

# Aplicación práctica de la NF para mejora de la calidad del agua de un pequeño abastecimiento

<sup>1,3</sup> Rafael Marín Galvín, <sup>2,3</sup> José Miguel Rodríguez Mellado

<sup>1</sup> Control de Calidad, Calidad y Medio Ambiente, <sup>2</sup> Dpto. Química Física y Termodinámica Aplicada, <sup>3</sup> Grupo de Inv. de Electroquímica Molecular  
<sup>1</sup> EMACSA, <sup>2,3</sup> Universidad de Córdoba

## 1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la normativa vigente sobre aguas de consumo público en nuestro país (RD 140/2003) un parámetro de significado interés es el del contenido en trihalometanos (THM) en las aguas de las redes públicas de distribución españolas. Tal es así, que se estableció en su momento la limitación de la concentración de THM totales a un valor máximo de 100  $\mu\text{g/L}$  dado el potencial efecto negativo sobre la salud del consumidor de este tipo de compuestos.

Este valor paramétrico se hizo obligatorio en su cumplimiento con fecha a partir del 1 de enero de 2.009, y ha de ser respetado al objeto de que cualquier agua del territorio nacional pueda ser calificada como salubre y limpia, lo que equivale a decir potable.

Sin entrar en consideraciones ya suficientemente conocidas, la generación de trihalometanos está ligada a la presencia en el agua de sustancias precursoras de aquéllos, que son en general compuestos polifenólicos aromáticos procedentes de la degradación de material biológico (especialmente de materias vegetales) en aguas naturales. Las reaccio-

nes químicas llevadas a cabo entre estos precursores y el cloro adicionado a un agua para su tratamiento son las responsables de la formación de THM en las aguas sometidas a cloración.

Los factores más importantes en la generación de THM son:

-Cantidad y tipo de moléculas orgánicas presentes en el agua.

-Halógenos presentes en el agua y potencialmente oxidables por el cloro. A medida que el agua contenga más bromo y yodo, mayor tasa de formación de THM.

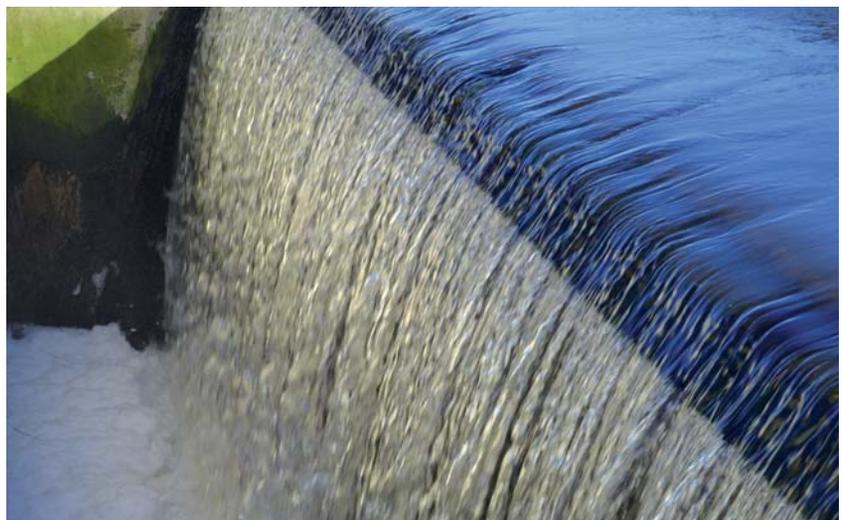
-Dosis de cloro aplicada: más cantidad de cloro implicará una más alta tasa de generación de THM.



-Temperatura del agua: su aumento potencia la formación de THM.

-pH: valores alcalinos favorecen la formación de cloroformo, especialmente.

-Presencia de catalizadores: sobre todo Fe y Mn, muy abundantes





en general en la mayoría de las aguas brutas empleadas para potabilización.

-Tiempo de contacto entre el cloro y el agua: la mayor tasa de formación se da durante las 25 primeras horas de contacto.

A este respecto, la tasa práctica de formación de THM en un agua dada se investiga mediante el conocido ensayo del potencial de formación, que consiste en la cloración del agua bruta dada con determinados niveles de cloro y medida subsiguiente de los compuestos THM formados a lo largo de un determinado tiempo de reacción.

Con esta información ya se está en disposición de valorar la estrategia más eficaz a seguir en un abastecimiento concreto al objeto de minimizar el contenido habitual de THM en el agua de consumo del referido. Dentro de estas estrategias se pueden citar las siguientes:

-Sustitución total o parcial del cloro empleado.

-Empleo de oxidantes alternativos:  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{ClO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , especialmente.

-Empleo de carbón activo (producto en polvo o filtración sobre lecho).

-Empleo de coagulantes más activos que los convencionales en clarificación del agua (policloruros complejos de aluminio y similares).

-Modificación hidráulica y de diseño de decantadores.

-Sustitución de la cloración convencional en desinfección por cloraminas o  $\text{ClO}_2$ .

-Empleo de técnicas de filtración mediante membranas: nanofiltración y ósmosis inversa, especialmente.

En todo caso, será el tipo de agua bruta concreta, el diseño pre-



Vista posterior sistema nanofiltración: izqda. filtro carbón; dcha. membranas nanofiltración; abajo post-filtro.



Vista anterior sistema nanofiltración: abajo post-filtro y bomba; arriba, cuadro de control.

vio de la ETAP o del tratamiento disponible, el de la red de distribución, así como la propia capacidad técnica y económica del abastecimiento, los que definen la estrategia válida para cada caso.

El objetivo de este trabajo es, pues, presentar la eficacia lograda con la implantación de un sistema de nanofiltración en un pequeño abastecimiento de agua, que estaba aquejado de problemas en el cumplimiento de los niveles paramétricos de trihalometanos, cuando el tratamiento se llevaba a cabo mediante técnicas convencionales de coagulación-floculación, filtración y cloración final.

## 2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

El período estudiado abarca desde la puesta en marcha efectiva del sistema de nanofiltración el 1-1-2012 hasta el 31 de octubre, con lo cual se dispone de un total de 10 meses de funcionamiento ininterrumpido, durante los que los muestreos se han llevado a cabo con una frecuencia semanal.

Se han tomado un total de tres muestras en cada muestreo, correspondientes a: agua bruta procedente del embalse de Guadalme llato (Córdoba); una segunda del agua tras coagulación-floculación, filtración y cloración convencional; y la tercera, del agua tras nanofiltración y cloración final, y por consiguiente después de llevar a cabo el tratamiento completo del agua.

Las determinaciones han seguido la rutina habitual en control de calidad de aguas, significándose que color y turbidez se investigaron mediante colorimetría, pH y conductividad mediante electrometría, y cloro libre, hierro, manganeso, nitritos y amonio mediante espectrofotometría visible según los métodos de, respectivamente, DPD,  $\alpha, \alpha'$ -bipiridilo y tioglicolato amónico, formaldoxima en medio básico, método de Zambelli y método de Nessler (sin destilación). Por su parte, la materia orgánica se cuantificó como oxidabilidad al permanganato potásico, y dureza y bicarbonatos se midieron mediante titulación volumétrica.



Tabla 1. Características agua bruta sin tratamiento (Embalse de Guadalmellato-Córdoba)

Parámetros	Unidades	Máximo	Mínimo	Media
Color	mg/L Pt-Co	19	6	10
Turbidez	UNF	7,7	1,7	4,2
pH	unidades pH	7,75	7,35	7,50
Conductividad	μS/cm	284	251	267
Dureza	mg/L CaCO <sub>3</sub>	125	50	104
Bicarbonatos	mg/L HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	141	116	126
Manganeso	μg/L	995	52	293
Hierro	μg/L	213	18	85
Nitratos	mg/L	0,084	0,006	<0,005
Amoniaco	mg/L	0,383	<0,020	0,110
Oxidabilidad al permanganato	mg/L O <sub>2</sub>	4,8	2,8	3,5
Coliformes totales	colonias/100 mL	5.000	4	674
<i>Escherichia coli</i>	colonias/100 mL	600	0	70

La determinación de aluminio aplicó la técnica de la ICP (acoplamiento inducido de plasma) sin digestión previa de la muestra, y la medida de trihalometanos (THM) usó cromatografía de gases mediante la rutina de la micro-extracción en fase sólida automática y posterior detección por captura electrónica. Los datos de THM corresponden a la suma de cloroformo, bromoformo, bromodiclorometano y dibromo-cloroformo.

Finalmente, la determinación de coliformes totales y *Escherichia coli* siguieron la técnica de la filtración a través de una membrana de 0,45 micras de tamaño de poro e incu-

bación con medio de cultivo cromogénico durante 48 horas a una temperatura de 37°C para desarrollo las potenciales colonias de microorganismos presentes.

### 3. RESULTADOS

La captación de agua para el pequeño abastecimiento (<10 m<sup>3</sup> de consumo medio diario) procede del embalse de Guadalmellato (situado a unos 25 km de Córdoba). La Tabla 1 presenta las características de calidad del agua durante el estudio. Se observa que se trata de un agua con aceptable calidad organoléptica, conductividad y contenido salino moderados

y dureza media. Su principal problema es el contenido microbiológico, que en ocasiones alcanza tasas muy importantes, especialmente, en época de lluvias y consiguientes escorrentías de aguas hacia el embalse.

También se aprecia que las concentraciones de manganeso y amonio, especialmente, pueden llegar a ser elevadas, mientras que la concentración de materia orgánica es moderada. En este sentido, sin llegar a ser niveles elevados en términos absolutos, sí es cierto que la procedencia del agua desde un embalse con una elevada tasa de presencia algal (grado de eutrofia medio) en muchos meses del año propiciaba la generación de THM en el agua tras su cloración en muchas ocasiones, sobre todo primavera y otoño.

En este sentido, la Figura 1 presenta los ensayos llevados a cabo para testar la capacidad de generación de THM en el agua bruta del embalse sometida a cloración, frente a dos variables: dosis de cloro aplicada, y tiempo de contacto a una dosis dada.

Así, en la Figura 1 (a) se aprecia que la dosificación de cantidades del entorno de 5 mg/L de cloro (suma de preoxidación+desinfección, cantidad por otro lado relati-

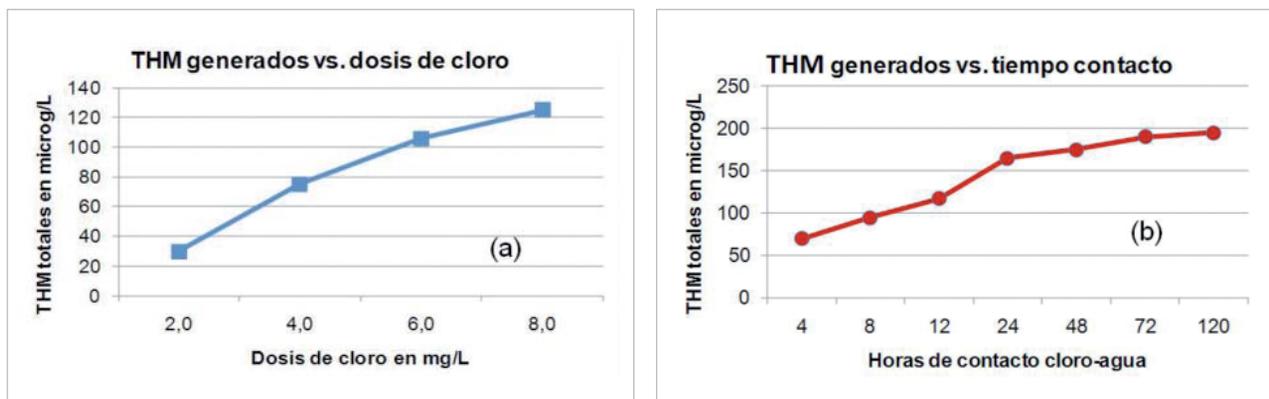


Figura 1. Ensayos prácticos de potencial de formación de THM del agua bruta: (a) frente a la dosis de cloro (2 horas de contacto); (b) frente al tiempo aplicando dosis de 3 mg/L.



vamente frecuente en el tratamiento habitual del agua) ya generaban cantidades de THM muy próximas a los 100  $\mu\text{g/L}$  sólo tras dos horas de contacto, mientras que tiempos de contacto de 8 horas para dosis de 3 mg/L provocaban idéntico efecto (Figura 1 (b)). Además, tiempos de contacto de 24 horas ya tenían asociados niveles de THM superiores a los 150  $\mu\text{g/L}$ .

Dicho esto, el tratamiento de potabilización habitual del agua del embalse consistía en:

- Pre-oxidación con permanganato potásico (producto sólido disuelto previamente en agua),
- Pre-cloración (disolución de  $\text{NaClO}$ ),
- Filtración en filtros cerrados de arena con coagulación sobre filtro mediante policloruro de aluminio comercial, y finalmente,
- Desinfección final antes de la distribución del agua, nuevamente con hipoclorito sódico en disolución comercial.

Para todos los reactivos se ajustaban sus dosis en función de los resultados operativos prácticos logrados en cada momento y que variaban de acuerdo a la calidad del agua bruta disponible.

En cualquier caso, el tratamiento aplicado lograba agua tratada de razonable calidad pero que ocasionalmente podía presentar problemas de contenidos de manganeso, hierro, amonio, ligera contaminación microbiológica no específicamente patógena (coliformes totales) y especialmente, contenidos en THM totales, superiores a los limitados. Durante estos episodios había de recurrirse a la distribución alternativa de agua

potable (*salubre y limpia*, según lo establecido en el RD 140/2003) para el abastecimiento.

Como ejemplo de lo dicho, la Tabla 2 presenta las características del agua sometida al tratamiento convencional durante los 10 meses de nuestro estudio. La columna de valores máximos recoge problemas de manganeso, y sobre todo, altos contenidos en THM, incluso en valores medios, detectándose también puntas de coliformes totales. Asimismo se pueden observar contenidos puntuales en cloro residual libre superiores a los deseables.

Planteadas la situación anterior, que suponía un potencial problema de incumplimientos paramétricos del RD 140/2003 en el pequeño abastecimiento, EMACSA evaluó diversas opciones al objeto de contar con un tratamiento completo que garantizase, salvo eventualidades, una calidad siempre adecuada a la norma.

En este sentido, la Figura 2 pre-

**Tabla 2. Características del agua tratada tras el sistema primitivo de filtración y valores paramétricos establecidos en las normativas vigentes.**

Parámetros	Unidades	RD 140/2003	Máximo	Mínimo	Media
Color	mg/L Pt-Co	15	3,4	<0,2	0,7
Turbidez	UNF	5	0,76	0,02	0,23
pH	unidades pH	6,5 - 9,5	7,71	7,33	7,56
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	2.500	319	132	274
Cloro libre residual	mg/L	0,2 <sup>(1)</sup> - 1,0	1,75	<0,05	0,9
Dureza	mg/L $\text{CaCO}_3$	(3)	118	49	99
Bicarbonatos	mg/L $\text{HCO}_3$	(3)	126	65	114
Manganeso	$\mu\text{g/L}$	50	108	<10	21
Hierro	$\mu\text{g/L}$	200	57	<5	12
Nitritos	mg/L	0,500 <sup>(2)</sup>	0,030	<0,005	0,009
Amoniac	mg/L	0,500	0,033	<0,020	<0,020
Aluminio	mg/L	0,200	0,10	0,02	0,05
Oxidabilidad al permanganato	mg/L $\text{O}_2$	5,0	2,2	0,3	1,6
Trihalometanos totales (THM) <sup>(4)</sup>	$\mu\text{g/L}$	100	282	30	131

(1) Nivel inferior de cloro libre vigente en Andalucía (Decreto 70/2009, Junta Andalucía).

(2) Concentración máxima en red de distribución (RD 140/2003).

(3) Parámetros no contemplados en la normativa sobre aguas de consumo.

(4) Medida de THM tras cloración final del agua antes de distribución.

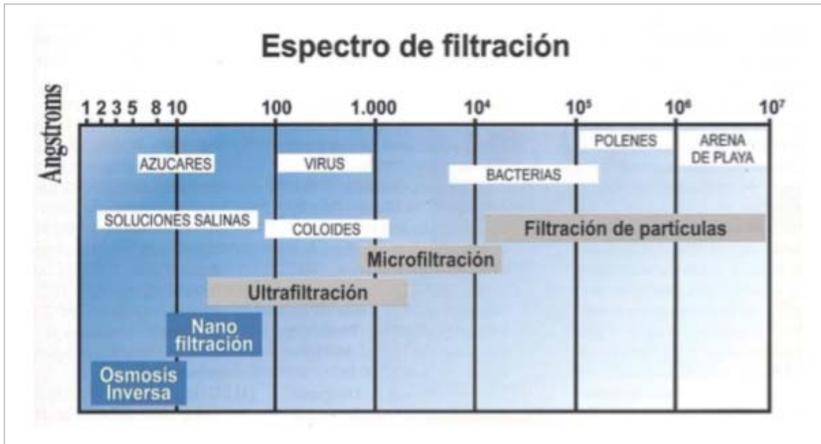


Figura 2. Capacidad de separación de las técnicas de filtración en función del tamaño de las sustancias retenidas

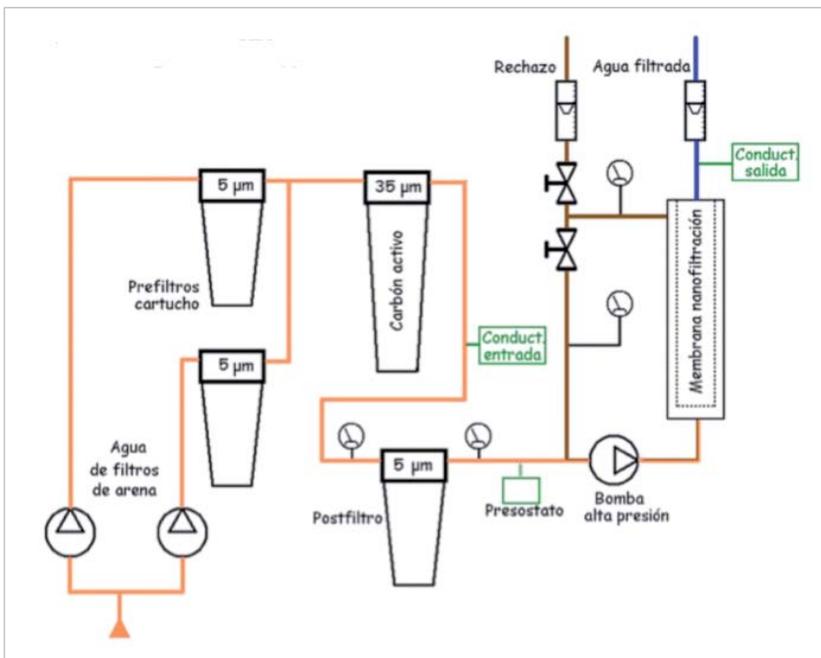


Figura 3. Esquema interno del sistema de nanofiltración instalado

senta la conocida capacidad de separación asociada a las técnicas de filtración disponibles. Dado que se trataba de eliminar del agua precursores de THM (coloides) y microorganismos, se optó por la implantación de un sistema completo de nanofiltración como el más idóneo para la problemática planteada.

El sistema de nanofiltración (suministrado por KÄRCHER™) partiría del agua producida en el equi-

po convencional de filtración sobre arena, sometiendo el fluido a la siguiente línea interna de proceso, recogida en la Figura 3:

- Filtración a través de cartuchos con capacidad de retención de partículas iguales o superiores a 5 µm,
- Filtración sobre carbón activo para retención de THM y compuestos orgánicos variados, incluso aquellos asociados a fenómenos de aparición de olor-sabor en el agua tratada,

- Postfiltración tras carbón activo para retención de impurezas,
- Nanofiltración,
- Cloración final del agua tratada para su distribución a los usuarios.

El sistema completo del tratamiento integral del agua en la actualidad dispone además de analizador en continuo de cloro residual en agua tratada, que podría no ser clorada para posibilitar algunos usos ajenos al consumo directo, tales como riegos y jardinería. Así pues, las posibilidades internas del tratamiento permiten la adaptación del mismo a las circunstancias cambiantes que en cada momento puede plantear el agua bruta del embalse.

Por otro lado, una vez puesta en marcha la instalación, y después de un tiempo de optimización de la misma se procedió a obtener datos del rendimiento del tratamiento con la línea simple de filtración y después de la incorporación de la nanofiltración, en el período comprendido entre el 1-1-2012 y el 31-10-2012.

La comparación entre las Tablas 2 y 3 nos ofrece la pauta del rendimiento comparado obtenido con los dos procesos de tratamiento disponibles. En este sentido, lo





Tabla 3. Características del agua tratada tras el nuevo sistema de nanofiltración y valores paramétricos establecidos en las normativas vigentes

Parámetros	Unidades	RD 140/2003	Máximo	Mínimo	Media
Color	mg/L Pt-Co	15	0,50	<0,2	0,03
Turbidez	UNF	5	0,24	0,02	0,07
pH	unidades pH	6,5 - 9,5	8,05	7,33	7,63
Conductividad	μS/cm	2.500	281	108	177
Cloro libre residual	mg/L	0,2 <sup>(1)</sup> - 1,0	0,26	<0,05	<0,05
Dureza	mg/L CaCO <sub>3</sub>	(3)	80	49	53
Bicarbonatos	mg/L HCO <sub>3</sub>	(3)	98	58	72
Manganeso	μg/L	50	45	<10	15
Hierro	μg/L	200	56	<5	15
Nitritos	mg/L	0,500 <sup>(2)</sup>	0,049	<0,005	0,010
Amoniaco	mg/L	0,500	0,075	<0,020	<0,020
Aluminio	mg/L	0,200	0,07	0,02	0,04
Oxidabilidad al permanganato	mg/L O <sub>2</sub>	5,0	1,0	<0,1	0,3
Trihalometanos totales (THM) <sup>(4)</sup>	μg/L	100	58	<10	13

(1) Nivel inferior de cloro libre vigente en Andalucía (Decreto 70/2009, Junta Andalucía).

(2) Concentración máxima en red de distribución (RD 140/2003).

(3) Parámetros no contemplados en la normativa sobre aguas de consumo.

(4) Medida de THM tras cloración final del agua antes de distribución.

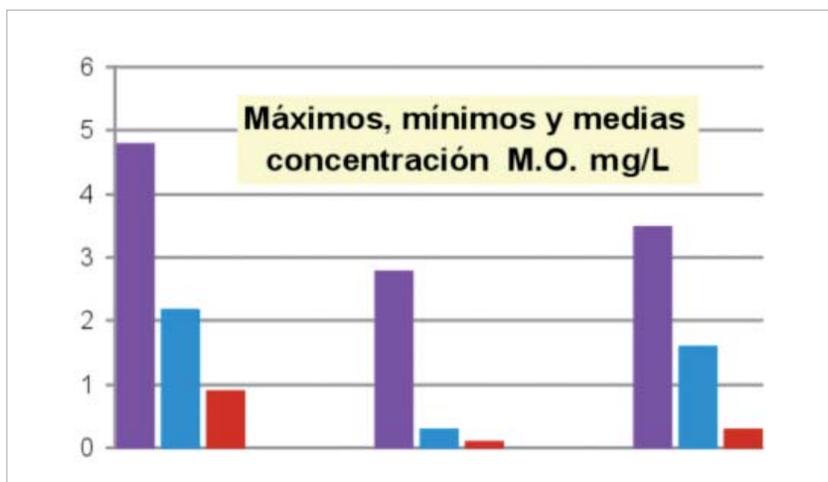


Figura 4. Concentraciones de materia orgánica de agua bruta (morado), agua filtrada (azul) y agua tras nanofiltración (rojo).

prioritario debe ser el funcionamiento con respecto a la eliminación de materia orgánica y en la generación posterior de THM en agua clorada. Atendamos, pues, a la Figura 4 donde se aprecian los valores extremos y medios de materia orgánica en el agua filtrada frente a la nanofiltrada.

La situación en los tres tipos de apartados, como sería previsible,

es mucho más favorable para el agua tras la nanofiltración. En este sentido, el contenido medio de materia orgánica en agua tras nanofiltración es sólo del 19% frente al del agua filtrada (0,3 mg/L vs 1,6 mg/L); además, el máximo en agua tras nanofiltración no supera el 45% en relación a la filtración (1,0 mg/L vs 2,2 mg/L). Como efecto asociado, además, la inci-

dencia de olor-sabor en agua tratada ha sido nula durante el período estudiado.

Si nos fijamos ahora en la Figura 5 apreciaremos los valores extremos de THM en agua clorada tras nanofiltración y tras filtración. Nuevamente, y lo que suponía el objetivo principal perseguido, la situación es drásticamente distinta en los dos casos. Los THM generados en el agua tras nanofiltración no superan el límite paramétrico establecido de 100 μg/L, ni en valor medio (13 μg/L) ni en el valor máximo que fue de <60 μg/L. Por su parte, la generación de THM en el agua filtrada clorada, incluso en valor medio, ya superaba holgadamente el límite establecido (131 μg/L).

Como información complementaria, la Figura 6 presenta la evolución semanal de los niveles de THM en el agua producida tras nanofiltración a lo largo del estudio llevado a cabo (44 muestras). Se observa que después de unos valores relativamente elevados al comienzo de la puesta en marcha del sistema (coincidentes con una situación de calidad deficiente del agua bruta procedente del embalse) el comportamiento del mismo exhibe un mantenimiento sostenido de concentraciones de THM muy bajas tras el tratamiento. Como resumen, con estos resultados ya se justificaba sobradamente la solución adoptada como adecuada al problema de niveles inadecuados de THM existente en el pequeño abastecimiento.

Como aspectos adicionales al rendimiento del sistema, la nanofiltración garantizó siempre la ausencia de coliformes totales y *Escherichia coli* en el agua durante todo el estudio, rebajando sensiblemente el contenido salino. Así, la conduc-

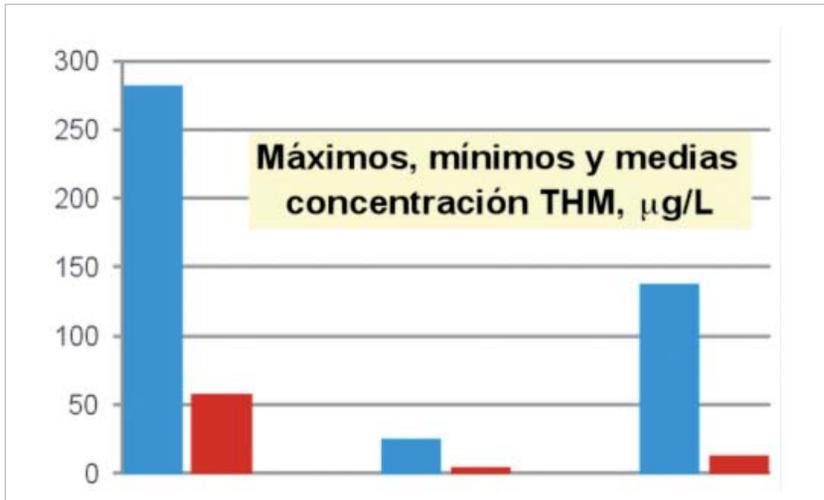


Figura 5. Concentraciones de THM totales del agua filtrada (azul) y del agua tras nanofiltración (rojo)

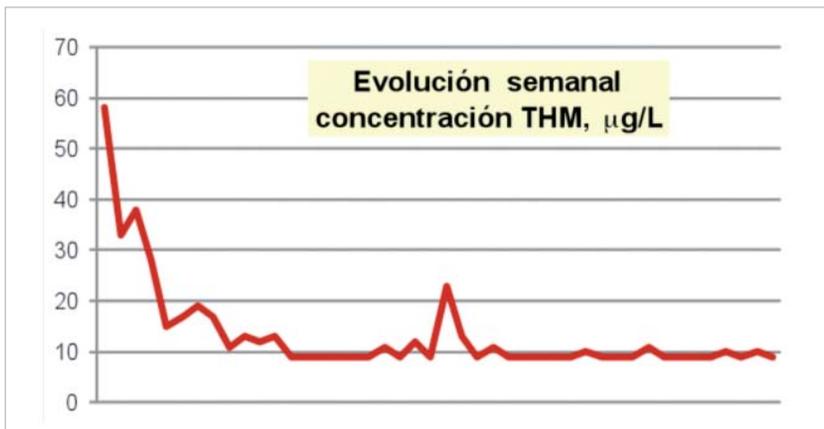


Figura 6. Evolución de los niveles de THM totales en el agua tras la aplicación de la nanofiltración (muestras semanales).

tividad se redujo en valor medio al 65% de la del agua filtrada (desde 274  $\mu\text{S/cm}$  en agua filtrada hasta 177  $\mu\text{S/cm}$ ) mientras la dureza lo hizo en un 54% (99 mg/L vs 53 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ) y los bicarbo-

atos en un 63% (114 mg/L vs 72 mg/L de  $\text{HCO}_3^-$ ).

Finalmente, si bien la nanofiltración no redujo sensiblemente el contenido medio de hierro y manganeso, sí debe apuntarse que actuaba laminando los valores máximos de estos metales en agua tratada y haciendo que en todos los casos el máximo de manganeso no superara el límite paramétrico exigible, situación que no se cumplía sólo con filtración. Tampoco se observó mejora ostensible con relación a los contenidos de aluminio, nitritos o amonio, si bien estos parámetros no eran el objetivo prioritario perseguido.

## CONCLUSIONES

La aplicación de un sistema complementario de nanofiltración al agua producida tras preoxidación y coagulación sobre filtro de arena, consigue mantener concentraciones de THM muy por debajo de lo exigido, con valores medios de 13  $\mu\text{g/L}$ , y con puntas muy inferiores al máximo limitado (58  $\mu\text{g/L}$ ).

Además de producir agua con contenidos salinos sensiblemente más bajos que los de partida, la nanofiltración produce agua con concentraciones muy bajas de materia orgánica (valor medio de 0,3 mg/L) y consiguientemente con mínimas incidencias de olor-sabor.

Finalmente, el sistema también es capaz de producir agua tratada con una calidad microbiológica excelente en cualquier situación.

## Agradecimientos

A D. Juan Sánchez Bejarano, Técnico del departamento de Ingeniería y Mantenimiento de EMAC-SA por la información aportada.

## BIBLIOGRAFÍA

- AWWA. Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones. Madrid, Ed. McGraw-Hill, 1999.
- DEGRÉMONT. Manual Técnico del agua - Memento technique de l'eau. Paris (1.989).
- H.H. HAN and R. KLUTE. Chemical water and wastewater treatment. Ed. Springer-Verlag, Darmstad (1990).
- KÄRCHER™. Información técnica suministrada del sistema comercial de nanofiltración KÄRCHER™ WPC 100 FW-A-RO.
- R. MARÍN GALVÍN. Análisis de Aguas y Ensayos de Tratamiento: Principios y Aplicaciones. Ed. GPE, S.A., Barcelona (1.995).
- R. MARÍN GALVÍN. Físicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos. Tratamiento y Control de Calidad de Aguas. Ed. Díaz de Santos, Madrid (2.003).
- RODRÍGUEZ MELLADO, J. y MARÍN GALVÍN, R. Físicoquímica de Aguas. Ed. Díaz de Santos (1999).
- TCHOBANOGLOUS, G. & SCHROEDER, E. D. Water Quality. Ed. Adisson Wesley Pub. Co., Reading (Mass.) (1985).

