

# Síntesis de membranas poliméricas: Estudio de su desempeño en la remoción de arsénico de aguas contaminadas

Estela M. Romero-Dondiz<sup>1</sup>, Nazarena Sastre Moya<sup>1</sup>, Jorge E. Almazán<sup>1</sup>, Liliana Lorenzo<sup>2</sup>, y Elsa M. Farfán Torres<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Investigaciones para la Industria Química (INIQUI-CONICET-UNSa), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina*

<sup>2</sup>*Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina*

<sup>3</sup>*Instituto de Investigaciones para la Industria Química (INIQUI-CONICET-UNSa), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina*

Fecha de recepción del manuscrito: 21/09/2018

Fecha de aceptación del manuscrito: 12/12/2018

Fecha de publicación: 26/12/2018

**Resumen**—El agua es un recurso indispensable y fundamental para el desarrollo de la vida. Sin embargo, la presencia de varios elementos, pueden afectar seriamente la calidad del agua, produciendo un problema ambiental y en la salud de las personas. El arsénico (As) fue reconocido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), como uno de los contaminantes inorgánicos más tóxicos presentes en el agua de bebida. Argentina, es uno de los países del mundo con mayor extensión afectada por aguas subterráneas contaminadas naturalmente con As. Los procesos de separación con membranas son una alternativa tecnológica para remover As de las aguas de consumo humano. En el presente trabajo se sintetizaron membranas poliméricas de acetato de celulosa y nylon mediante el método de inversión de fase, modificando las condiciones de síntesis. Posteriormente, se evaluó la eficiencia de remoción de As de agua sintética con una concentración de 150 µg As/L. Se analizó la influencia de los parámetros operativos como presión transmembrana y velocidad de alimentación, en la remoción de As y en el flujo permeado. Algunas de las membranas fabricadas permitieron obtener una corriente de permeado con un contenido de As por debajo del límite máximo permitido por la OMS (10 µg As/L).

**Palabras clave**—remoción, arsénico, membranas, agua.

**Abstract**—Water is an indispensable and fundamental resource for the development of life. However, the presence of several elements can seriously affect water quality, producing environmental and people health problems. Arsenic (As) was recognized by the World Health Organization (WHO) as one of the most toxic inorganic contaminants present in drinking water. Argentina, is one of the countries in the world with the largest extent affected by groundwater naturally contaminated with As. Membrane separation processes are a technological alternative to remove As from the waters of human consumption. In the present work, polymeric membranes of cellulose acetate and nylon were synthesized by the phase inversion method, modifying the synthesis conditions. Subsequently, the removal efficiency of As of synthetic water was evaluated with a concentration of 150 µg As/L. The influence of the operating parameters as transmembrane pressure and feed rate, in the removal of As and the permeate flux was analyzed. Some membranes presented a permeate flux with an As content below the maximum limit allowed by the WHO (10 µg As/L).

**Keywords**—removal, arsenic, membranes, water

## INTRODUCCIÓN

La presencia de contaminantes, de origen natural, en aguas superficiales y subterráneas es un problema mundial, especialmente en Bangladhes, Argentina, India, México, Mongolia, Taiwán, entre otros (Smedly y Kinniburgh, 2002). En Argentina las aguas superficiales y subterráneas presentan una alta peligrosidad salina y

concentraciones elevadas de diferentes contaminantes de origen geotérmico, tales como el arsénico (As) y el boro (B) (Sato et al., 2002, Litter, 2011).

El consumo, por períodos prolongados, de aguas contaminadas con B y/o As ocasionan diversos efectos en la salud de las personas, que van desde lesiones en la piel hasta alteraciones en el sistema digestivo, cardiovascular, e incluso la muerte (Bundschuh et al., 2010). Además, poseen la particularidad que no altera el sabor ni el color del agua, ni tampoco el de los alimentos que se preparan a partir de ella. El límite de tolerancia para aguas destinadas al consumo humano, recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para B y As es de 0,5 mg/L y

Dirección de contacto:

Estela M. Romero-Dondiz, Av. Bolivia N° 5150 – Salta, C.P. 4400, Tel: 54-387 4255361, E-mail: eromerodondiz@yahoo.com.ar

0,01 mg/L (0,5 ppm y 0,01 ppm), respectivamente. Sin embargo existen regiones de nuestro país con concentraciones muy superiores. Por lo cual, es necesario investigar y desarrollar procesos tecnológicos eficientes que permitan remover estos contaminantes y proveer de agua segura a diversas poblaciones en amplias regiones del mundo y particularmente en nuestro país.

Una alternativa tecnológica son los procesos de separación por membranas (PSM), los cuales tienen la principal ventaja que la concentración y separación se logra, en la mayoría de los casos, sin un cambio de estado y sin la utilización de productos químicos o energía térmica, por lo que realizan un uso eficiente de la energía y son una buena alternativa para tratamiento de agua para consumo humano (Baker, 2004).

El corazón de los PSM son las membranas. Las cuales se pueden fabricar a partir de una gran variedad de materiales y dependiendo de las condiciones de síntesis se obtienen membranas con diversas estructuras morfológicas y propiedades separativas (Nguyen *et al.*, 2009). Su eficiencia depende de la morfología, del tamaño y distribución de poros, polaridad, polímero base, afinidad entre el material de la membrana y el soluto a separar, entre otras características. El desempeño de la membrana se evalúa mediante dos parámetros: la selectividad y el flujo permeado a través de la misma.

Uno de los métodos más utilizados para sintetizar membranas poliméricas es la Técnica de inmersión de fase por inmersión-precipitación. Este método se caracteriza por permitir obtener membranas con diversas morfologías y características estructurales, que va desde la microfiltración (MF), ultrafiltración (UF) hasta incluso osmosis inversa (OI), con tan solo modificar alguna de las condiciones de fabricación de las membranas.

El objetivo del presente trabajo, fue sintetizar membranas poliméricas de acetato de celulosa (AC) y nylon (Ny) mediante el método de inversión de fase por inmersión-precipitación modificando las condiciones de síntesis y posteriormente evaluar la eficiencia de remoción de As utilizando aguas sintéticas formuladas a partir de arsénico y agua destilada. Se analizó el efecto de la presión transmembrana (*PTM*) y la velocidad de alimentación con respecto al flujo permeado y a la selectividad de la membrana hacia el arsénico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Materiales*

Para la síntesis de membranas se prepararon soluciones poliméricas utilizando como soluto Acetato de celulosa (AC) y Nylon (Ny), provistos ambos por Sigma - Aldrich Chemistry, EE.UU. Empleando como solventes, para el caso de las membranas de AC, acetona y una mezcla de acetona:formamida y para las membranas de Ny, los solventes fueron ácido clorhídrico y ácido fórmico. Todos de Cicarelli, grado analítico.

Las membranas se extendieron sobre un soporte comercial no tejido (non-woven) de poliéster-polipropileno, Viledon (novatexx 2430 ND) donado por Freudenberg Vliesstoffe KG, Alemania.

### *Síntesis de membranas*

Las membranas se sintetizaron utilizando el método de inversión de fase por inmersión – precipitación (Baker, 2004, Mulder, 1996). Las membranas fabricadas se identificaron con la siguiente nomenclatura CA-S-V-X-Y, similar al adoptado por Rosa y col. (Murphy y de Pinho, 1995), donde “CA” indica el polímero utilizado (AC: Acetato de celulosa; Ny: Nylon), “S” Y “V” es el tipo de solvente utilizado (A: Acetona pura o A-F: acetona y formamida ; HCl: ácido clorhídrico; AF: ácido fórmico o HCl-AF: ácido clorhídrico y ácido fórmico), “X” la concentración de polímero en la solución, “Y” el tiempo de evaporación del solvente a la atmósfera.

Se sintetizaron 16 membranas poliméricas tanto de AC como de Ny modificando las condiciones de síntesis de tres variables: a) concentración de polímero, b) tipo de solvente y c) tiempo de evaporación a la atmósfera. La concentración de AC se varió en un rango de 15 a 25% p/p y la concentración de Ny en un rango desde 10 a 17% p/p. Los solventes utilizados fueron acetona pura y una mezcla de acetona:formamida (1;1), para las soluciones utilizadas para fabricar las membranas de AC. Mientras que, las soluciones para fabricar las membranas de Ny fueron preparadas en algunos casos a partir de ácido clorhídrico y en otros a partir de una mezcla de ácido clorhídrico:ácido fórmico (1:1). Se analizó el efecto de cuatro tiempos de evaporación diferentes: 0, 30, 60 y 90 segundos.

### *Caracterización de las membranas sintetizadas*

La caracterización de las membranas es de suma importancia puesto que permite explicar, de cierto modo, el comportamiento de la membrana en el PSM para una dada aplicación (Baker, 2004). Todas las membranas fueron caracterizadas por medidas de espesor, contenido de agua en equilibrio (CAE), porosidad (P), ángulo de contacto y microscopía electrónica de barrido (MEB).

Medida de espesor: el espesor de las membranas se determinó utilizando un tornillo electrónico micrométrico, marca Flower. Se realizaron siete medidas en posiciones aleatorias de cada muestra, reportando luego el valor promedio.

Contenido de agua en equilibrio (CAE): es la cantidad de agua absorbida o contenida en la membrana en estado de equilibrio. Es un parámetro de caracterización importante, ya que es un indicador indirecto del grado de hidrofilia o hidrofobia de la membrana (Arthanareeswaran *et al.*, 2010). Al mismo tiempo está relacionado con la porosidad de la muestra y permite estimar, en cierto modo, el flujo permeado de agua pura de la membrana (Tamure *et al.*, 1981). El CAE a temperatura ambiente se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$CAE = \frac{(W_h - W_s)}{W_h} \times 100 \quad (1)$$

Donde,  $W_h$  es el peso húmedo y  $W_s$  el peso seco de la membrana (kg).

Porosidad: indica el porcentaje de membrana ocupado por los poros, se determina utilizando el método directo Psicrométrico (Palacio *et al.* 1999), este consiste en sumergir la muestra en un líquido (en nuestro caso, agua

destilada) de densidad  $\rho_a$ , para que este líquido llene el espacio vacío de los poros, de manera tal que el volumen ocupado por los poros sea igual (en ausencia de deformaciones) al volumen de líquido contenido en el interior de la membrana. Por lo tanto, se calcula como:

$$\text{Porosidad} = \frac{(W_h - W_s)}{(\rho_a \times V_m)} \times 100 \quad (2)$$

Donde  $\rho_a$  es la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) del agua a  $20^\circ\text{C}$  y  $V_m$  es el volumen de la membrana húmeda ( $\text{m}^3$ ). Cabe aclarar que esta ecuación permite determinar la porosidad total de la membrana, es decir que tiene en cuenta tanto los poros pasantes como los no pasantes.

Angulo de contacto: se utilizó un goniómetro (Standard Goniometer con DRO Pimage Standard, modelo 200-00, Ramé-Hart Instrument Co.). Se realizaron cinco medidas en distintos puntos de cada muestra, reportando luego el valor promedio.

Microscopia electrónica de barrido: el corte transversal de las membranas fabricadas se observó utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), equipo JEOL modelo JSM-6480 LV, perteneciente a la Universidad Nacional de Salta (UNSA).

### Ensayos de filtración con agua ultrapura

Los ensayos se llevaron a cabo en un equipo de filtración, a escala laboratorio, de flujo tangencial con recirculación como se muestra en la Fig. 1. La corriente de alimentación que pasa a través de la membrana, se separa en dos corrientes: una denominada retenido constituida por moléculas de elevado peso molecular y otra corriente llamada permeado que contiene el disolvente y la fracción de moléculas que atraviesan la membrana (Baker, 2004).

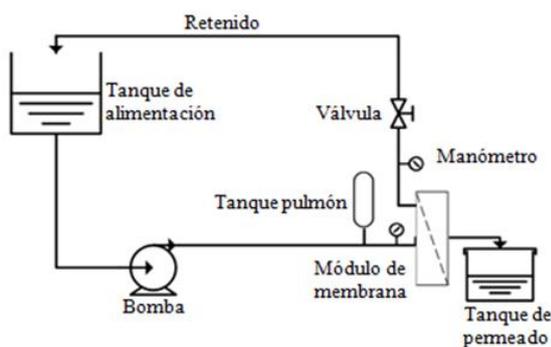


Fig. 1: Esquema del equipo de filtración utilizado. Fuente: elaboración propia.

El equipo fue construido en la Universidad Nacional de Salta, está constituido por una celda de acrílico plana, con un área efectiva de membrana de  $0,004 \text{ m}^2$ . Una válvula reguladora de presión, dos manómetros, un tanque pulmón plástico, un tanque de alimentación y otro de permeado, una bomba peristáltica marca APEMA modelo BS6D, con un variador electrónico de revoluciones por minuto, que permite regular la velocidad de la bomba y por lo tanto el caudal de alimentación. El flujo permeado se descarga continuamente en el tanque de permeado, el cual está ubicado sobre una balanza electrónica (Shimadzu UX-

2200H, Japón), conectada a una computadora para el registro automático y continuo del peso del permeado recolectado cada cierto intervalo de tiempo. El retenido es recirculado continuamente, al tanque de alimentación.

Previo a los ensayos de filtración con agua contaminada con As, las membranas fueron sometidas a una etapa de compactación, es decir a una etapa inicial de filtración con agua ultrapura hasta que el flujo permeado alcance un valor estable (aproximadamente después de dos horas bajo una presión de  $1,5 \text{ kgf/cm}^2$  para AC y  $2 \text{ kgf/cm}^2$  para Ny. Durante este proceso la estructura se densifica y como resultado el flujo permeado decae (Mulder, 1996). La presión de compactación debe ser mayor a la presión de trabajo, por lo general se adopta un 20% superior a la presión de operación.

Uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta durante los ensayos de filtración es el flujo permeado de agua ( $J_a$ ), el cual está íntimamente relacionado con la permeabilidad hidráulica ( $L_p$ ) de la membrana.

$$J_a = \frac{V}{A \times \Delta t} \quad (3)$$

Donde  $A$  es el área efectiva de la membrana,  $V$  el volumen de filtrado y  $\Delta t$  el tiempo de filtración.

Después de la etapa de compactación, se determinó en condiciones de estado estacionario el  $J_a$  ( $\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$ ) a diferentes presiones transmembrana (rango de  $0,5$  a  $2 \text{ kgf/cm}^2$ ). La permeabilidad hidráulica ( $L_p$ ) de la membrana se determina como la pendiente de la curva entre el flujo permeado de agua pura ( $J_a$ ) y la presión transmembrana aplicada ( $PTM$ ), de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$L_p = \frac{J_a}{PTM} \quad (4)$$

### Ensayos de filtración con agua contaminada con arsénico

Los ensayos de filtración se llevaron a cabo utilizando agua sintética contaminada con As, formulada en el laboratorio, con una concentración de  $0,150 \text{ mg As/L}$ . La misma se formuló a partir de un patrón de As (V) (concentración patrón de arsénico:  $1000 \text{ mg As/L}$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  en  $\text{HNO}_3$   $0,5 \text{ MOL/L}$ ) de la empresa Merck y agua ultrapura (Milli\_Q) proveniente del laboratorio del INIQUI-CONICET.

En todos los ensayos experimentales la temperatura fue de  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  con humedad de  $69 \pm 5 \%$  y se filtró durante  $3 \text{ h}$ . En el estudio del efecto de la  $PTM$  en la remoción de As y en el flujo permeado, las presiones evaluadas fueron  $0,5$ ;  $1,0$  y  $1,3 \text{ kgf/cm}^2$  para membranas de AC y  $0,5$ ;  $1,0$ ;  $1,3$  y  $1,8 \text{ kgf/cm}^2$  para membranas de Ny, la velocidad de alimentación se mantuvo constante a  $21,6 \text{ cm/s}$ . Por otro lado, en el estudio de la influencia de la velocidad de alimentación en la remoción de As y en el flujo permeado, las velocidades evaluadas fueron  $10,8$ ;  $17,9$  y  $21,6 \text{ cm/s}$ , y la  $PTM$  fue de  $1,3 \text{ kgf/cm}^2$ , en todos los casos.

En cada experiencia, se tomaron muestras de alimentación y permeado a las  $3 \text{ h}$ , para posterior determinación del contenido de As utilizando un Kit de campo provisto de la empresa Merk que permite determinar

concentración de As en agua en un rango de 0 a 0,50 mg As/L.

La eficiencia de remoción de As se evaluó mediante el rechazo observado ( $R_{obs}$ ), definido como la fracción de soluto retenida por la membrana, para una dada concentración de alimentación (Baker, 2004), según la siguiente ecuación:

$$R_{obs}(\%) = \frac{(C_a - C_p)}{C_a} \times 100 \quad (5)$$

Donde  $C_a$  (% p/p) es la concentración de As en la alimentación y  $C_p$  (% p/p) es la concentración de As en el permeado, recolectado al final del ensayo.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Caracterización de las membranas sintetizadas

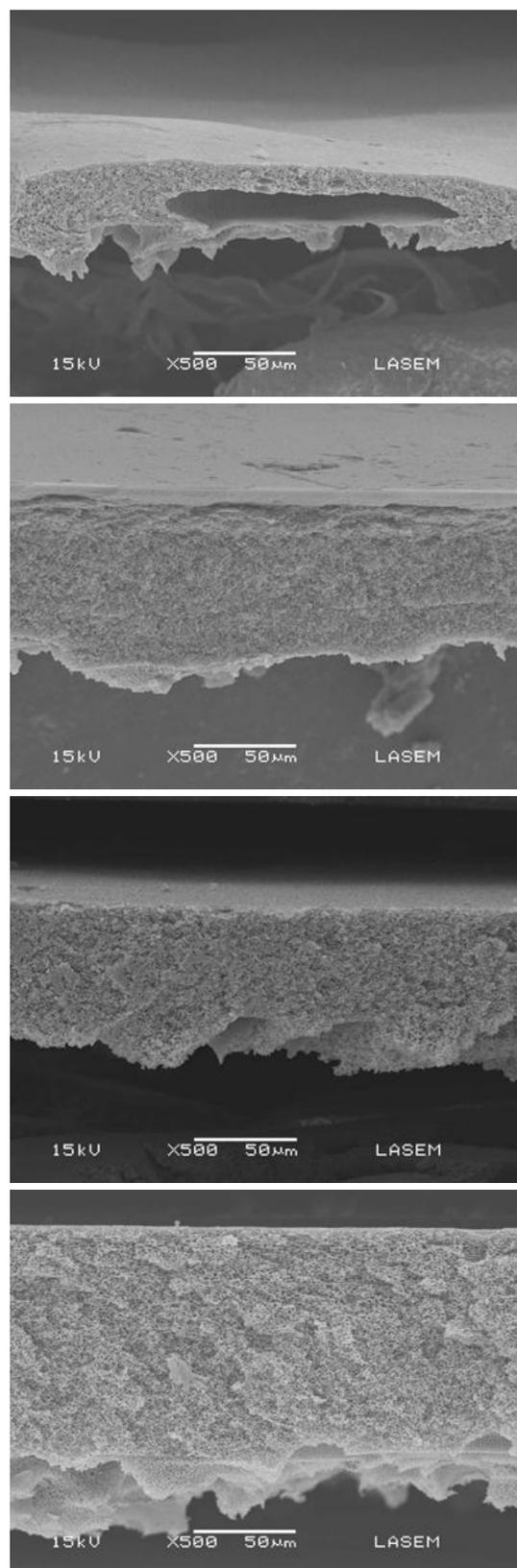
El incremento de la concentración de polímero en las soluciones poliméricas, tanto de Acetato de celulosa como de Nylon produce un aumento en la densidad y viscosidad del film extendido, lo cual incrementa la resistencia al transporte difusivo de solvente y no-solvente y, por lo tanto, retarda la separación líquido – líquido en la subcapa del film polimérico (Baker, 2004). Esto conduce a la formación de membranas con una piel densa de mayor espesor a medida que se incrementa la concentración de polímero en la solución polimérica. Al mismo tiempo, produce un incremento en el espesor de membrana (Tabla 1).

**TABLA 1:** PERMEABILIDAD HIDRÁULICA Y ESPESOR DE LAS MEMBRANAS (ELABORACIÓN PROPIA).

Membrana	Permeabilidad hidráulica (L.cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> .h.kgf)	Espesor (μm)
AC-A-18-30	32.5	57.5 ± 3.4
AC-A-25-90	38.1	64.5 ± 3.1
AC-A:F-15-0	59.9	71.2 ± 3.2
AC-A:F-18-0	33.8	80.5 ± 1.5
AC-A:F-18-90	10.1	79.0 ± 2.1
Ny-HCl-17-90	2.65	313.5 ± 4.2

Las membranas que presentan una morfología asimétrica con una piel densa definida y una sub-estructura porosa sin macroporos son, por lo general, adecuadas para los PSM impulsados por gradientes de presión. El observar el corte transversal de las membranas en el MEB (Fig. 2). Se confirmó que alguna de las membranas presentaban macroporos (AC-A-18-30), mientras que otras tenían una estructura morfológica compuesta por una piel densa y una subcapa porosa homogénea con ausencia de macroporos (AC-A:F-18-30). La estructura de la membrana está íntimamente relacionada con la permeabilidad hidráulica al agua pura de la misma y por lo tanto con el CAE, con el volumen de huecos o poros y por lo tanto con la porosidad (Baker, 2004). Un mayor número de poros incrementa la permeabilidad y los poros de menor tamaño, aumentan la selectividad de la membrana (Krishnamoorthy *et al.*, 2011). Por eso es importante tener presente estos parámetros característicos cuando se realiza la selección de las

membranas más adecuadas para cada aplicación en particular.

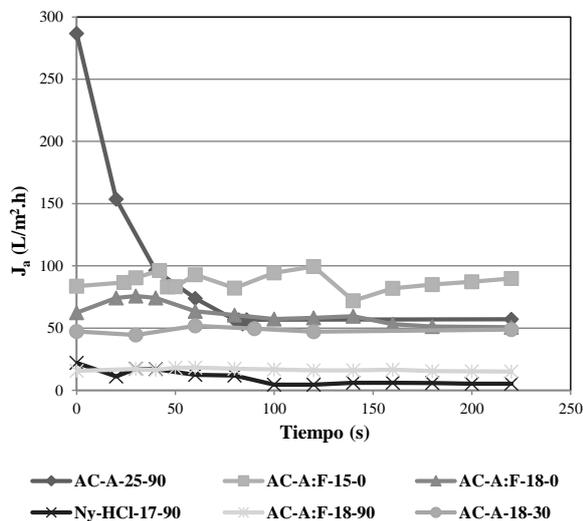


**Fig. 2:** Imágenes obtenidas en el MEB del corte transversal de las membranas sintetizadas en el laboratorio (a) AC-A-18-30; b) AC-A:F-18-30; c) Ny-HCl-10-30 y d) Ny-HCl-17-90). Fuente: elaboración propia.

**Ensayos de filtración**

Debido a la estructura de las membranas fabricadas, es necesario someterlas a una etapa de compactación. Esta etapa tiene por finalidad minimizar las variaciones en las propiedades de transporte con el tiempo de operación, reorganiza las cadenas poliméricas y por lo tanto, produce cambios irreversibles en la estructura morfológica, lo cual reduce el volumen libre y disminuye la porosidad de la membrana (Sajitha et al., 2002; Sivakumar et al., 2006).

Durante la compactación, se pudo observar que alguna de las membranas sintetizadas prácticamente no permeaban, debido principalmente a su estructura morfológica. Otras presentaban flujos permeados muy altos debido probablemente a fisuras o ruptura de la membrana. En términos generales, las membranas mostraron un comportamiento similar (Fig. 3). Durante los primeros minutos del ensayo, se observó una caída más pronunciada del flujo permeado de agua pura; la cual disminuye con el tiempo hasta alcanzar un valor prácticamente constante  $J_a$ .



**Fig. 3:** Evolución temporal del flujo permeado de agua ultrapura (Milli\_Q), durante la compactación. (PTM: 1,5 kgf/cm<sup>2</sup> para AC; PTM: 2 kgf/cm<sup>2</sup> para Ny; velocidad de alimentación: 21,6 cm/s; temperatura: 21±2°C). Fuente: elaboración propia.

Se observa claramente la dependencia que existe entre la concentración de AC y el  $J_a$ , a medida que aumenta la concentración de polímero el  $J_a$  es menor. Esto se atribuye principalmente al mayor espesor de la membrana que ésta directamente relacionada con sus propiedades de transporte (Baker, 2004).

Los resultados obtenidos mostraron claramente que la presencia de formamida en la mezcla de solvente produce una disminución en los valores de  $J_a$ . Este solvente, no solo retarda el mecanismo de formación de la membrana, sino que también reduce el tamaño de los poros de la subcapa de la membrana. Esto se atribuye a la presencia de una piel densa en la superficie de la membrana y a la baja velocidad de intercambio entre solvente y no-solvente en el baño de coagulación, lo cual trae aparejado un reordenamiento de las cadenas poliméricas produciendo una disminución de la permeabilidad hidráulica de esta serie de membranas.

Con respecto a la membrana de Nylon, no fue posible realizar una comparación entre distintas concentraciones, dado que se realizó un ensayo de compactación y permeabilidad a distintas PTM. Sin embargo, si se compara con las membranas de Acetato, (Fig. 3), puede verse claramente que el flujo permeado es mucho más bajo, atribuido al mayor espesor de la membrana de Nylon (Tabla 1).

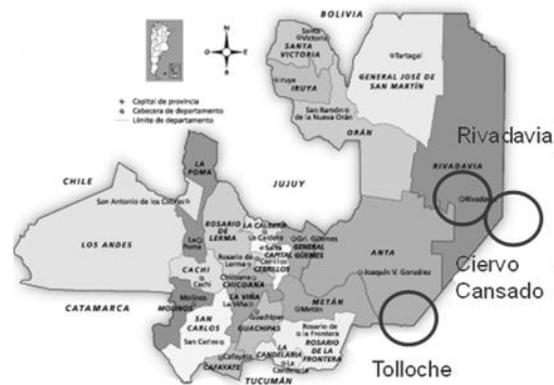
**Caracterización de la solución de alimentación**

La concentración de As en la solución de alimentación (0,150 mg As/L), fue seleccionada a partir de la caracterización físico-química de diversas aguas contaminadas naturalmente con As en la Provincia de Salta, según información proporcionada por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Salta (Tabla 2). Como se puede observar, estas zonas se caracterizan por tener elevadas concentraciones de As en agua. Excediendo, en todos los casos, el límite máximo permitido por la OMS.

**TABLA 2:** CONCENTRACIÓN DE AS DE AGUAS CONTAMINADAS NATURALMENTE EN TRES LOCALIDADES DE LA PROVINCIA DE SALTA (ELABORACIÓN PROPIA).

Localidad	Concentración de As en agua (mg As/L)
Toloché (Anta)	0.13
Rivadavia	0.56
Ciervo Cansado (Rivadavia)	0.28

En la Fig. 4, se señala la ubicación geográfica de las localidades identificadas en la provincia de Salta que poseen aguas para consumo humano con alto contenido de As.

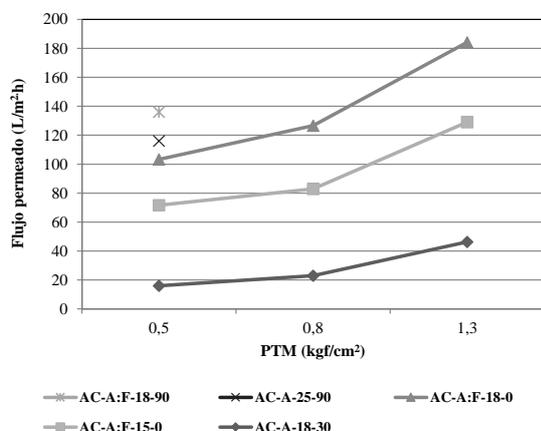


**Fig. 4:** Ubicación geográfica de puntos de interés de la provincia de Salta que poseen agua con alto contenido de As. Fuente: elaboración propia.

**Ensayos de filtración con agua contaminada con arsénico**

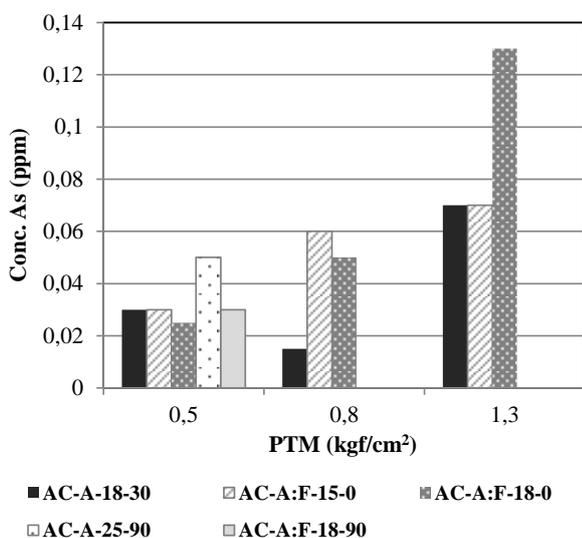
Las membranas tanto de Acetato de celulosa (Fig. 5) como Nylon mostraron una relación lineal entre el flujo permeado y la PTM, lo cual era de esperar. Se observó que el flujo permeado aumenta con el incremento de la PTM. Por otro lado, se obtuvo para una misma presión transmembrana un menor incremento del flujo permeado para la membrana AC-A-18-30 y un flujo permeado mayor para AC-A:F-18-0. Este hecho puede deberse a la estructura

de la membrana y probablemente a la mayor retención de sólidos en la capa superficial de la misma. Así mismo, la membrana de Ny-HCl-17-90 presentó un flujo permeado mucho menor a una presión mayor que las membranas de AC dado el espesor de la misma y el tamaño de los poros.



**Fig. 5:** Efecto de la *PTM* en el flujo permeado para las membranas de Acetato de celulosa (velocidad de alimentación: 21.6 cm/s; temperatura  $21\pm 3^\circ\text{C}$ ). Fuente: elaboración propia.

Al analizar el rechazo de As que presentan las membranas fabricadas, se observó (Fig. 6) que la membrana que posee un mayor flujo permeado (AC-A:F-18-0) a una misma presión ( $PTM = 0,8 \text{ kgf/cm}^2$ ) posee un rechazo de As más bajo (77%), mientras que la membrana AC-A-18-30 tuvo el mayor rechazo de As (90%) y la membrana de AC-A:F-18-90 un rechazo de 80% para una  $PTM = 0,5 \text{ kgf/cm}^2$ . En cuanto a la membrana de Nylon (Ny-HCl-17-90) presentó un rechazo de As alto con una concentración de As en la muestra a  $PTM = 1,8 \text{ kgf/cm}^2$  y velocidad de alimentación 21,6 cm/s de 83,3%. Si bien la retención alcanzada por la membrana de Nylon es alta pero el flujo de permeado es muy bajo. Efectivamente se observa que existe un compromiso entre la presión aplicada y el rechazo de As obtenido para las distintas membranas fabricadas.



**Fig. 6:** Efecto de la *PTM* en la remoción de As, para las membranas de Acetato de celulosa (velocidad de alimentación: 21.6 cm/s; temperatura  $21\pm 3^\circ\text{C}$ ). Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FUTURAS

Luego de realizar la síntesis de diversas membranas de acetato de celulosa y nylon utilizando distintos solventes y condiciones de fabricación, se logró estudiar la permeabilidad y la eficiencia de remoción de As de agua sintética en los rangos de UF y NF. El desempeño de las membranas mostró una dependencia con las condiciones de operación, especialmente la presión transmembrana, así como las condiciones de síntesis, concentración de soluto y tiempo de evaporación a la atmósfera. Tanto para la serie de membranas de Acetato de celulosa-Acetona como Acetato de celulosa - Acetona:Formamida se observó que un incremento de la *PTM* aumenta el flujo permeado y modifica el rechazo de As. Para las membranas de nylon no fue posible establecer una comparación entre mismo polímero dado que únicamente se pudo realizar la permeabilidad para la membrana Ny-HCl-17-90, sin embargo frente a las membranas de acetato de celulosa presentó un alto rechazo de As pero baja permeabilidad.

Los resultados permitieron concluir que la membrana con mejores características para ser utilizada en el proceso de separación con membranas es la AC-A:F-18-90, ya que presenta mayor flujo permeado, menor resistencia total al flujo de permeado y una concentración de As en la corriente de permeado por debajo del valor establecido por la Organización Mundial de la Salud. Sin embargo es conveniente realizar ensayos complementarios para evaluar el desempeño de las membranas para otros rangos de *PTM*, velocidad de alimentación y diferentes iones presentes en la matriz acuosa.

Este trabajo experimental abrió una serie de futuras investigaciones en lo que respecta a la síntesis de membranas utilizando otros polímeros, otras condiciones de fabricación y diversas condiciones de operación del sistema de filtración. Así como la evaluación del desempeño de las membranas utilizando aguas contaminadas naturalmente con As.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA) (Proyecto A N° 2146/0 y Proyecto C N° 2441), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), a la Facultad de Ingeniería y a la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Salta. Al Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) por la beca EVC3-UNSA3046 otorgada a la Srta. Nazarena Sastre Moya.

## REFERENCIAS

- [1] Arthanareeswaran G., Mohan D., Raajenthiren P., (2010), "Preparation, characterization and performance studies of ultrafiltration membranes with polymeric additive", *Journal of Membrane Science*, 350, 130-138.
- [2] Baker R.W. (2004). *Membrane Technology and Applications*, John Wiley & Sons, Ltd. Menlo Park, California.
- [3] Bundschuh J., Litter M.I., Nicoli H.B., Hoinkis J., Bhattacharya P., (2010). "Identifying occurrences of groundwater arsenic in Latin America: A continent wide problem and challenge", *Arsenic in Geosphere and Human Disease; Page Proceedings of Arsenic in*

*the Environment Conference in Taiwan*, London: Tyler and Francis Group, 512–516.

- [4] Krishnamoorthy L., Arif P., Ahmedkhan R., (2011), “Separation of proteins from aqueous solution using cellulose acetate/poly (vinyl chloride) blend ultrafiltration membrane”, *Journal of Materials Science*, 46, 2914-2921.
- [5] Litter M.I. (2011). “La problemática del arsénico en la Argentina: el HACRE”. Comisión Nacional de Energía Atómica, Unidad de Actividad Química, Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, Universidad de General San Martín, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.[Disponible en: <http://www.unsam.edu.ar>]. [Último acceso: 30 de Marzo de 2011].
- [6] Mulder M. (1996). *Basic Principles of Membrane Technology*, Second Edition Springer, Netherlands.
- [7] Murphy D., de Pinho M.N., (1995), “An ATR-FTIR study of water in cellulose acetate membranes prepared by phase inversion”, *Journal of Membrane Science*, 106, 245-257.
- [8] Nguyen C.M., Bang S., Cho J., Kim K.W., (2009), “Performance and mechanism of arsenic removal from water by a nanofiltration membrane”, *Desalination*, 245, 82-94.
- [9] Palacio L., Prádanos P., Calvo J.L., Hernández A., (1999). “Porosity measurements by a gas penetration method and other techniques applied to membrane characterization”, *Thin Solid Films*, 348, 22-29.
- [10] Sajitha C.J., Mahendran R., Mohan D., (2002), “Studies on cellulose acetate-carboxylated polysulfone blend ultrafiltration membranes - Part I”, *European Polymer Journal*, 38, 2507-2511.
- [11] Sato Y., Kang M., Kamei T., Magara Y., (2002). “Performance of nanofiltration for arsenic removal”, *Water Research*, 36, 3371-3377.
- [12] Sivakumar M, Mohan D.R., Rangarajan R., (2006), “Studies on cellulose acetate-polysulfone ultrafiltration membranes: II. Effect of additive concentration”, *Journal of Membrane Science*, 268, 208-219.
- [13] Smedly P. y Kinniburgh A. (2002), “A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters”, *Applied Geochemistry*, 23, 617-624.
- [14] Tamure M., Uragami T., Sugihara M., (1981), “Studies on syntheses and permeabilities of special polymer membranes: 30. Ultrafiltration and dialysis characteristics of cellulose nitrate-poly (vinyl pyrrolidone) polymer blend membranes”, *Polymer*, 22, 829-835.