

---

# *Estudio comparativo de eliminación de compuestos fenólicos utilizando la membrana NF-99 de poliamida*

A.M. Hidalgo<sup>1,\*</sup>, G. León<sup>2</sup>, M. Gómez<sup>1</sup>, M.D. Murcia<sup>1</sup>, P. Penalva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Murcia, Campus de Espinardo, 30100 Murcia, Spain

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Murcia, Spain

---

*Comparative study of the removal of organic compounds using NF-99 polyamide membrane*

*Estudi comparatiu d'eliminació de compostos fenòlics utilitzant la membrana NF-99 de poliamida*

*Recibido: 6 de febrero de 2014; revisado: 15/03/2014; aceptado: 20 de marzo de 2014*

## RESUMEN

Actualmente los procesos físicos basados en la tecnología de membranas se han aplicado satisfactoriamente para el tratamiento de aguas residuales, siendo la nanofiltración y la ósmosis inversa los métodos más adecuados para la eliminación de microcontaminantes orgánicos como los compuestos fenólicos. En este trabajo se ha realizado un estudio comparativo sobre el comportamiento de la membrana NF-99 en el proceso de eliminación de fenol, 4-clorofenol y 4-cloro-2-metilfenol. Además, la membrana NF-99 se ha caracterizado con una disolución de cloruro de magnesio, estudiando la influencia de la presión de operación sobre los parámetros característicos del sistema, flujo de permeado y coeficiente de rechazo, antes de realizar la experimentación y tras la realización de los ensayos. De la caracterización de la membrana se obtuvo unos valores en los flujos de permeado y en los coeficientes de rechazo prácticamente constantes, tanto en los ensayos realizados en las condiciones iniciales como en las condiciones finales. El compuesto 4-cloro-2-metilfenol obtuvo los mayores coeficientes de rechazo en todas las condiciones de presión, concentración de alimentación y pH ensayados.

**Palabras clave:** Compuestos fenólicos; nanofiltración; membrana NF-99.

## SUMMARY

Nowadays the physical processes based on membrane technology have been successfully applied for the treatment of wastewater being nanofiltration and reverse osmosis the best methods for removing organic micropollutants such as phenolic compounds. In this work a comparative study on the behaviour of the NF-99 membrane in the process of elimination of phenol, 4-chlorophenol and 4-chloro-2-methylphenol has been carried out. In addition, the NF-99 membrane has been characterized by a solution of magnesium chloride, studying the influence of the operating pressure on the characteristic parameters of the

system, the permeate flux and rejection coefficient, before and after the experimental series. From the membrane characterization, nearly constant values of the permeate flux and rejection coefficients were obtained for both the initial and the final conditions. The compound 4-chloro-2-methylphenol obtained higher rejection coefficients in all conditions of pressure, feed concentration and pH tested.

**Keywords:** Phenolic compounds; nanofiltration; NF-99 membrane.

## RESUM

Actualment els processos físics basats en la tecnologia de membranes s'han aplicat satisfactòriament pel tractament d'aigües residuals, i la nanofiltració i l'osmosi inversa són els mètodes més adequats per a l'eliminació de microcontaminants orgànics com els compostos fenòlics. En aquest treball s'ha realitzat un estudi comparatiu sobre el comportament de la membrana NF-99 en el procés d'eliminació de fenol, 4-clorofenol i 4-cloro-2-metilfenol. A més, la membrana NF-99 s'ha caracteritzat amb una dissolució de clorur de magnesi, estudiant la influència de la pressió d'operació sobre els paràmetres característics del sistema, flux de permeació i coeficient de rebuig, abans de realitzar l'experimentació i després de la realització dels assajos. De la caracterització de la membrana es van obtenir uns valors en els fluxos de permeació i en els coeficients de rebuig pràcticament constants, tant en els assajos realitzats en les condicions inicials com en les condicions finals. El compost 4-cloro-2-metilfenol va obtenir els majors coeficients de rebuig a totes les condicions de pressió, concentració d'alimentació i pH assajats.

**Paraules clau:** Compostos fenòlics; nanofiltració; membrana NF-99.

---

\*Corresponding author: ahidalgo@um.es; tel. +34868887355; fax +34868884148

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales causas de la contaminación de los recursos hídricos es la presencia de compuestos orgánicos de tipo fenólico. Estas sustancias suelen estar presentes en los efluentes de numerosas industrias, son sustancias químicas muy tóxicas, difíciles de degradar, ya que entre sus características se encuentra su baja solubilidad en agua y su elevada liposolubilidad en medios grasos, por tanto resultan bioacumulables en los tejidos de los organismos vivos, incorporándose en la cadena alimentaria. Tienen un tiempo muy prolongado en el medio, y además son capaces de soportar la degradación fotolítica, biológica y química, por todo esto presentan un grave peligro para el medio ambiente y la salud humana [1].

Desde hace varias décadas la concentración de estas sustancias persistentes se ha ido incrementando, debido fundamentalmente al crecimiento industrial y al vertido de estas sustancias al medio, sobre todo a las aguas, desde donde pasan al aire y a la tierra recorriendo grandes distancias. Esto supone un grave problema ambiental por la toxicidad de los compuestos persistentes, lo que causa graves enfermedades a los seres humanos expuestos a ellos y al medio.

Al estudiar los diferentes tipos de tratamientos (físicos, químicos y biológicos) en los procesos de eliminación de los compuestos fenólicos en aguas, nos encontramos que debido a la persistencia y no biodegradabilidad de estos compuestos algunas técnicas clásicas no resultan efectivas para tratar y eliminar este tipo de contaminantes. En la actualidad los procesos físicos basados en la tecnología de membranas han cobrado fuerza en el tratamiento de aguas residuales, siendo la nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (OI) los métodos más adecuados para la eliminación de microcontaminantes orgánicos entre los que se encuentran los pesticidas, compuestos fenólicos y derivados halogenados, entre otros [2-4].

En la realización de este trabajo, inicialmente se ha llevado a cabo la caracterización de la membrana NF-99 mediante el estudio del comportamiento de la misma frente a una disolución salina de cloruro de magnesio, estudiando la influencia de las variables tales como la presión de operación y la concentración de sales de la alimentación sobre los parámetros característicos del sistema, flujo de permeado ( $J_p$ ) y coeficiente de rechazo (R), en el inicio de la experimentación y al final de los ensayos. Posteriormente se ha realizado un estudio comparativo sobre el comportamiento de la membrana NF-99 en el proceso de eliminación de diferentes compuestos fenólicos (fenol, clorofenol y 4-cloro-2-metilfenol).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

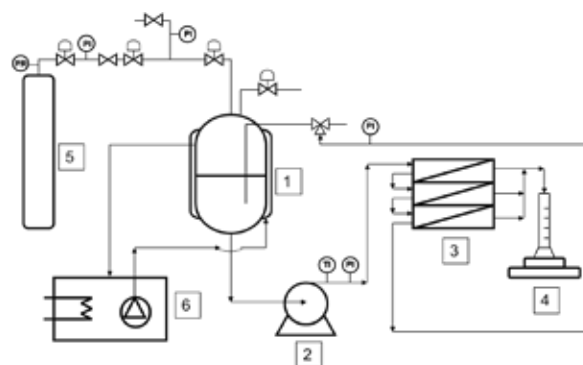
El equipo de pruebas utilizado para realizar los ensayos a escala de laboratorio con membranas planas y un flujo transversal no muy elevado fue el módulo de membranas Triple System Model F1, de la casa comercial MMS.

En la figura 1 se muestra un diagrama de flujo de la unidad experimental. La disolución contenida en el tanque de alimentación es impulsada mediante una bomba al módulo, donde se albergan las membranas de poliamida NF-99. En este punto, la corriente se divide en dos:

- una corriente de permeado, que es recogida para su posterior análisis y

- una corriente de rechazo, que es devuelta al depósito de alimentación mediante una válvula de tres vías.

La presión de operación se consigue mediante la introducción de nitrógeno al sistema, dicha presión es regulada mediante una válvula de todo o nada y tres válvulas de aguja, estando una de ellas provista de un manómetro. Con el fin de controlar la temperatura del sistema y evitar una elevación de la temperatura que pueda dañar las membranas, se hace circular agua termostatada a través del encamisado del depósito de alimentación.



**Fig. 1.** Diagrama de procesos del equipo experimental. (1) Tanque de alimentación, (2) bomba impulsora, (3) módulo de membranas, (4) balanza, (5) nitrógeno, (6) baño termostático.

La unidad trabaja de forma discontinua pues no se puede retornar el permeado al tanque de alimentación. Sin embargo, devuelve al depósito de alimentación la corriente de rechazo, por lo que la concentración de la disolución que llega al módulo de membranas se va incrementando conforme transcurre el tiempo de operación.

La membrana NF-99 que fue seleccionada para la realización de los diferentes ensayos fue suministrada por Alfa-Laval. En la tabla 1 se exponen las principales características de dicha membrana.

**Tabla 1.** Características de la membrana NF-99.

<b>Firma suministradora</b>	Alfa Laval
<b>Fabricante</b>	Dow Chemical
<b>Denominación</b>	NF-99
<b>Tipo</b>	Compuesta de capa fina en poliéster
<b>Composición</b>	Poliamida
<b>Área superficial (cm<sup>2</sup>)</b>	(30) x 3
<b>Máxima presión tolerada (bar)</b>	55
<b>Rechazo al MgSO<sub>4</sub> (%)</b>	≥ 97
<b>Rango de pH tolerado</b>	3-10
<b>Temperatura máxima tolerada (°C)</b>	50

La caracterización de la membrana se ha llevado a cabo a través de una disolución salina de MgCl<sub>2</sub>. Inicialmente se realizó una recta de calibrado preparando los patrones a concentraciones conocidas y midiendo la conductividad de las disoluciones. Se correlacionaron los valores de conductividad de las diferentes concentraciones de las disoluciones patrón, obteniendo la siguiente relación:

$$\Lambda = 0,1648 \cdot C_{MgCl_2} \quad (r = 0,9986)$$

La concentración en ambas sales de las fracciones recogidas se obtuvo mediante la medida de la conductividad de las distintas muestras con un conductímetro EC-Meter GLP 31.

El análisis de los diferentes compuestos (fenol, 4-clorofenol y 4-cloro-2-metilfenol) se ha llevado a cabo por espectrofotometría ultravioleta/visible, utilizando un espectrofotómetro Shimadzu UV-160 A. El método utilizado [5] se basa en la formación de un compuesto de color rojo vino mediante la reacción del compuesto fenólico con 4-aminoantipirina en presencia de ferricianuro potásico. Estos compuestos reaccionan presentando un máximo de absorbancia a una longitud de onda de 505 nm.

En la tabla 2 se muestran las rectas de calibrado obtenidas para los diferentes compuestos ensayados.

**Tabla 2.- Rectas de calibrado de los diferentes compuestos fenólicos ensayados.**

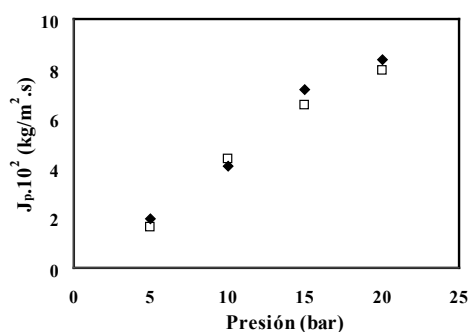
Compuesto	Ecuación	Coefficiente de correlación r
Fenol	$A = 10.142 \cdot C_p$	0.9991
4-clorofenol	$A = 9.5150 \cdot C_{CP}$	0.9999
4-cloro-2-metilfenol	$A = 8.9689 \cdot C_{4C2MP}$	0.9994

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización de la membrana al inicio y final de los ensayos realizados

Para llevar a cabo la caracterización de la membrana y estudiar su capacidad de rechazo para iones divalentes ( $MgCl_2$ ) se estudió la influencia de la presión de operación sobre el flujo de permeado y se calculó la eficacia de eliminación de estas sales. Dicha caracterización se realizó antes de las series experimentales con la membrana nueva (condiciones iniciales) y tras la realización de toda la experimentación con los compuestos orgánicos fenólicos (condiciones finales), estudiando la influencia de la presión de trabajo, con valores de 5, 10, 16 y 20 bar y manteniendo constante la concentración inicial de alimentación en 1 g/L. Debido al rango de temperatura y las concentraciones con las que se trabajó durante los ensayos realizados, se ha considerado que se puede suponer la densidad de las disoluciones salinas semejantes a las del agua [6].

En las figuras 2 y 3 se muestran los resultados de la influencia de la presión de operación sobre el flujo de permeado y el coeficiente de rechazo en las condiciones iniciales y finales ensayadas.



**Fig. 2.** Influencia de la presión de operación en el flujo de permeado: (□) inicio y (♦) final del ensayo.

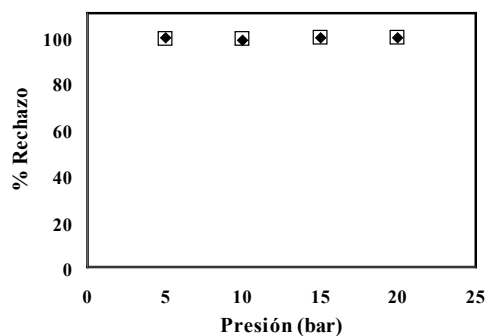
En la figura 2 se observa que tanto al inicio de la experimentación como después de haber realizado los ensayos con los diferentes compuestos orgánicos, la membrana NF-99 muestra que para las disoluciones salinas de  $MgCl_2$  el flujo de permeado aumenta conforme se incrementa la presión utilizada, lo que se debe a que al aumentar dicha presión variable, se vence más fácilmente la presión osmótica y se incrementa la fuerza impulsora del sistema, esto es, el gradiente de presión. No existe una diferencia significativa entre la caracterización inicial de la membrana y la llevada a cabo después de la experimentación.

Por otra parte, el aumento de presión en el sistema no provoca dependencia alguna, manteniéndose un elevado coeficiente de rechazo de la sal en torno al 99 %, incluso después de haber llevado a cabo los ensayos con los compuestos fenólicos, por lo que podemos concluir que la membrana no ve alterado su comportamiento respecto a la eliminación de sales.

#### 3.2. Estudio comparativo de eliminación de diferentes compuestos fenólicos

Posteriormente a la caracterización de la membrana de nanofiltración NF-99 y al estudio realizado para determinar la capacidad de eliminación de los diferentes contaminantes fenólicos, 4-cloro-2-metilfenol, 4-clorofenol y fenol se procedió a realizar un estudio comparativo del comportamiento de la misma.

El fenol fue utilizado en un estudio previo [7] en el que se llevaron a cabo ensayos variando la concentración de fenol (de 50 a 200 mg/L), la presión de operación (de 10 a 20 bar) y el pH (de 7 a 9). El 4-clorofenol fue usado [8] en otro estudio, en el que se varió la concentración de 4-clorofenol (de 50 a 250 mg/L), la presión de operación (de 5 a 25 bar) y el pH (de 5 a 9). El estudio realizado con 4-cloro-2-metilfenol estuvo en los rangos de concentraciones (de 25 a 100 mg/L), presión de operación (de 5 a 20 bar) y pH (de 7 a 11). Además, para poder comparar correctamente el comportamiento que muestran los diferentes compuestos disueltos en disolución acuosa y que van a ser eliminados mediante el proceso de nanofiltración, es necesario conocer las características físicas y químicas de dichos compuestos. En la tabla 3 se recogen algunas de las propiedades físico-químicas de los citados compuestos.



**Fig. 3.** Influencia de la presión de operación en el porcentaje de rechazo: (□) inicio y (♦) final del ensayo.

**Tabla 3.- Propiedades físico-químicas de los compuestos.**

COMPUESTO	ESTRUCTURA MOLECULAR	PESO MOLECULAR (g/mol)	pK <sub>a</sub>	logK <sub>ow</sub>
4-Cloro-2-metilfenol		142.60	9.71	3.09
4-Clorofenol		128.60	9.20	2.42
Fenol		94.11	9.90	1.46

En la tabla 4 se muestra una comparativa del estudio de eliminación de los distintos compuestos con la membrana NF-99, a distintas presiones de operación (pH = 7 y concentración de compuesto 150 mg/L). En dicha tabla se observa que el compuesto 4-cloro-2-metilfenol presenta un porcentaje de rechazo mayor que el 4-clorofenol y el fenol. También se observa que tanto para el 4-cloro-2-metilfenol como para el fenol, al aumentar la presión los porcentajes de rechazo disminuyen, mientras que para el 4-clorofenol no hay una tendencia clara. No obstante tanto el 4-cloro-2-metilfenol como los otros dos compuestos buscados en la bibliografía, presentan unos coeficientes de rechazo pequeños. En cuanto al flujo de permeado, se observa que para los tres contaminantes al incrementar la presión, el flujo es mayor, obteniéndose para el 4-cloro-2-metilfenol los caudales más elevados.

**Tabla 4.- Comparación del coeficiente de rechazo y del flujo de permeado obtenidos para cada contaminante al variar la presión de operación.**

NF-99	%R			J <sub>p</sub> · 10 <sup>2</sup> (kg/m <sup>2</sup> s)		
	4C2MP	4-Clo-rofenol	Fenol	4C2MP	4-Clo-rofenol	Fenol
P (bar)						
10	18.37	6.37	12.81	3.88	2.31	1.48
15	14.20	4.86	9.64	6.22	3.38	2.58
20	12.30	7.32	8.08	7.83	4.39	6.21

En la tabla 5 se recogen los datos para la serie experimental en la que se varía el pH de la disolución de alimentación para cada uno de los contaminantes (presión = 20 bar y concentración de compuesto 150 mg/L).

**Tabla 5.- Comparación del coeficiente de rechazo y del flujo de permeado obtenidos para cada contaminante al variar el pH de la alimentación.**

NF-99	%R			J <sub>p</sub> · 10 <sup>2</sup> (kg/m <sup>2</sup> s)		
	4C2MP	4-Clo-rofenol	Fenol	4C2MP	4-Clo-rofenol	Fenol
pH						
7	12.30	7.32	8.08	7.83	4.39	6.21
8	10.03	7.28	9.07	8.44	4.11	1.60
9	25.98	18.90	3.9	7.80	4.08	4.81

Si se observan los datos que se muestran en la tabla 5, se aprecia que conforme aumenta el pH de la disolución,

aumenta también el porcentaje de rechazo excepto para el fenol. Sin embargo, este aumento es pequeño, ya que para observar un gran incremento en el rechazo se debió trabajar con pH superiores al pK<sub>a</sub> de cada compuesto. También se observa que para el 4-cloro-2-metilfenol los rechazos son mayores que para los otros contaminantes. Para la variación del flujo de permeado con el pH se observa que para el 4-cloro-2-metilfenol se producen unos valores mayores que para los otros dos compuestos, prácticamente el doble de los valores que para el 4-clorofenol. Además, se aprecia que para el 4-cloro-2-metilfenol y el 4-clorofenol, los flujos se mantienen más o menos constantes.

Por último, en la tabla 6 se muestran los datos del coeficiente de rechazo y del flujo de permeado referido a la concentración de la alimentación, para cada uno de los compuestos ensayados (presión = 20 bar y pH = 7).

**Tabla 6.- Comparación del coeficiente de rechazo y del flujo de permeado obtenidos para cada contaminante al variar la concentración de la alimentación.**

NF-99	%R			J <sub>p</sub> · 10 <sup>2</sup> (kg/m <sup>2</sup> s)		
	C <sub>a</sub> (mg/L)	4C2MP	4-Clo-rofenol	Fenol	4C2MP	4-Clo-rofenol
50	10.03	8.32	11.13	7.51	4.87	4.94
100	11.20	6.73	8.80	7.23	4.78	5.94
150	12.30	7.32	8.08	7.83	4.39	6.21

De los valores del coeficiente de rechazo de la tabla 6, se observa que mientras el compuesto 4-cloro-2-metilfenol se retiene en mayor porcentaje al aumentar la concentración de la alimentación, sin embargo, para el 4-clorofenol y el fenol sucede lo contrario, esto es, los rechazos disminuyen.

En cuanto a los flujos de permeado, matizar que para los tres compuestos, éstos se mantienen prácticamente constantes al aumentar la concentración, presentando el 4-cloro-2-metilfenol mayor flujo de permeado.

Para concluir, si se comparan los valores expuestos en las tablas 4, 5 y 6 desde una perspectiva general se puede comentar que tanto los coeficientes de rechazo como los flujos de permeado para el compuesto 4-cloro-2-metilfenol, presentan valores superiores a los otros dos compuestos, fenol y 4-clorofenol, para cada una de las variables, presión, pH y concentración de alimentación estudiadas.

Este hecho puede ser debido a diversos factores. El principal mecanismo de rechazo para la eliminación de compuestos orgánicos es el peso molecular. Así, se observa que el 4-cloro-2-metilfenol es el compuesto de mayor peso molecular y con el que se ha obtenido mayores porcentajes de rechazo. Sin embargo, algunos autores concluyen que aunque el peso molecular de solutos es útil, la anchura molecular demostró ser el parámetro más adecuado para describir la retención tamizada por membranas [9].

Por el contrario, el fenol posee menor peso molecular que el 4-clorofenol y se obtienen mayores porcentajes de rechazo, por lo que influyen otros parámetros, a parte del peso molecular, en la retención de los compuestos mediante membranas.

Numerosos artículos sugieren que el mecanismo de rechazo de compuestos orgánicos no solo depende del peso molecular, sino que hay más factores que afectan al

rechazo, como la polaridad, la acidez, la carga y la hidrofobicidad, entre otras [10, 11].

Algunos autores indican que solutos con una mayor anchura molecular y longitud, además de tener un mayor coeficiente de partición de octanol-agua ( $\log K_{ow}$ ), tendrán mayores retenciones para todas las membranas [9]. El 4-cloro-2-metilfenol presenta mayor  $\log K_{ow}$  por lo que se demuestra de nuevo su mayor porcentaje de rechazo frente a los otros compuestos.

Por otro lado, si se observa las constantes de  $pK_a$  de los compuestos, todos son ácidos, por lo que a mayor valor de  $pK_a$  se obtiene mayor porcentaje de rechazo, y viceversa. El fenol es el que presenta mayor constante de  $pK_a$ , por lo que este puede ser el factor por el que la membrana retiene más el fenol que el 4-clorofenol. Además, el 4-clorofenol posee un momento dipolar alto, debido a que el cloro es muy electronegativo y atrae hacia él el par de electrones. Algunos autores determinan que las moléculas orgánicas que tienen mayor momento dipolar tienen retenciones bajas [12].

En cuanto al flujo de permeado, componentes con un alto coeficiente de reparto octanol-agua muestran más interacciones hidrofóbicas y causan la disminución de éste. Además, también debe tenerse en cuenta el tamaño molecular [13]. Moléculas de solutos con menor anchura y longitud y  $\log K_{ow}$  (hidrofílicas) pasarán más fácilmente a través de la membrana [9]. Sin embargo, el 4-cloro-2-metilfenol, que posee mayor tamaño molecular y  $\log K_{ow}$ , es el que mayor flujo de permeado se obtiene, contradiciendo a lo anteriormente dicho.

#### 4. CONCLUSIONES

Al caracterizar el comportamiento de la membrana NF-99 frente a disoluciones de cloruro de magnesio se concluye que dicha membrana obtiene unos valores de rechazo en un intervalo del 98,5 al 99,5%, acordes con los aportados por la firma comercial y los referenciados en la bibliografía. Además, estos valores de rechazo no varían al realizar la caracterización de la membrana tras la realización de los ensayos, obteniéndose valores prácticamente semejantes a los obtenidos en las condiciones iniciales.

En el estudio comparativo sobre el comportamiento de la membrana NF-99 frente a diferentes compuestos orgánicos se concluye que el 4-cloro-2-metilfenol es la especie rechazada en mayor proporción obteniendo, en el rango de condiciones ensayadas, mayores valores de coeficientes de rechazo como flujos de permeado con respecto a los compuestos 4-clorofenol y fenol. Todo ello hace pensar que el principal factor que interviene en el rechazo es el tamaño molecular de estas especies, aunque hay que tener en cuenta otros factores como son la anchura y longitud de la molécula, el coeficiente de partición octanol-agua y el  $pK_a$  de cada compuesto.

La variable que más influencia ha ejercido sobre los dos parámetros característicos del sistema (flujo másico de permeado y coeficiente de rechazo) en la membrana NF-99 ha sido el pH de la disolución de alimentación. Para explicar la influencia del pH sobre el porcentaje de rechazo de las membranas de poliamida hay que tener en cuenta dos aspectos fundamentales; la carga de la membrana y la especie existente en el medio. Para la membrana NF-99 los coeficientes de rechazo muestran un aumento consi-

derable del 10 al 25% al acercarnos al valor del  $pK_a$  del 4-cloro-2-metilfenol.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado del proyecto de investigación 08683/PI/08, financiado por la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia (España). M.D. Murcia fue beneficiaria de la beca Juan de la Cierva de MICINN.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2005. <http://www.atsdr.cdc.gov/cercla/05list.html>
2. Ozaki, H., Li, H. (2001). Rejection of organic compounds by ultra-low pressure reverse osmosis membrane, *Water Res.*, 36, 123-130.
3. Vargas, A., Moreno-Andrade, I., Buitrón, G. (2008). Controlled backwashing in a membrane sequential batch reactor used for toxic wastewater treatment, *J. Membr. Sci.*, 320, 185-190.
4. Li, Y., Wei, J., Wang, C., Wang, W. (2010). Comparison of phenol removal in synthetic wastewater by NF or RO membranes, *Desalin. Water. Treat.*, 22, 211-219.
5. Clesceri, L.S., Greenberg, A.E., Eaton, A.D. (1995). "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". APHA, 19th ed. Método 5530, (5) 36-39.
6. Nora'aini, A., Abdul Wahab, M. (2004). The development of predictive modeling of nanofiltration membrane properties: A review. *Kolej Universiti Sains & Teknologi and Universiti Kebangsaan (Malaysia)*. 1-15.
7. Bódalo, A., Gómez, E., Hidalgo, A.M., Gómez, M., Murcia, M.D., López, I. (2009). Nanofiltration membrane to reduce phenol concentration in wastewater. *Desalination*, 245, 680-686.
8. Hidalgo, A.M., León, G., Gómez, M., Murcia, M.D., Gómez, E., Gómez, J.L. (2013). Application of the Spieger-Kedem-Kachalsky model to the removal of 4-chlorophenol by different nanofiltration membranes. *Desalination*, 315, 70-75.
9. Agenson, K.O., Oh, J., Urase, T. (2003). Retention of a wide variety of organic pollutants by different nanofiltration/reverse osmosis membranes: controlling parameters of process. *J. Membr. Sci.*, 225, 91-103.
10. Bellona, C., Drewes, J.E., Xu, P., Amy, G. (2004). Factors affecting the rejection of organic solutes during NF/RO treatment – a literature review. *Water Res.*, 38, 2795-2809.
11. Ben-David, A., Bason, S., Jopp, J., Oren, Y., Freger, V. (2006). Partitioning of organic solutes between water and polyamide layer of RO and NF membranes: Correlation to rejection. *J. Membr. Sci.*, 281, 480-490.
12. Causserand, C., Aimar, P., Cravedi, J.P., Singlande, E. (2005) Dichloroaniline retention by nanofiltration membranes. *Water Res.*, 39, 1594-1600.
13. Van der Bruggen, B., Braeken, L., Vandecasteele, C. (2002) Flux decline in nanofiltration due to adsorption of organic compounds. *Sep. Purif. Technol.*, 29, 23-31.