidos a limpiezas químicas y reposición de membranas, así como de sustitución de cartuchos filtrantes.

Finalmente se decide operar sin reactivos de tratamiento físico-químico, con otra peculiaridad adicional;

Se sustituyó la primera membrana de cada tubo por membranas de segunda mano, con el fin de que actuaran como “fusible” o como “filtración” previa, y proteger del ensuciamiento a las membranas nuevas.

La sustitución de esta membrana en cada tubo no alteró significativamente ni la presión de trabajo ni la conductividad del agua producida.

En paralelo a estos ensayos de reactivos químicos, se analizaron otros aspectos como fueron los siguientes;

- 1) análisis de la capacidad de eliminación de microorganismos por parte del tratamiento UV.



- 2) Se ensayó en la balsa de agua bruta el uso de un sistema de ultrasonidos para la eliminación de algas y otros organismos en el agua bruta



Los resultados de ambas experiencias fueron positivos y mejoraron el funcionamiento del pretratamiento. Por supuesto, el SDI continuaba siendo muy elevado.

Con este modo de operación se ha conseguido un funcionamiento de la instalación relativamente correcto, que si bien no opera en continuo, por las necesidades de producción del campo de golf, no ha presentado grandes problemas de operación y ni siquiera ha requerido de limpiezas químicas (hasta el momento) en las membranas ni por supuesto reposición de las mismas.

5. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA.

Debido a los diversos ensayos realizados, y el retraso en la finalización del campo de golf, la planta de tratamiento está operando efectivamente, aunque de modo discontinuo desde agosto del año 2004.

A continuación se muestra uno de los periodos de operación, como representativo del funcionamiento de la instalación.

La planta ha funcionado durante este periodo con una productividad aproximadamente del 30%, como media, es decir de unos 100 días por año, siendo mayor en los meses de verano e inferior en los de invierno.

La limpieza de los filtros de sílex y de sílex/antracita se realiza diariamente y los cartuchos de microfiltración se han sustituido cada dos meses; respecto a las membranas de momento no ha sido necesaria ninguna limpieza química ni se ha sustituido ningún elemento, aunque a fecha de hoy ya se ha planteado la posibilidad de una primera limpieza de membranas, al reducirse el caudal de producto en un 12%, respecto al diseño.

Se ha analizado los datos obtenidos entre el 5 de agosto de 2004 y el 7 de junio de 2006. Los datos son algo dispersos e incompletos, por lo que es difícil mostrar tendencias, pero muestran los siguientes resultados;

pH de entrada a membranas: 8 (promedio), 9,3 (máximo), 6 (mínimo)

Temperatura del agua (°C): 23 (promedio), 30 (máximo), 10 (mínimo)

Conversión; Valor medio de 70%, máximo del 75%

Presión de aporte; promedio; 9 bar, máximo 10 bar

Máxima pérdida de carga en membranas (total 2 etapas): 2 bar

Conductividad agua aporte ($\mu\text{S}/\text{cm}$): 2.614 (promedio), 3.110 (máximo), 1.863 (mínimo)

Conductividad agua salida membranas ($\mu\text{S}/\text{cm}$): 83 (promedio), 160 (máximo), 35 (mínimo)

Manteniéndose prácticamente constante la pérdida de carga en membranas y la calidad del agua producto, el caudal ha caído aproximadamente en un 12% en estos dos años. Se va a realizar una limpieza reciente química en breve, y una inspección de las membranas, para evaluar su estado actual.

Por estrategia de explotación se ha mantenido prácticamente constante la presión de trabajo, entre 8 y 10 bar y se ha modificado el caudal de producto.

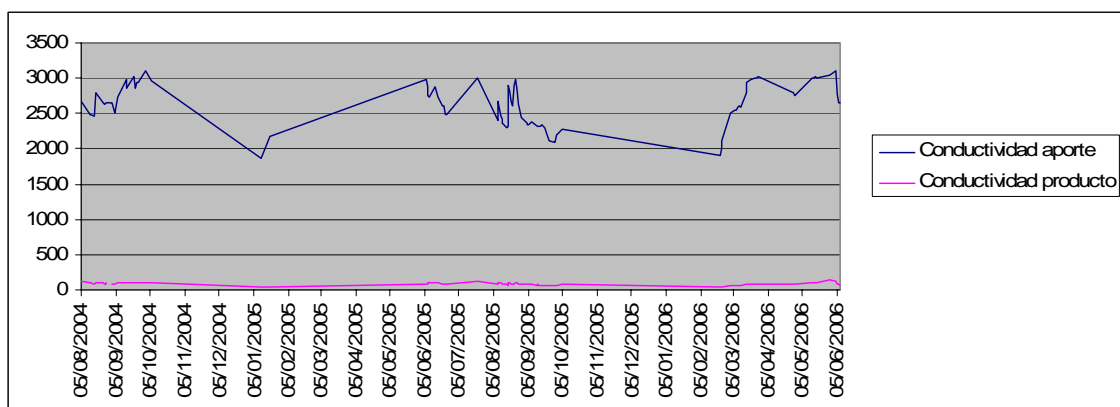


Gráfico 1. Evolución de la conductividad de aporte y de producto en función del tiempo (Datos en $\mu\text{S}/\text{cm}$)

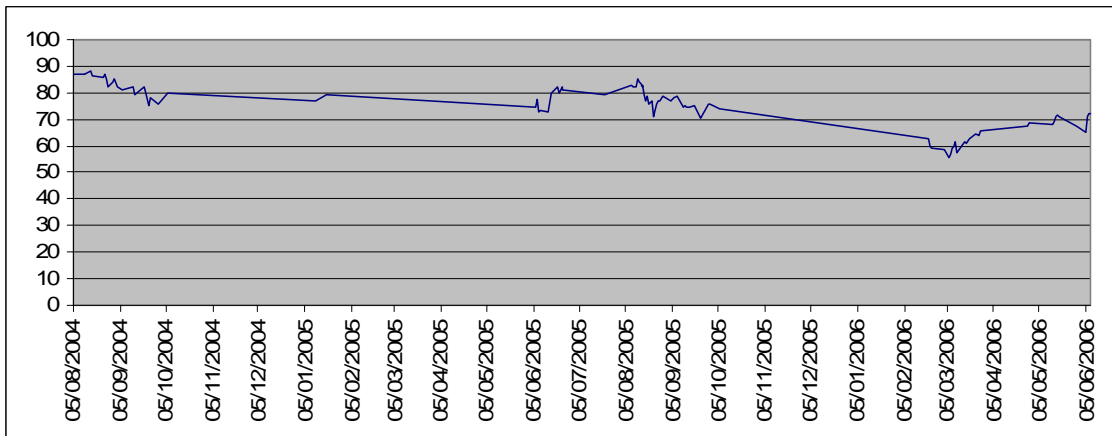


Gráfico 2. Evolución del caudal de agua producida en función del tiempo (Datos en m³/h)

En el gráfico anterior, puede verse la lógica evolución de reducción del caudal de producto debido al ensuciamiento; sin embargo, esta reducción no es tan importante como la que aparece reflejada, debido a que en las últimas etapas de operación se ha incrementado la mezcla de agua sin tratar, por su mejor calidad, reduciendo el caudal de producto de ósmosis como estrategia de operación, no por menor producción debida a ensuciamiento. En estas condiciones, la reducción real de caudal en este periodo ha sido de aproximadamente el 12%, manteniéndose constante la pérdida de carga y la conductividad de producto.

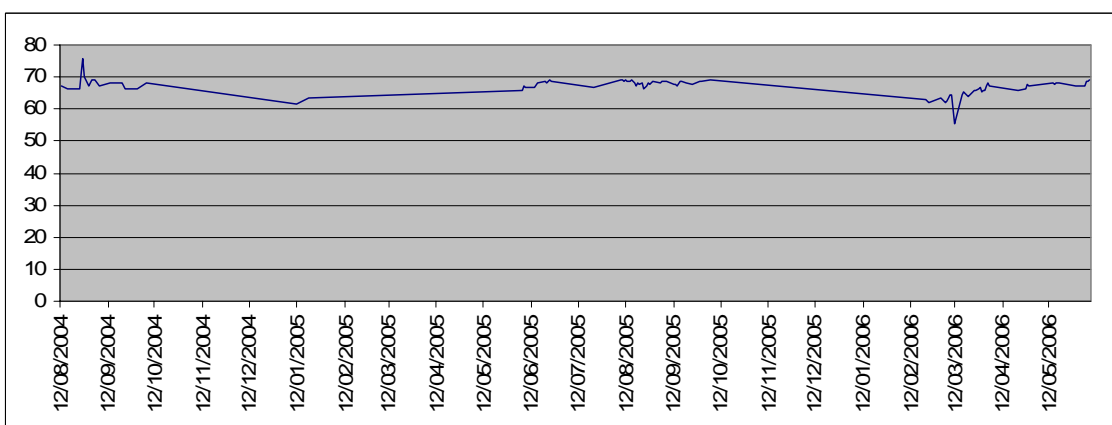


Gráfico 3. Evolución de la conversión de trabajo en función del tiempo (en %)

6. COSTES DE INVERSIÓN Y OPERACIÓN.

La inversión de las instalaciones, incluida planta de ósmosis de 2.500 m³/día y nave para albergar las instalaciones, ascendió a 1,2 millones de euros.

Respecto al coste de operación, a continuación se resume por capítulos:

Costes Fijos

Personal: 41.384 €/año (1 operador supervisado por un jefe de planta a dedicación parcial)

Mantenimiento: 8.805 €/año

TOTAL: 41.384

Costes Variables

Coste de reactivos: 0,116 €/m³ (ácido clorhídrico, antiincrustante y choques de cloro y bisulfito sódico)

Costes de energía: 0,058 €/m³ (0,85 Kw-h/m³ de consumo específico de media)

Costes de reposición de membranas: 0,045 €/m³ (estimación anual; aún no se ha repuesto membranas)

Costes de consumibles: 0,0097 €/m³ (reposición de cartuchos filtrantes y lámparas ultravioleta)

Coste de mantenimiento variable: 0,006 €/m³

TOTAL: 0,2361 €/m³

TOTAL COSTE DE PRODUCCIÓN DE AGUA: 0,2911 €/m³

Para la obtención de este coste ya se ha considerado la mezcla con agua bruta.

Este es el coste para una producción del 100%. Lógicamente, al funcionar la planta de modo discontinuo, y tener una productividad menor, los costes se elevan a 0,3279 €/m³ al 75%, 0,4017 €/m³ al 50% y 0,6228 €/m³ al 25%. En todos los casos se ha considerado una conversión media del 70%.

Se trata de costes puros de producción de agua, sin incluir tasas ni beneficios ni el coste de amortización de las instalaciones.

7. CONCLUSIONES

- La reutilización de aguas residuales es una necesidad actual en las zonas con escasez de agua, y una obligación legal en varias comunidades autónomas para el riego de campos de golf. En muchos casos, y en general en zonas costeras, la elevada salinidad del agua residual implica la necesidad de instalar sistemas de desalinización para poder reutilizar el agua residual.

- Es posible desalinizar agua residual mediante ósmosis inversa con pretratamientos de filtración en varias etapas en serie a un coste razonable y sin graves problemas de operación.

- Las estrategias de operación rigurosas y en algunos casos incluso imaginativas permiten convivir con aguas de mala calidad en plantas de ósmosis inversa con pretratamientos sencillos.

- Es posible obtener agua de excelente calidad mediante desalinización agua residual a un coste inferior a 0,3 €/m³.

8. BIBLIOGRAFÍA RELACIONADA

M. Rubio, D. Zarzo, S. Gil y J. Gil. "Aplicación de la Desalinización de Aguas para Agricultura. Experiencias en Alicante y Murcia." *RETEMA Medio Ambiente, Año X, pags.45-50, Mayo-Junio 1.997.*

J.L. Martínez, J.J. García, J.J. Morenilla, I. Bernacer, R. Lloret, J. Pascual, F. Escribano y D. Zarzo. "Tecnologías para la regeneración de aguas residuales; experiencia con planta piloto mediante un proceso MBR y membranas de micro-ultrafiltración y ósmosis inversa en la EDAR de Canals.L'Alcudia de Crespins (Valencia). *Tecnología del Agua, n. 270, p.46-60, Marzo 2006.*

J.L. Martínez, J. García, M. Rubio y D. Zarzo. "Experiencias en Planta Piloto sobre Tratamientos Avanzados de Reutilización de Aguas Residuales Urbanas". Presentada en el I Congreso Nacional de AEDyR (Asociación Española de Desalación y Reutilización). La Desalación y Reutilización como Alternativa Real a la Sequía., 28 y 29 de Noviembre 2.000, Murcia.

M. Rubio, D. Zarzo, R. Sanmartín y C. García "Tratamiento de Aguas Superficiales Procedentes de Drenajes para su uso Agrícola. Aspectos Técnicos y Económicos y Experiencia en Explotación". Presentada en el I Congreso Nacional de AEDyR (Asociación Española de Desalación y Reutilización). La Desalación y Reutilización como Alternativa Real a la Sequía., 28 y 29 de Noviembre 2000, Murcia.

J.J García, J. L, Martínez y D. Zarzo. "Estudio piloto sobre tratamientos avanzados de reutilización de aguas residuales mediante tecnologías de membranas" Presentada en el V Congreso Nacional de AEDyR (Asociación Española de Desalación y Reutilización). Noviembre 2004, Almería

