

Ensayos preliminares de microfiltración directa para potabilización de aguas superficiales en la Sabana de Bogotá

María Isabel Prieto P.

Estudiante Maestría. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes.

Ana Isabel Carrillo R.

Estudiante Pregrado Ingeniería Ambiental. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Manuel S. Rodríguez Susa

Profesor Asistente. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental GIIA, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Recibido 10 de septiembre de 2005, aprobado 31 de octubre de 2005

PALABRAS CLAVES: Potabilización, membranas, microfiltración.

KEYWORDS: Drinking water, membranes, microfiltration.

RESUMEN Un sistema de microfiltración a escala laboratorio fue estudiado como alternativa de potabilización para el agua de tres diferentes embalses de la Sabana de Bogotá, Colombia. El desempeño del sistema fue evaluado basándose en la eficiencia de eliminación de parámetros clásicos, en el comportamiento del flujo de permeado y en el grado de recuperación del flujo después de la limpieza de la membrana. Ensayos adicionales fueron realizados adicionando CAP al agua de alimentación. Valores de presión de trabajo más bajos resultaron en velocidades de ensuciamiento menores y la adición de CAP redujo la tendencia al ensuciamiento irreversible de la membrana. El sistema de microfiltración directa es una alternativa potencial para la potabilización de agua superficial, pero estudios más profundos son indispensables para corroborar a largo término la idoneidad del proceso.

ABSTRACT A microfiltration lab-scale system was studied as alternative to water purification of three reservoirs from the Sabana of Bogotá, Colombia. The system performance was evaluated based on the efficiency of classic parameters elimination, the flux behavior and the degree of flux recovery after membrane cleaning. Additional tests were made adding CAP to the feeding water. Lower work pressures lead to lower fouling membrane rates and the CAP addition reduced the irreversible fouling. Direct microfiltration system is a potential alternative for superficial water purification, but deeper studies are required to corroborate the process suitability to long term.

INTRODUCCIÓN

La totalidad de los sistemas municipales de tratamiento de potabilización con los que cuenta el país, incluyendo los instalados para el suministro de agua en la ciudad de Bogotá, están conformados por trenes clásicos de tratamiento, constituidos globalmente por etapas de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Si bien este tipo de sistemas, históricamente, ha demostrado ser eficiente en el tratamiento de aguas superficiales, la alta demanda de cloro en los procesos de desinfección puede conducir a altos niveles de potencial de formación de subproductos de desinfección (SPD), los cuales pueden tener efectos nocivos sobre los consumidores (Berubé et al. 2002). Además en los últimos años se han encontrado organismos patógenos cada vez más resistentes a los procesos de desinfección clásica y la presencia de contaminantes que no son removidos de forma eficiente por los sistemas clásicos de tratamiento, como algunas sustancias orgánicas disruptoras del sistema endocrino (DSE).

A raíz de la normatividad, que cada vez es más estricta en cuanto a la eliminación de partículas y microorganismos, así como el interés de minimizar el uso de productos químicos en el tratamiento de aguas, la tecnología de microfiltración (MF) aparece como una alternativa tecnológica para la potabilización de aguas superficiales y su uso ha venido creciendo considerablemente. La gran mayoría de nuevos proyectos de sistemas de potabilización en países de Europa y Norte América utilizan procesos por membranas para potabilización de agua en grandes comunidades (Berubé et al. 2002; AWWA, 1998).

Las membranas de MF actúan como una barrera selectiva al transporte de material particulado principalmente y en cierto grado de material disuelto que se encuentra presente en aguas naturales, logrando remover microorganismos (bacterias), sólidos suspendidos, material inorgánico y parcialmente materia orgánica, sin el requerimiento de aditivos. El grado de remoción de estas diferentes sustancias depende de las propiedades de los mismos, así como

de las características de la membrana (Amy, 1999; AWWA, 1999; Van der Bruggen, 2003). El uso de membranas de MF en la potabilización de agua ha crecido rápidamente debido a su buen desempeño como proceso de desinfección sin adición de agentes oxidantes, dejando la adición de cloro residual como único proceso de cloración, disminuyendo así el potencial de formación de SPD (Amy, 1999; Van der Bruggen, 2003).

El presente estudio evaluó a escala de laboratorio la aplicación de un sistema de MF directa en un sistema de membrana inmersa, para potabilizar agua superficial proveniente de los embalses San Rafael, El Sisga y El Neusa de la Sabana de Bogotá, Colombia; con el objeto de determinar la viabilidad técnica de este tipo de tecnología para la obtención de agua potable a nivel de Bogotá y para realizar una evaluación preliminar de algunos parámetros típicos de este tipo de procesos.

MICROFILTRACIÓN

Los procesos de membranas de MF utilizan la presión como fuerza motriz para hacer pasar el agua a través de la membrana, reteniendo contaminantes con tamaño de partícula superior al tamaño nominal de poro de la membrana. Para una membrana limpia, el flujo de permeado esta dado por la ley D'Arcy modificada:

$$J = \frac{\Delta P - \sigma_k \Delta \Pi}{\mu R_m} \quad (1)$$

donde

ΔP , es la caída de presión a través de la membrana o presión transmembranal (PTM)

μ , es la viscosidad del permeado

R_m , es la resistencia hidráulica de la membrana limpia

σ_k , es una constante empírica

$\Delta \Pi$, es el cambio de la presión osmótica a través de la membrana, la cual es inversamente proporcional al peso molecular de las especies rechazadas

Las membranas de MF rechazan especies macromoleculares y coloidales principalmente, luego la corrección por presión osmótica puede ser despreciable para este tipo de membranas (Amy, 1999; Zhang, 2000). Cuando el agua pura es filtrada, el flujo de permeado crece linealmente con la presión aplicada. Sin embargo, en el momento en que se filtra agua con especies particuladas y/o disueltas, estas especies son retenidas por la membrana acumulándose cerca, sobre y en el interior de ésta, *ensuciando* la membrana. El efecto de esta acumulación de materiales es una reducción en la permeabilidad, debido a la formación de capas que oponen resistencia adicional al paso del flujo; luego, el valor de R_m en (1) se transforma en un valor de resistencia total, R_t , la cual involucra no sólo la resistencia propia de la membrana sino también la resistencia al flujo generada por los contaminantes retenidos por la membrana.

$$(2) \quad J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_f)} = \frac{\Delta P}{\mu R_t}$$

Existen dos diferentes tipos de ensuciamiento en un sistema de filtración por membrana, los cuales están ligados al tipo de limpieza escogido para el proceso. El ensuciamiento reversible es aquel que está asociado a mecanismos de separación física, cuyos materiales forman una *torta* sobre la membrana. La magnitud de la resistencia específica para una capa de torta incompresible y con diámetro de partícula uniforme se expresa mediante la ecuación de Carman-Kozeny:

$$(3) \quad \hat{R}_c = \frac{180(1 - \epsilon_c)^2}{d_p^2 \epsilon_c^3}$$

donde

d_p , es el diámetro de la partícula

ϵ_c , es la porosidad de la torta

La resistencia a la filtración de esta torta es el producto de esta resistencia específica multiplicada por su espesor (δ_c) (Amy, 1999). Este tipo de ensuciamiento logra ser removido por métodos de limpieza

mecánicos, como retrolavado, aireación cerca de la membrana y lavado. El ensuciamiento irreversible es causado por la adsorción de materiales en los poros o en la superficie de la membrana y por el depósito de sólidos difíciles de eliminar. Uno de los principales responsables de este tipo de ensuciamiento es la materia orgánica natural (MON), presente en las fuentes superficiales de agua. Este ensuciamiento no logra ser removido por métodos mecánicos por lo que una limpieza química de la membrana es requerida (AWWA, 2003; Carrillo, 2004). La formación de la capa de torta y el ensuciamiento adsorptivo son las dos principales causas por las que el flujo de permeado disminuye con el paso del tiempo en los procesos de MF.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ensayos en el laboratorio fueron realizados con tres diferentes tipos de agua superficial para cuantificar la eficiencia de remoción de diferentes parámetros de calidad del agua, así que como para observar el comportamiento del proceso de microfiltración directa en un sistema de membrana inmersa, en cuanto a variación de flujo en función del tiempo, tasa de ensuciamiento y recuperación del flujo por limpieza mecánica (retrolavado) y limpieza química. Se evaluó adicionalmente la adición de carbón activado en polvo (CAP) como tratamiento para remoción de material orgánico natural y su efecto en el comportamiento del sistema de filtración.

AGUA DE ALIMENTACIÓN

Muestras de agua de los embalses San Rafael (SR), El Sisga (ES) y El Neusa (EN) fueron tomadas para realizar los ensayos de filtración. La Tabla 1 presenta las características del agua de alimentación. La temperatura del agua para los ensayos en laboratorio varió entre 8 y 13 °C.

Parámetro	Unidad	SR	ES	EN
Coliformes totales	NMP/100mL	23	210	4
Color	UPC	10	25	10
COT	mg C/L	3.5	4.3	4.2
SST	mg/L	6	11	3
Turbiedad	NTU	2.39	4.50	1.82

Tabla 1. Calidad del agua de alimentación

Estos parámetros fueron medidos para una sola

muestra de cada tipo de agua. El método de análisis para los parámetros medidos se realizó siguiendo métodos estándar (Standard Methods, 1995).

MONTAJE EXPERIMENTAL

El sistema consistió en una membrana de microfiltración de fibra hueca de polisulfona (POLYMEM SA® – Toulouse, Francia), con diámetro de poro de $0.2\ \mu\text{m}$ y área de $0.5\ \text{m}^2$, la cual se encontraba inmersa en un reactor con un volumen de 38 L. La membrana operó en succión (externo-interno) utilizando una bomba peristáltica (Masterflex®, Cole-Parmer®). Un vacuómetro permitió conocer en todo momento la presión de trabajo, y el volumen de permeado se almacenó en un recipiente de 4.5 L. Para los ensayos donde se adicionó CAP, un agitador fue introducido en el reactor de membrana inmersa para garantizar mezcla completa. El esquema del sistema de membrana inmersa es presentado en la Figura 1.

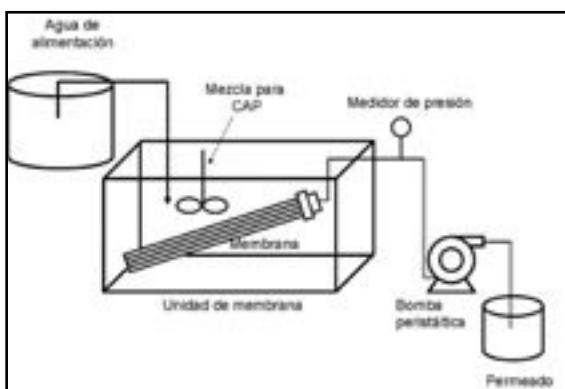


Figura 1. Diagrama sistema de MF

Se midió la permeabilidad y la resistencia inicial de la membrana filtrando a través de ella agua desionizada y microfiltrada ($0.22\ \mu\text{m}$) a diferentes presiones. Para los ensayos con agua cruda, se determinó la presión de trabajo a la cual se debía operar el sistema. Para tal fin, se filtró agua incrementando el flujo de permeado y este valor se asoció a la

presión transmembranaria (PTM), trabajando en un rango de presión de succión entre 0.05 - 0.45 bar. A partir de este ensayo, se obtuvo un valor de presión próximo al valor para el cual la tasa de aumento del flujo fuera nulo o casi nulo (flujo límite). La presión de trabajo en los ensayos se tomó como un valor de presión ligeramente inferior al valor de flujo límite, el cual varió ligeramente dependiendo del tipo de agua a tratar.

Se realizaron pruebas de filtración en continuo con el agua cruda para observar la variación del flujo en función del tiempo trabajando a presión constante. El volumen de permeado se midió cada 10 minutos. Se trabajaron cuatro (4) ciclos de filtración, en intervalos de tiempo determinados por un porcentaje de reducción del flujo entre un 20 y 50% con respecto al valor de flujo inicial (J_0). El valor de la viscosidad en el cálculo del valor de la resistencia fue corregido de acuerdo a la temperatura del permeado.

Para los tres primeros ciclos de filtración, se realizó un retrolavado entre cada ciclo y previo al último ciclo se realizó la limpieza química de la membrana, filtrando 2.5 L de una solución básica de NaOH (4 g/L), seguido de 2.5 L de una solución de ácido oxálico (5 g/L). Se filtró el mismo volumen de agua desionizada después de filtrar cada una de las soluciones.

El retrolavado se realizó en un reactor diferente para evitar que el agua de retrolavado retornase al reactor de la membrana inmersa, y se realizó filtrando agua de permeado en sentido inverso al flujo de alimentación, a una presión entre 0.25 y 0.30 bar, durante 3 minutos.

Se realizaron análisis de color, turbiedad, coliformes totales, sólidos suspendidos totales y carbono orgánico total (COT) para el agua cruda y el agua filtrada por la membrana. La turbiedad y color del permeado fueron monitoreados cada 20 minutos en el proceso de filtración.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

VARIACIÓN DE FLUJO A DIFERENTES PRESIONES

El valor de permeabilidad inicial de la membrana fue igual a $306 \text{ L/m}^2\text{-h/bar}$. La resistencia de la membrana se calculó a partir de la ecuación 1, tomando el inverso de la pendiente de la recta que se presenta en la Figura 2 (agua desionizada). Este valor correspondió a $1.0 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$. La variación del flujo como función de la presión aplicada para los ensayos con las tres muestras de agua superficial se presenta en la Figura 2.

Para similares condiciones de operación, el agua del embalse SR presentó un efecto más colmatante (menor flujo a la misma presión) frente a los otros dos tipos de agua, aun cuando las concentraciones en COT y SST no son las más elevadas de los tres diferentes tipos de agua. Se observó un crecimiento lineal y un comportamiento bastante similar para los cuatro tipos de agua filtrados, para presiones entre 0.05 y 0.1 bar. A partir de 0.1 bar se observó una disminución en la tasa de crecimiento del flujo para las tres aguas crudas, la cual puede asociarse a la acumulación de los materiales cerca de la membrana.

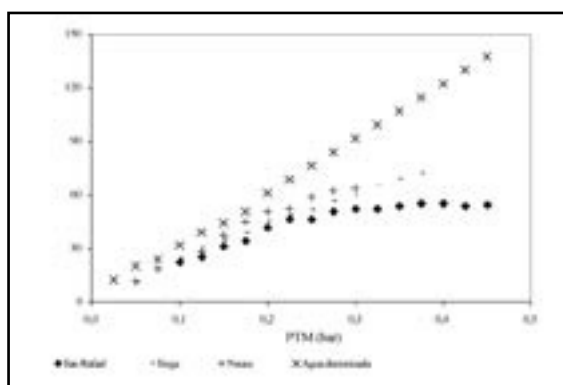


Figura 2. Flujo de permeado bajo diferentes presiones

VARIACIÓN DE FLUJO A PRESIÓN CONSTANTE

Los ensayos a presión constante para las tres diferentes muestras de agua se llevaron a cabo en períodos de 6 a 8 horas, con valores de flujo inicial entre 53 y $65 \text{ L/m}^2\text{-h}$, para presiones de trabajo entre 0.125 y 0.30 bar. Las Figuras 3, 4 y 5 muestran la variación

del flujo en función del tiempo de operación, para los tres diferentes tipos de agua cruda.

Figura 3. Variación del flujo en función del tiempo. San Rafael, $P = 0.3 \text{ bar}$.

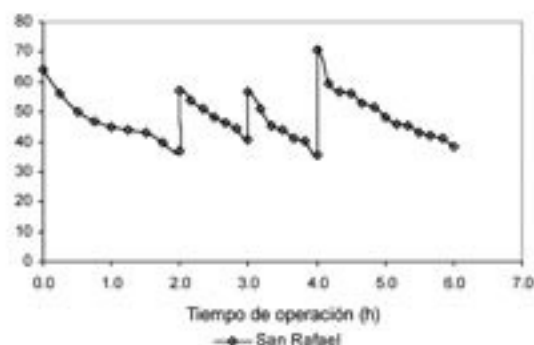
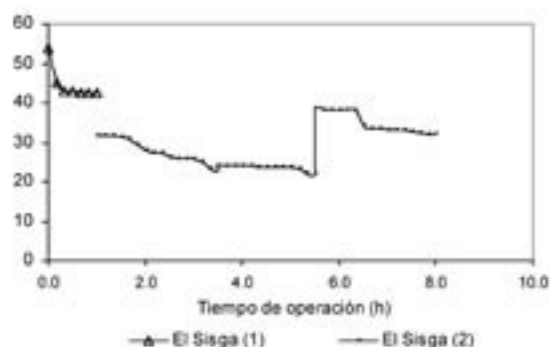


Figura 4. Variación del flujo en función del tiempo.



El Sisga (1), $P = 0.225 \text{ bar}$; El Sisga (2), $P = 0.125 \text{ bar}$.

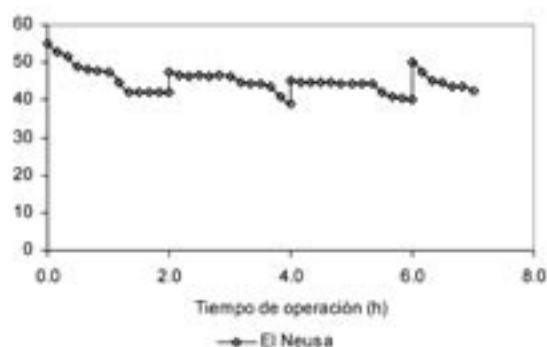


Figura 5. Variación del flujo en función del tiempo. El Neusa, $P = 0.175 \text{ bar}$.

Se observó una velocidad de ensuciamiento de la membrana bastante alta, asociada a una presión de trabajo mayor y más cercana a la presión a la cual se alcanzaron los valores de flujo límite. Trabajando a estas condiciones, se obtuvo una pérdida de productividad del sistema de hasta el 45%, en periodos de tiempo muy cortos. Para los casos donde la presión de trabajo fue menor, la velocidad de ensuciamiento se redujo considerablemente. Esta relación entre la velocidad de ensuciamiento y la PTM puede ser explicada por los fenómenos de capa de concentración de polarización y presión crítica.

El rango de recuperación por retrolavado varió entre 88 y 89% para el caso de SR, 75% para ES y entre 82 y 86% para EN. Acorde con estos valores, se puede sugerir un nivel de ensuciamiento irreversible mayor para el agua de ES en donde la recuperación de flujo por retrolavado fue menor. Esto puede estar relacionado con el contenido de material orgánico presente en el agua, que para este caso fue mayor. Con el fin de reducir la velocidad de ensuciamiento y por ende la frecuencia de limpieza, se realizaron nuevos ensayos utilizando valores de PTM comprendidos entre 0.03 - 0.10 bar.

RESISTENCIA Y ENSUCIAMIENTO DE LA MEMBRANA

Los valores de resistencia total a la filtración (R_t) que se obtuvieron para los primeros ensayos, tuvieron órdenes de magnitud de 10^{12} m^{-1} para los tres casos de estudio (Figura 6). El ensuciamiento reversible se determinó por la diferencia entre el flujo inicial y el flujo que se obtuvo después de cada retrolavado, mientras que el valor de flujo no recuperado por retrolavado se asoció al ensuciamiento irreversible de la membrana.

El agua cruda proveniente del embalse ES presentó un nivel de ensuciamiento irreversible mayor a lo largo del proceso de filtración, lo cual corrobora que este tipo de ensuciamiento fue causado principalmente por el alto contenido de materia orgánica natural (MON) presente en las aguas crudas. Las membranas de MF se caracterizan por tener un tamaño de poro mayor que casi todas las moléculas de MON; luego, su tendencia a ensuciarse por este tipo de material es resultado del rechazo por adsorción de estos compuestos por la membrana y no

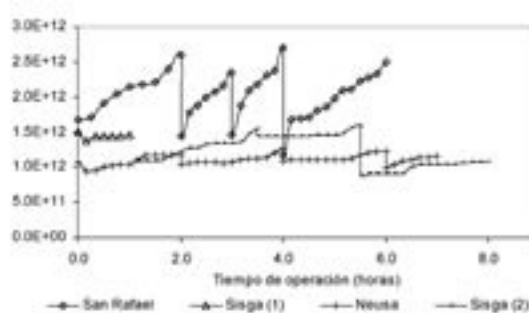


Figura 6. Resistencia total proporcionada por la membrana y materiales colmatantes

simplemente un rechazo por diferencia de tamaño (efecto de tamizado). Así mismo, las propiedades químicas de la membrana pueden tener efecto en qué tan propensos son los materiales a la adsorción sobre la membrana. Las membranas de polisulfona utilizadas son ligeramente hidrofóbicas, por lo tanto poseen una tendencia mayor a la adsorción de material orgánico, aspecto que pudo haber tenido efecto en la adsorción de los materiales sobre la membrana.

ENSAYOS A MENOR PRESIÓN

El valor de flujo inicial para estos ensayos estuvo comprendido entre 5 y 6 $\text{L}/\text{m}^2\text{-h}$, valor para el cual la presión de trabajo no superó los 0.03 bar. Para los tres diferentes tipos de agua cruda, se observó que la velocidad de ensuciamiento de la membrana disminuyó considerablemente, al igual que la resistencia total a la filtración (Figuras 7 y 8). Para ES y EN, se realizó un retrolavado de la membrana el cual logró una recuperación del flujo del 100%, a partir de lo cual se puede sugerir que existe una disminución importante en la tasa de ensuciamiento irreversible a presiones de trabajo menores. Por otra parte, el comportamiento del flujo de permeado en los tres tipos de agua fue bastante similar, sugiriendo que para un rango de presión lo suficientemente bajo, el flujo de permeado en cierto modo se hace relativamente independiente de la calidad del agua cruda.

GRANULOMETRÍA - RESISTENCIA POR FORMACIÓN DE TORTA

Se realizaron ensayos de granulometría láser con el objetivo de determinar la distribución de tamaño de partículas presentes en el agua cruda, que se depositaron sobre la superficie de la membrana. Se puede

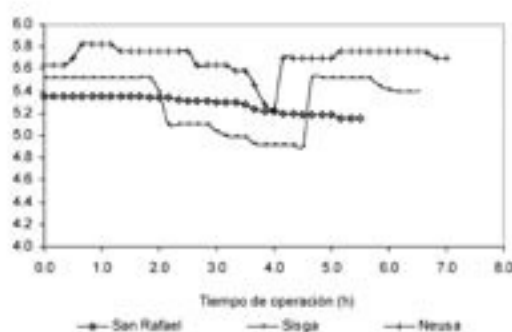


Figura 7. Variación del flujo en función del tiempo.
San Rafael, $J_0 = 5.35 \text{ L/m}^2\text{-h}$, $P = 0.025 \text{ bar}$; Sisga, $J_0 = 5.52 \text{ L/m}^2\text{-h}$,
 $P = 0.025 \text{ bar}$; Neusa $J_0 = 5.64 \text{ L/m}^2\text{-h}$, $P = 0.02 \text{ bar}$

observar en la figura 9 (SR) una distribución de tipo bimodal en el material suspendido en el agua cruda, con diámetros de partícula representativos de 6 y 20 μm respectivamente. Para ES el tamaño medio de partícula fue de 61 μm (Figura 10) y para el embalse del Neusa el diámetro medio fue de 51 μm (Figura 11). Si se asocian estos valores a la ecuación 3, se puede afirmar que para los casos donde el diámetro de partícula es menor, la magnitud de resistencia por torta puede tener un efecto mayor sobre la resistencia total a la filtración, lo cual puede explicar las altas velocidades de ensuciamiento en los ensayos realizados con el agua de SR, aún cuando el contenido de MON y de SST en esta agua fue de los más bajos de las tres fuentes de agua.

ADICIÓN DE CAP

La dosis de CAP aplicada en cada uno de los ensayos se determinó a partir de datos tomados de la literatura para casos de estudio con características de agua cruda similares. La Figura 12 presenta la variación del flujo en función de la presión en estos ensayos. Para estas condiciones de operación, el comportamiento de las curvas para las tres fuentes de agua fue muy similar a la curva para agua desionizada, lo cual evidencia el efecto positivo del CAP como alternativa de disminución del ensuciamiento de la membrana. En la figura 13 se observa un comportamiento del sistema más estable y cómo el ensuciamiento de la membrana se redujo considerablemente.

La eficiencia de los procesos de limpieza de la membrana, en este caso, estuvo comprendida entre el 90

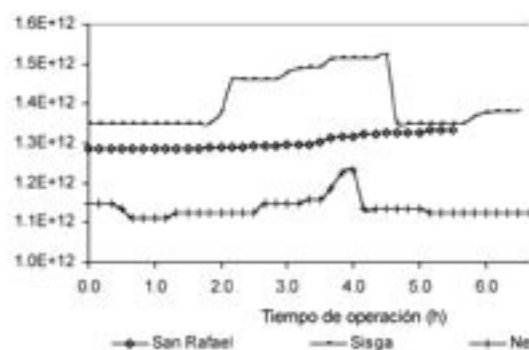


Figura 8. Resistencia total proporcionada por la membrana y materiales colmatantes

y el 100%, mostrando como la MON es adsorbida preferencialmente por el CAP y no por la superficie de la membrana.

CALIDAD DEL AGUA

Independientemente de las condiciones de operación del sistema, la turbiedad y el color del permeado siempre permanecieron inferiores a 0.15 NTU (unidades nefelométricas) y 5 UPC (unidades de platino-cobalto) respectivamente, valores de calidad superior a los obtenidos clásicamente en los sistemas convencionales de potabilización. En el caso de los coliformes y los SST el nivel de eliminación suministrado por la membrana fue del 100%, lo cual muestra cómo no es indispensable la adición de productos químicos en este tipo de procesos, para garantizar la desinfección bacteriana del agua tratada. La remoción de COT alcanzó niveles comprendidos entre el 35 y el 49%. La Tabla 2 resume los resultados de los parámetros de calidad del agua medidos en el permeado, los cuales son superiores a los valores medios de calidad de agua potable generada en trenes clásicos de tratamiento.

CONCLUSIONES

El proceso de microfiltración directa con membrana inmersa muestra ser una alternativa tecnológica importante en procesos de potabilización para las calidades de agua utilizadas en este estudio. Indistintamente de las condiciones de operación, la calidad del agua del permeado obtenido durante todo el trabajo experimental cumplió en todos los casos con la normatividad nacional.

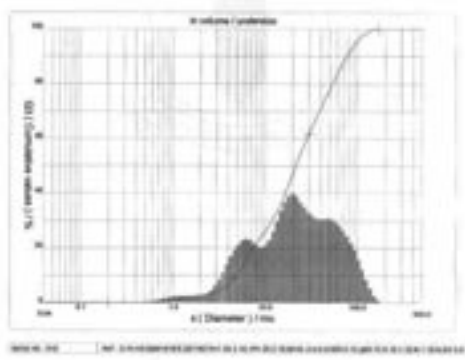


Figura 9. Granulometría San Rafael.

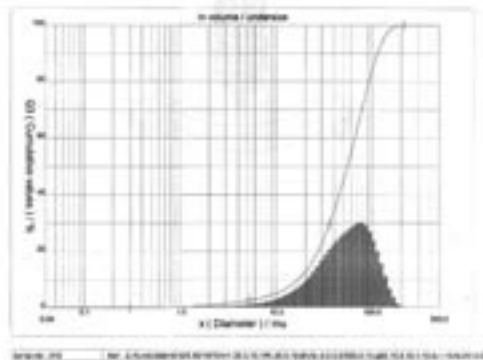


Figura 10. Granulometría El Siga.

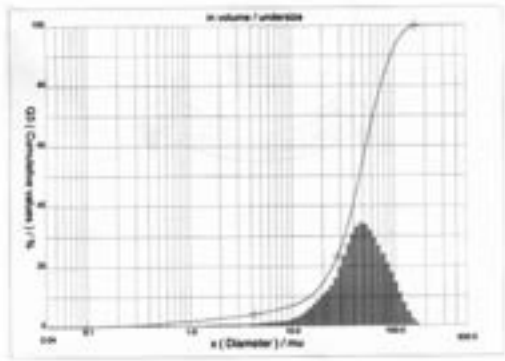


Figura 11. Granulometría El Neusa.

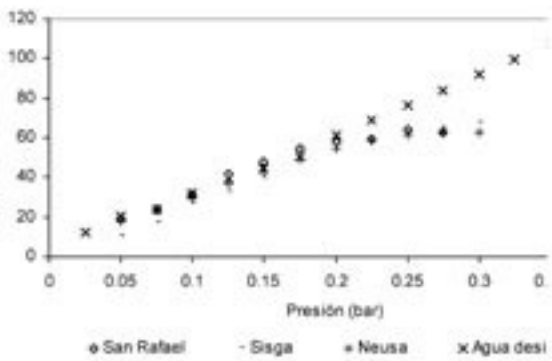


Figura 12. Flujo de permeado bajo diferentes presiones. Agua cruda con CAP. San Rafael, CAP = 25mg/L; Siga, CAP = 30mg/L; Neusa, PAC = 22 mg/L

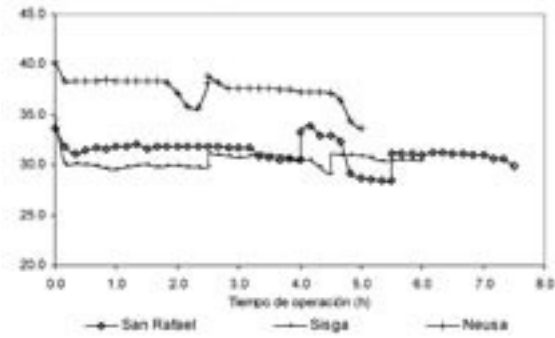


Figura 13. Variación del flujo en función del tiempo. SanRafael, P=0.125 bar, CO=3.48 mg C/L, CAP 25 mg/L; Siga P=0.125 bar, COT=4.33 mg C/L, CAP 30 mg/L; Neusa, P=0.15 bar, COT=4.2 mg/L, CAP 22 mg/L

Parámetro	Unidad	SR	ES	EN
Coliformes totales	NMP/100mL	0	0	0
Color	UPC	5	5	5
COT	mg C/L	3.1	2.2	2.7
SST	mg/L	<1	<1	<1
Turbiedad	NTU	0.08	0.11	0.09

Tabla 2. Calidad del agua del permeado

Se observó que valores de presión cercanos a la presión del flujo límite resultaron en velocidades altas de ensuciamiento de la membrana. Valores menores de presión resultaron en un comportamiento del sistema más estable. La adición de CAP en el agua de alimentación disminuyó la velocidad de ensuciamiento y redujo considerablemente el ensuciamiento irreversible de la membrana. Así mismo, la adición del CAP logró remociones mayores de materia orgánica natural, lo cual disminuye considerablemente el potencial de formación de SPD cuando se adiciona el cloro residual para el suministro del agua. Para corroborar a largo término la idoneidad de este proceso, es indispensable realizar estudios más profundos donde se puedan realizar monitoreos en lapsos de tiempo que permitan observar aspectos como el efecto en la variación en la calidad del agua de alimentación sobre el sistema. Es indispensable realizar estudios que permitan conocer mejor el tipo de sustancias involucradas en el ensucia-

miento de la membrana a fin de definir precisamente el tipo de limpieza requerida. Es importante determinar los costos asociados a consumo energético, así como costos asociados a químicos utilizados en la limpieza química de la membrana, para poder evaluar económicamente la viabilidad de implementación de este tipo de sistemas a escala municipal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Ambiental del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes, a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá E.S.P. (EAAB), a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), al Laboratorio de Aguas de la EAAB y al Laboratorio de Análisis e Investigación del Departamento de Química de la Universidad de los Andes, por su colaboración en el desarrollo de este trabajo.

GLOSARIO

CAP – Carbón Activado en Polvo.

Ensuciamiento – Fenómeno de taponamiento de la membrana, el cual puede estar asociado a sustancias orgánicas, inorgánicas y en algunos casos a microorganismos.

MON – Materia orgánica natural.

Permeado – Caudal por área unitaria de membrana que es generado en el proceso por membranas

PTM – Presión a través de la membrana.

SPD – Subproductos de la desinfección.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

Amy, G. & Cho, J. 1999.

“Interactions between natural organic matter (NOM) and membranes: rejection and fouling”.

En *Water science and technology* 40, pp. 131-139.

AWWA, 1998.

Tratamiento del agua por procesos de membrana. Procesos, principios y aplicaciones.

España. Mc-Graw Hill.

AWWA. 1999.

Water quality and treatment. A handbook of community water supplies.

McGraw Hill

AWWA. 2003.

“Committee report: Residuals management for low-pressure membranes”.

En *Journal AWWA* 95, pp. 68-82.

Berubé, P. Mavinic, D. Hall, E. Kenway, S. & Roett, K. 2002.

“Evaluation of adsorption and coagulation as membrane pretreatment steps for the removal of organic material and disinfection-by-product precursors”.

En *Journal of environmental engineering and science* 1, pp. 465-477.

Carrillo, A. 2004.

“Aplicación de un proceso de microfiltración directa para potabilización de agua en la sabana de Bogotá. Ensayos Preliminares”.

Universidad de los Andes.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (1995).

19th Ed, American Public Health Association / American Water Works Association / Water Environmental Federation. Washington D.C, USA.

Van der Bruggen, B., Van de Casteele, C., Van Gestel, T., Doyen W. & Leysen R. 2003.

“A review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production.”

En *Environmental progress* 22, pp. 46.

Zhang M. & Song, L. 2000.

“Pressure-dependent permeate flux in ultra- and microfiltration”.

En *Journal of environmental engineering* 126, pp. 667-674.