

## MICROFILTRACIÓN Y NANOFILTRACIÓN EN EL ÁREA DE AGUA POTABLE

**D. Mourato, Ph.D.**  
ZENON Environmental Inc.  
Burlington, Ontario, Canadá

### RESUMEN

En las fuentes, que se emplean para la provisión de agua potable, los sólidos pueden presentarse principalmente en tres formas: suspendidos, disueltos y en estado coloidal. La materia suspendida, que comúnmente se caracteriza por la turbiedad, puede ser removida mediante procesos de tratamiento más convencionales. El más común es la coagulación, seguida de filtración o clarificación y filtración. En este caso, por lo general, la dosis de coagulante es equivalente al nivel de turbiedad en la fuente.

La presencia de quistes y oocitos de *Cryptosporidium* y *Giardia*, así como otros parásitos en las fuentes de agua potable, ha iniciado un nuevo campo de aplicación para las membranas en el sector de agua potable. La ineficiencia de las plantas de filtración convencionales para filtrar y desinfectar estos agentes patógenos del agua potable ha obligado a los ingenieros a buscar nuevas tecnologías. Las membranas son la respuesta natural a estos problemas ya que son barreras absolutas para aquellos parásitos cuyo tamaño excede el tamaño del poro de la membrana.

Por lo general, los procesos de tratamiento convencionales no son muy efectivos cuando el color y el carbono orgánico total (COT) están presentes en altos niveles en el agua de alimentación. Debido a que las porciones coloidales y suspendidas de estos componentes son relativamente altas, no se pueden remover fácilmente mediante sedimentación y filtración por gravedad.

Finalmente, los altos niveles de hierro y manganeso en las aguas de pozo han sido difíciles de tratar con el método convencional de la arena verde. Por lo tanto,

estas aguas son buenas candidatas para plantas con tecnologías de membrana.

Las membranas de microfiltración (MF) y nanofiltración se están usando cada vez más en el campo del agua potable. En el caso de algunas aplicaciones, las membranas MF ya constituyen una tecnología comprobada. Esto incluye la remoción de quistes y oocitos de *Cryptosporidium* y *Giardia*, así como la remoción de la turbiedad mediante la microfiltración y el tratamiento de agua salobre o con color mediante la nanofiltración.

Las ventajas relacionadas con el uso de membranas en el tratamiento de agua potable son: poco requerimiento de energía, efecto de barrera absoluta para microorganismos, menor requerimiento de cloro para la desinfección, uso reducido de productos químicos (en caso se usen), menor tamaño de la planta. El tipo de membrana usado también tiene ciertas ventajas específicas.

Este documento presentará las aplicaciones típicas de ambos tipos de membranas en el área de agua potable. Los temas tratados aquí son:

- Remoción de turbiedad y parásitos mediante la microfiltración directa - desinfección mediante MF
- Remoción de Fe y Mn mediante la combinación de oxidación y microfiltración
- Remoción de color y COT mediante la combinación de coagulación mejorada con microfiltración
- Remoción de color y COT mediante la nanofiltración

## 1. Introducción

La filtración mediante membranas sigue el principio de la separación de partículas basada en el tamaño de los poros y en su distribución. Las membranas de microfiltración tienen tamaños de poro que varían de 0,075 micrones a 3 micrones. Según la membrana seleccionada, se podrán separar sólidos suspendidos de más de 0,45 micrones, bacterias, quistes y muchos otros parásitos cuyo diámetro sea mayor que el del poro más grande de la membrana. Las membranas de nanofiltración tienen tamaños de poro que varían de 0,005 micrones a 0,001 micrones y gracias a este pequeño diámetro del poro pueden remover moléculas de alto peso molecular tales como ácidos húmicos y ciertas sales. Esto permite



semipermeable. Este documento se centrará en membranas de filtración con flujo cruzado.

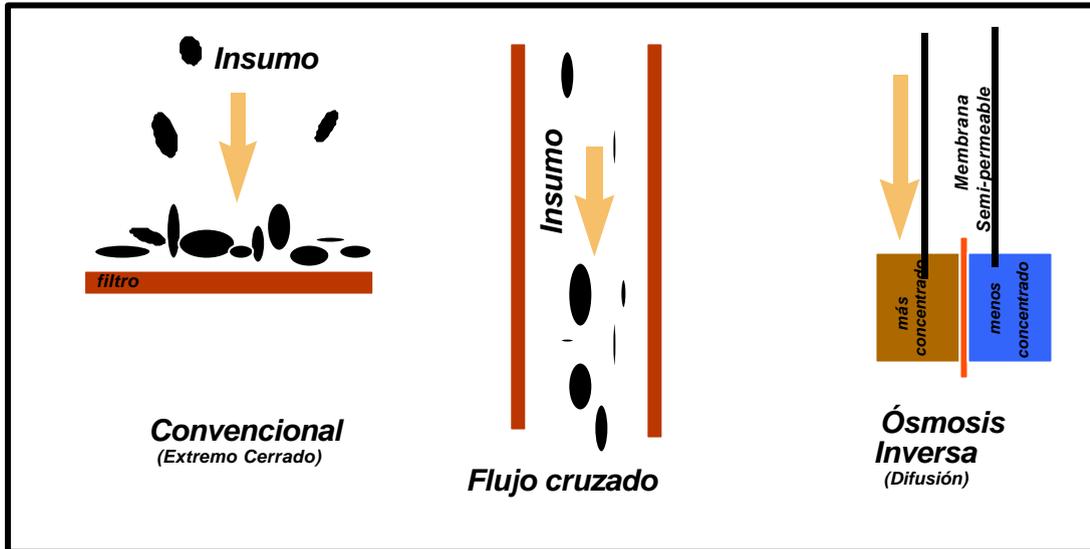


Figura 1. Modalidades de filtración

## 2. Tipos de membranas

### 2.1 Membranas a presión

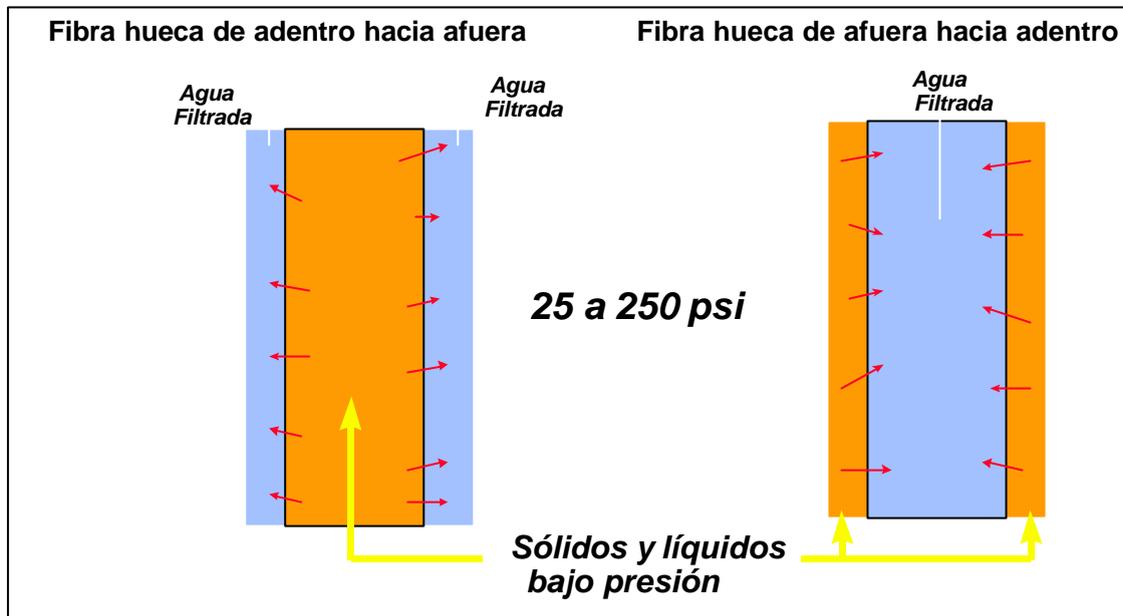
Las primeras membranas comercialmente disponibles estaban diseñadas como láminas planas enrolladas para formar membranas en espiral. Estas membranas no podían tolerar sólidos y requerían altas presiones para operar. El elevado costo operativo de estas membranas dio lugar a que fueran poco usadas para la microfiltración en aplicaciones municipales. Las membranas enrolladas en espiral generalmente se usan en la nanofiltración y ósmosis inversa, y por lo general se usan en la desalinización de agua salobre y agua de mar para la producción de agua potable.

Las membranas de fibra hueca se desarrollaron en la última década como un medio para abordar las necesidades de la microfiltración con bajos costos de consumo energético. Ellas rápidamente se convirtieron en el estándar de la industria y varias empresas empezaron a elaborar estas membranas de gran superficie para aplicarlas al área de agua potable.

Existen dos tipos de membranas de fibra hueca operadas a presión:

- membranas de adentro hacia afuera, en las que el afluente ingresa al interior del lumen de la membrana y el agua limpia se obtiene al pasar del interior de la membrana al exterior.

- membranas de afuera hacia adentro, en las que el afluente viene por fuera de la membrana y el agua limpia se obtiene al pasar del exterior de la membrana al interior (lumen).



**Figura 2. Modalidades de filtración - Membranas de fibra hueca**

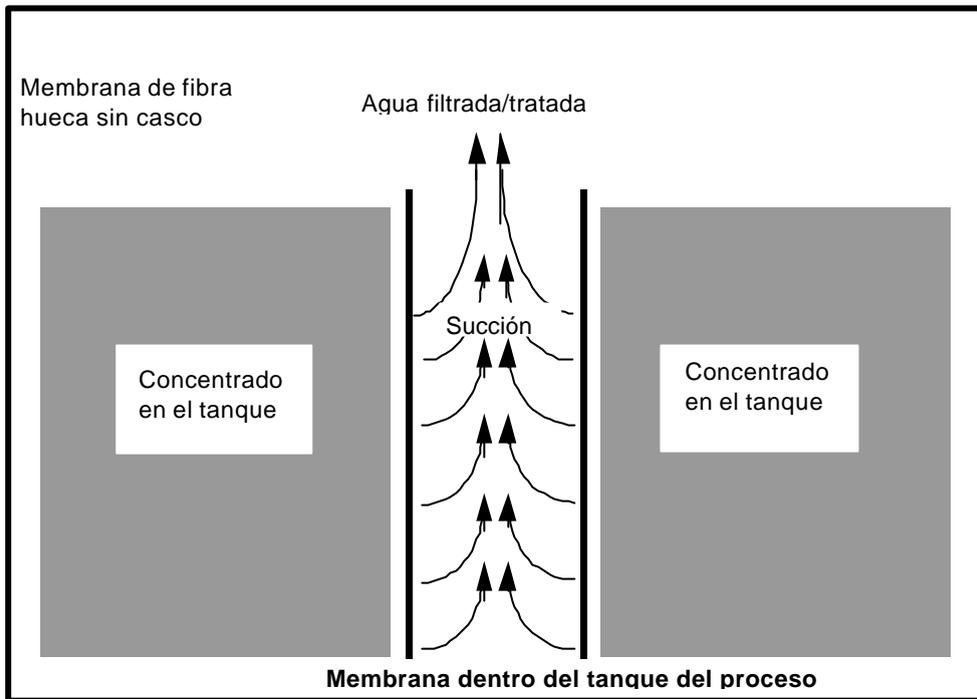
Todas las membranas de fibra hueca a presión están instaladas dentro de recipientes presurizados que sirven para aplicar la presión necesaria para la transferencia adecuada del fluido. La presión de operación típica de estas membranas es de 15 a 30 psi.

## **2.2 Membrana de fibra hueca operada al vacío – Membrana ZeeWeed™**

El proceso de tratamiento de agua potable basado en la membrana ZeeWeed™ es un proceso revolucionario que usa poca energía y consta de módulos de microfiltración con membranas de fibra hueca de afuera hacia adentro que se sumergen en el agua de alimentación. Este microfiltro tiene un tamaño de poro nominal de 0,085 micrones y un tamaño de poro absoluto de 0,2 micrones, lo cual asegura que no pasará al agua tratada ninguna partícula mayor a 0,2 micrones.

Las membranas operan bajo una succión pequeña creada dentro de las fibras huecas por una bomba de filtración. El agua tratada pasa a través de la membrana, entra a las fibras huecas y es bombeada para su distribución. Se introduce un flujo de aire en el fondo del módulo de la membrana para crear una turbulencia que frota y limpia el exterior de las fibras de la membrana y les permite funcionar a una tasa de flujo alta. Este aire también oxida el hierro y otros

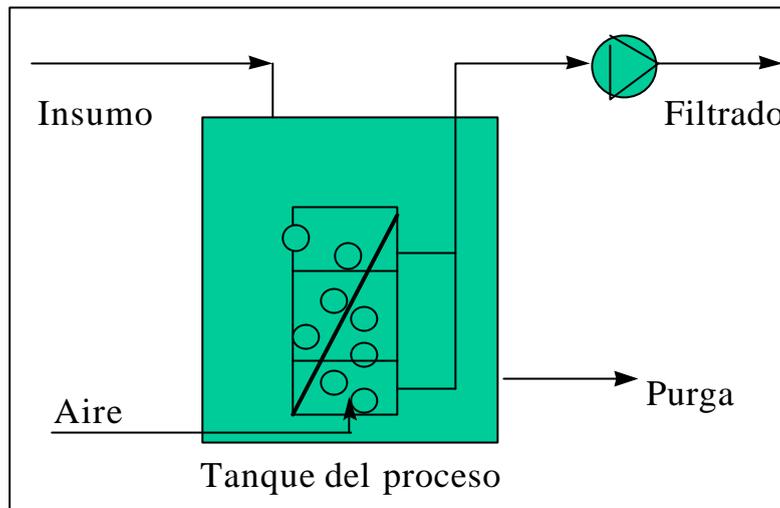
compuestos orgánicos, con lo que se obtiene agua de mejor calidad que la suministrada por sólo microfiltración



**Figura 3. Concepto operativo de una membrana de afuera hacia adentro sumergida sin casco**

En la medida que se usa una membrana de fibra hueca de afuera hacia adentro, la planta no necesita pretratamiento, aunque el agua de alimentación contenga arcillas y partículas finas. Por ello reemplaza, en un solo paso, la coagulación, floculación, clarificación y filtración de arena de las plantas convencionales y además elimina el pretratamiento requerido por las membranas espirales y las membranas de adentro hacia afuera.

Una planta de este tipo, consta de membranas sumergidas dentro del denominado tanque de proceso, desde donde fluye el agua hacia el interior de la membrana. El agua filtrada, ya limpia, es extraída por medio de una bomba. Un ventilador genera el aire requerido para mantener la membrana limpia. La planta no sólo es fácil de operar sino también fácil de ensamblar en pequeñas plantas que pueden instalarse en comunidades grandes o pequeñas. A continuación se presenta el diagrama de flujo de la planta.



**Figura 4. Diagrama de flujo de un microfiltro con membrana sumergida**

Además, la membrana sumergida de afuera hacia adentro ZeeWeed ofrece ventajas adicionales:

**Alto contenido de sólidos** - El flujo del agua en las membranas de afuera hacia adentro va desde fuera de la membrana hacia dentro de la fibra hueca, lo que significa que el interior sólo recibe agua limpia y microfiltrada. Por ello los sólidos, algas, arcillas y quistes removidos permanecen fuera de la membrana y nunca entran a ella, lo cual evita que la membrana se contamine y se obstruya. Esta característica evita el uso de la recirculación interna del filtrado para limpiar las membranas. Además, las membranas sumergidas no están instaladas dentro de los recipientes presurizados sino que están sumergidas dentro de los tanques del proceso. Por ello, son inmunes a la presencia de altos contenidos de sólidos en el tanque. Esto significa que, en las plantas de tratamiento de agua superficial, el rendimiento de la membrana es independiente de la turbiedad estacional del agua de alimentación y de niveles muy altos en el contenido de sólidos.

**Oxidación y volatilización de los contaminantes** – Debido a que el aire para limpiar la membrana se inyecta en el agua de alimentación, es posible reducir las sustancias orgánicas fácilmente oxidables y provocar la microprecipitación de ciertos metales como el hierro, además de remover las sustancias orgánicas volátiles y el  $H_2S$ . De esta manera se produce agua de mejor calidad que la obtenida solo con la microfiltración.

**Eficiencia en el uso de energía** – El tratamiento con membranas sumergidas de afuera hacia adentro hace un uso eficiente de la energía, ya que la membrana opera bajo una succión pequeña (-2 a -5 psi) y con una presión del ventilador bastante baja (5,2 psi). Además, en las plantas construidas al nivel del agua, las membranas pueden sumergirse directamente en el pozo del agua de alimentación,

y así se evitan costos de bombeo. Finalmente, no hay necesidad de consumir energía en bombeo para la recirculación interna, ya que no existen partículas atrapadas dentro del cuerpo de la membrana.

**Resistencia al cloro** - La membrana ZeeWeed® es resistente al cloro y cualquier otro oxidante en concentraciones tan altas como 200 mg/L. Esto significa que una planta puede preclorar su agua para el control de la *Dreissena polymorpha*, sin tener que añadir una etapa de dechloración. La resistencia a los oxidantes permite la adición de etapas de pretatamiento por oxidación, así como una fácil desinfección de las membranas y de la planta.

**Bajo recuento de partículas** - En ningún momento las membranas ZeeWeed son sometidas a esfuerzo ni retrolavadas bajo presión. El resultado es que las plantas de membrana sumergida tienen los recuentos más bajos de partículas en el campo de la microfiltración, generalmente con menos de 3 recuentos/ml. Esto permite un monitoreo en línea de la integridad de la membrana durante las 24 horas.

### 3. Aplicaciones de agua potable

#### 3.1 Tratamiento con membranas de microfiltración

##### 3.1.1 Tratamiento de aguas superficiales - Desinfección por microfiltración directa

El uso de una membrana de microfiltración de 0,2 micrones en una planta de filtración de agua potable permite abordar en un solo paso algunos de los problemas más discutidos con respecto a las tecnologías actuales (Fane, 1994; Jacangelo, 1995):

- 1) Remoción de quistes de *Giardia*, oocistos de *Cryptosporidium*, coliformes y otros parásitos, así como sólidos suspendidos
- 2) Reducción de virus
- 3) Reducción del uso de desinfectantes químicos
- 4) Reducción de productos químicos de sedimentación y
- 5) Reducción de lodos que necesitan disposición.

Este tipo de tratamiento se logra con cualquiera de las membranas de microfiltración descritas anteriormente.

A continuación se presentan resultados típicos obtenidos en el tratamiento de aguas superficiales a través de la microfiltración (Mourato, 1997).

**Cuadro 2. Datos del tratamiento de aguas superficiales - MF directa con una membrana sumergida**

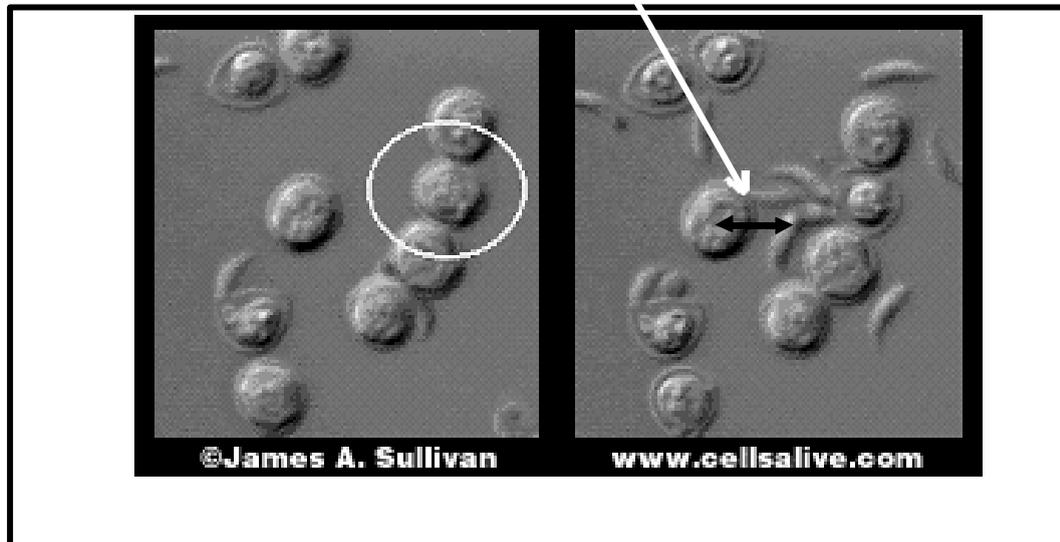
<b>Elemento en el agua de alimentación</b>	<b>Calidad del agua tratada</b>
<i>Giardia y Cryptosporidium</i>	No detectables > 6 log de remoción
Coliformes	< 10 UFC/100 ml
Sólidos suspendidos	No detectables
Recuento de partículas	< 3 partículas/ml
Turbiedad	< 0,1 UNT

Resultados del trabajo realizado en el tratamiento del agua del río Alberta y en Egipto, en el tratamiento de agua de canal.

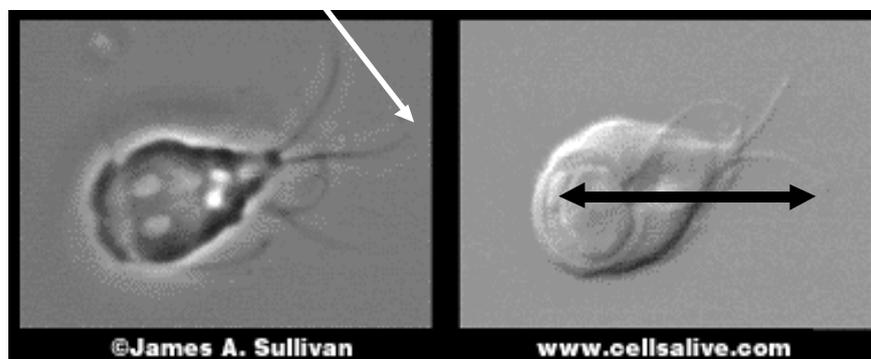
Actualmente, los quistes de *Cryptosporidium* y *Giardia* son un gran problema en los reservorios de aguas superficiales no protegidos. Estos quistes y oocitos se encuentran presentes como resultado de la contaminación por aguas residuales domésticas y también por microorganismos vivos naturales que defecan en el agua. Estos parásitos son sólo dos de los muchos que contaminan las aguas limpias. A diario, la OMS encuentra más parásitos en el agua que representan un riesgo para la vida humana.

La remoción de quistes usando membranas es una tarea fácil, ya que su diámetro es mayor que el diámetro de la mayoría de las membranas de microfiltración. La figura 5 muestra el tamaño de dos parásitos comúnmente encontrados en aguas norteamericanas: *Cryptosporidium* y *Giardia*, vistos a través de un microscopio con escaneo electrónico. En estas imágenes se puede apreciar por qué estos parásitos serían fácilmente removidos por una membrana de microfiltración con poros de 0,2 micrones, sin tener que recurrir a productos químicos u otros procesos de tratamiento.

**Micrográficos del escaneo electrónico de oocitos del *Cryptosporidium* (4 a 6 micrones de diámetro)**



**Micrográficos del escaneo electrónico de *Giardia* (12 a 20 micrones de diámetro)**



**Figura 5. Micrográficos del escaneo electrónico de parásitos de *Cryptosporidium* y *Giardia***

**3.1.2 Tratamiento de aguas superficiales - Coagulación mejorada con microfiltración**

Muchas fuentes de agua potable superficial tienen un alto contenido de color. La mayoría de las sustancias orgánicas solubles presentes en las aguas naturales

son materiales húmicos. Estos son compuestos orgánicos polares de peso molecular relativamente alto, que otorgan el color amarillo parduzco visible en algunas fuentes superficiales. Si bien estas sustancias no causan, por sí solas, problemas de salud, la cloración del agua puede dar lugar a la formación de trihalometanos (THM) que se cree son peligrosos para la salud, y que se encuentran bajo lineamientos gubernamentales cada vez más estrictos.

Cuando se combina con la coagulación, la microfiltración tiene la capacidad de remover el color y el carbono orgánico de las fuentes de agua. Esto se realiza mediante la precipitación de las sustancias orgánicas disueltas en microfloculos que luego la membrana puede separar.

El color y el carbono orgánico total (COT) son altos en ciertos lagos y ríos, las fuentes de agua potable más comunes en América del Norte. El reglamento de la EPA de los Estados Unidos para la remoción de COT varía con la alcalinidad del agua. El cuadro 3 presenta estos requerimientos.

**Cuadro 3. Requerimientos de la US EPA respecto a la remoción de COT**

COT en el agua mg/l	Niveles de alcalinidad en el agua de alimentación mg/lcaCO <sub>3</sub> )		
	0-60 mg/l	60-120 mg/l	>120 mg/l
2 - 4,0	35%	25%	15%
4,0 - 8,0	45%	35%	25%
> 8,0	50%	40%	30%

La microfiltración por sí sola no elimina el color ni el COT del agua. Sin embargo, cuando se la combina con la coagulación, es posible lograr una remoción efectiva, al combinar la ventaja de la barrera absoluta de la MF con los procesos de coagulación.

Este excepcional proceso para la remoción del color, así como del COT y de los precursores de THM, se ha desarrollado usando la tecnología de microfiltración con membrana sumergida, ZeeWeed®, desarrollada por ZENON. La capacidad para acumular altos niveles de sólidos en el tanque de proceso permite lograr, a través de un mecanismo combinado de coagulación, co-precipitación y adsorción en sólidos, altos niveles de remoción de COT con dosis menores de coagulantes. Se pueden usar dos coagulantes: alumbre o cloruro de hierro. A continuación se presentan resultados típicos de la coagulación mejorada con microfiltración ZeeWeed®:

#### Cuadro 4. Resultados típicos de la coagulación mejorada con microfiltración

COT del agua de alimentación: 10 mg/L Color del agua de alimentación: 35 unidades
--

	Coagulación con alumbre (60 mg/L)	Coagulación con FeCl <sub>3</sub> (60mg/L)
COT filtrado:	49% de remoción	66% de remoción
Color filtrado:	74% de remoción	66% de remoción
THM filtrado:	48% de remoción	66% de remoción

Nota: La máxima remoción de COT usando coagulación sin membrana fue de 40%

Según la química del agua, se pueden obtener niveles más altos de remoción con altas dosis de coagulantes y un ajuste del pH del agua. En un proceso optimizado se obtienen niveles tan altos como 95% de remoción del color y 85% de remoción del COT. La optimización de procesos a menudo requiere un ajuste del pH que conlleva al uso de más productos químicos y puede ser más difícil de operar en plantas pequeñas.

VanderVenter (1998) ha combinado el uso de la microfiltración sumergida con coagulante y carbón activo en polvo como un medio para remover de manera efectiva la materia orgánica natural del agua superficial. Si bien este proceso es más difícil de operar, mejora significativamente la calidad del agua tratada con un bajo consumo de productos químicos.

#### 3.1.3 Tratamiento de aguas subterráneas mediante la microfiltración

El agua de pozo a menudo contiene hierro y manganeso, los que se deben remover para el consumo humano. Muchas comunidades pequeñas dependen de abastecimientos comunales de agua subterránea y requieren sistemas que aseguren la remoción de metales, turbiedad, sulfuro de hidrógeno y microorganismos, al mismo tiempo que minimicen el uso de productos químicos y la generación de lodo.

Los pozos con alto niveles de hierro y manganeso son comunes en ciertas partes del mundo, según la formación geológica. Las tecnologías convencionales, tales como la arena verde y la oxidación/sedimentación, son efectivas en concentraciones bajas a medianas. Cuando las aguas de pozo contienen más de 5mg/l de hierro y más de 1 mg/l de manganeso, las tecnologías convencionales ya no son tan efectivas debido al atascamiento del filtro causado por el hierro precipitado y por las películas de bacterias del hierro. Además, muchos pozos bajo la influencia de aguas superficiales también contienen microorganismos, quistes y oocitos que se deben remover de manera efectiva para el consumo seguro del agua potable. A menudo, los pozos profundos contienen H<sub>2</sub>S y sustancias

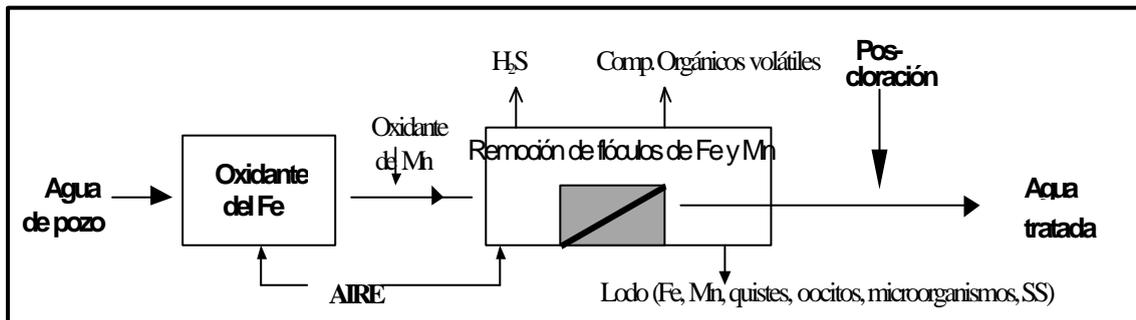
orgánicas que también se deben remover, lo cual muchas veces da lugar a una planta de tratamiento más compleja que la requerida por estas aguas limpias.

Debido a sus características de diseño, la membrana ZeeWeed resuelve muchos de estos problemas sin la adición de etapas innecesarias.

**Cuadro 5. Mecanismos para la remoción de contaminantes de aguas subterráneas**

Remoción de contaminante	Mecanismo de remoción
Fe	Oxidación de aire
Mn	Aditivo oxidante en línea
<i>Giardia, Cryptosporidium</i>	Microfiltración directa
Turbiedad, microorganismos	Microfiltración directa
H <sub>2</sub> S	Arrastre con aire

A continuación se presenta el diagrama de flujo correspondiente al proceso con membrana afuera hacia adentro sumergida para el tratamiento de aguas subterráneas complejas:



**Figura 6. Planta típica de tratamiento ZeeWeed para aguas subterráneas complejas**

En los cuadros 6 y 7 se presentan los resultados típicos obtenidos con una membrana sumergida de afuera hacia adentro en el tratamiento de aguas subterráneas. Estos resultados se han compilado de la operación de plantas reales en New Brunswick, en un pozo contaminado con hierro y manganeso bajo la influencia de aguas superficiales, y en Egipto, en pozos profundos que contenían una mezcla de hierro, manganeso, H<sub>2</sub>S, sustancias orgánicas y bacterias.

**Cuadro 6. Resultados del tratamiento de agua de pozo en New Brunswick, Canadá**

Contaminante	Agua de alimentación de pozo	Agua tratada con ZeeWeed
Hierro	2 – 10 m/L	< 0,1 mg/L
Manganeso	2 – 10 mg/L	< 0,1 mg/L

Nota: La planta ZeeWeed se mejora con la inyección de permanganato para la remoción de Mn.

En aguas más contaminadas, se ponen en juego otros mecanismos del proceso que contribuyen al tratamiento. Esto se demostró particularmente cuando se trató el agua de pozo en Egipto. Esta agua contenía altos niveles de DBO biodegradable y amoníaco debido a la contaminación del pozo con aguas residuales. El aire en el tanque del proceso ZeeWeed no sólo oxidó el H<sub>2</sub>S, sino que también convirtió al tanque del proceso en un biorreactor, con lo que se redujo el DBO biodegradable y nitrificó el amoníaco. A continuación se presentan resultados típicos de esta operación:

**Cuadro 7. Resultados del tratamiento de agua de pozo en Egipto usando ZeeWeed**

Contaminante	Agua de alimentación de pozo	Agua tratada con ZeeWeed
Hierro	0,5 – 20 mg/L	< 0,1 mg/L
Manganeso	0,5 – 10 mg/L	< 0,1 mg/L
H <sub>2</sub> S	10 mg/L	No detectable
DBO oxidable	50 mg/L	< 1 mg/L
Amoníaco	8 mg/L	< 1 mg/L
Coliformes	> 100 UFC/ 100 mL	< 1 mg/L UFC/ 100 mL

### 3.2 Aplicación de membranas de nanofiltración para el tratamiento de agua potable

La separación por nanofiltración usa una membrana con tamaños de poro y presiones operativas cuyos valores se ubican entre los de las membranas de ultrafiltración y los de las membranas de ósmosis inversa. Las presiones de operación típicas varían entre 70 y 200 psi.

Las membranas de nanofiltración previenen el paso de sólo una porción del total de sólidos disueltos (TSD) (principalmente iones divalentes) y remueven la mayor parte de la materia orgánica disuelta presente en las aguas naturales.

Las membranas de nanofiltración comúnmente se usan en aplicaciones municipales para:

- 1) Desalinización de aguas salobres
- 2) Remoción de sustancias orgánicas y precursores de THM de las aguas superficiales

Las membranas de nanofiltración, al tener poros de menor diámetro, pueden retener sustancias orgánicas, así como moléculas medianas y grandes presentes en el agua, sin necesidad de añadir productos químicos. El costo de contar con poros más pequeños es la necesidad de una mayor presión para hacer pasar el agua limpia a través de la membrana, lo que se traduce en mayores requerimientos de energía.

El menor diámetro de los poros de las membranas de nanofiltración también hace posible remover un porcentaje pequeño de sales del agua y, por lo tanto, estas membranas se usan para la desalinización de aguas salobres. Esto es muy común en Florida, EUA, donde el total de sólidos disueltos en el agua es demasiado alto para el consumo humano, pero lo bastante bajo para no generar altas presiones osmóticas que requieran tratamiento por ósmosis inversa. La desalinización por nanofiltración no es muy necesaria en América del Sur, por lo que su discusión no se profundizará en este documento.

### *3.2.1 Remoción del color y el COT mediante la nanofiltración*

La nanofiltración se aplica comercialmente al tratamiento de aguas salobres con color. Sin embargo, este procedimiento aún está a escala piloto o de demostración en el caso de sistemas que usan aguas superficiales, las cuales generalmente son variables en cuanto a su calidad y turbiedad. Las membranas de nanofiltración están comercialmente disponibles y recientemente se han realizado mejoras en su configuración y en el diseño del sistema, lo que mejorará significativamente su competitividad en función de los costos.

A medida que se reducen los límites para una variedad de contaminantes en los Estados Unidos, la EPA está examinando diversas tecnologías que pueden considerarse como la mejor tecnología disponible para parámetros específicos. El tratamiento con membranas de nanofiltración puede ayudar a alcanzar muchos objetivos respecto a la formación de subproductos de desinfección y puede resultar un medio eficiente para cumplir con los nuevos estándares (Clark y otros, 1991). Sin embargo, se ha identificado la necesidad de contar con más datos sobre su aplicación en el caso de aguas superficiales.

Además de depender del tipo de membrana que se utilice, su rendimiento y los costos de un sistema con membrana dependen también de la configuración de los módulos. Las membranas de nanofiltración disponibles comercialmente presentan configuraciones en espiral, fibra hueca o pequeños tubos y operan en la modalidad de flujo cruzado.

Tan y Sudak (1992) han demostrado que los módulos espirales de NF comercialmente disponibles son adecuados para remover los precursores de trihalometanos de las aguas subterráneas con color, las que generalmente tienen un bajo contenido de sólidos suspendidos. Por el contrario, la turbiedad en las aguas superficiales es a menudo alta y estacionalmente variable. Los módulos espirales tradicionales requieren de un pretratamiento para remover partículas de menos de 5 micrones. Un informe preparado por Taylor y otros (1992) para la EPA mostró que para evitar que los módulos en espiral se ensucien en el caso de aguas superficiales era necesario un pretratamiento mediante sedimentación y coagulación con alumbre, filtros de arena rápida, microfiltración o carbón activo granular.

Se ha probado la nanofiltración para remover el color y el COT en 8 fuentes de agua diferentes en Ontario y Quebec. Éstas tenían niveles variables de ácidos húmicos, alcalinidad y compuestos químicos. El nivel de color en el agua de alimentación durante el programa de prueba dio lugar a los peores casos, con niveles de color en el agua sin tratar que variaban de 100 a 120 TCU en ciertas pruebas. Se hicieron pruebas a membranas de fibra espiral y hueca, con resultados similares. La nanofiltración fue capaz de cumplir con los objetivos del agua potable de Ontario respecto al color, con niveles menores a 2 TCU en el filtrado, los cuales se mantuvieron durante más de 1.200 horas en condiciones óptimas de funcionamiento. También se lograron objetivos específicos para el COT (5 mg/L), la turbiedad (1 NTU) y los THMFP (350 ug/L).

Se realizó una evaluación económica preliminar para comparar los costos del módulo de flujo transversal con los de un proceso de tratamiento convencional (coagulación, sedimentación, filtración, con adición de carbón activo en polvo) capaz de brindar una calidad del agua equivalente para el abastecimiento de agua en Fauquier. El análisis de costos demostró que la nanofiltración resultaba menos costosa que el tratamiento convencional más el carbón activo en polvo para flujos de hasta 100 gpm. Estas conclusiones son coherentes con otras (Wiesner y otros, 1993) que han demostrado que la NF en la fibra hueca (flujo cruzado) y en las configuraciones de flujos transversales resulta competitiva en función de costos con el tratamiento convencional que requeriría un pulimento con carbón activo en polvo, o CAG/ozono para alcanzar las limitaciones establecidas para los THM.

**Cuadro 8. Resumen de los resultados de las pruebas en campo para el uso de nanofiltración en el tratamiento de aguas superficiales**

UBICACION	Color			COT			Turbiedad			THMFP		
	Crudo (UC)	(UC)	Remoción (%)	Crudo (mg/L)	Filtrado (mg/L)	Remoción (%)	Crudo (UNT)	Filtrado (UNT)	Remoción (%)	Crudo (µg/L)	(µg/L)	Remoción (%)
Fauquier., Ontario (1993)	110	6	95	10	2.8	72	0.65	0.18	72	1200	175	85
Caramat Lake, Ontario – 1992	100	1	99	14	2.6	81	0.3	<.01	>96	1350	150	89
Lac Deux Montagnes	25	1	96	6	1.8	70	10	<0.2	>92	200	64	68
Rawdon, Quebec (1991) (Lac Vail)	65	2	97	7	1.1	84	1.3	<0.1	>92	260	60	77
Sept-Isles, Quebec (1992) (Lac des-Rapides)	90	5	94	10.4	1.6	85	ND	ND	ND	154	71	54
Contra Costa Water District, CA (Sacramento, San Joaquin)	ND	ND	ND	5.2	2.1	60	12	0.05	>99	330	205	38
East Bay CA (1991) (Río Mokelumne)	ND	ND	ND	1.4	0.4	74	0.64	0.05	92	50	6.5	87
Ottawa, Ontario (1991) (Río Ottawa)	45	<1	>98	7.4	1.1	85	1.4	0.05	96	160	27	83

#### 4. Conclusiones

Las membranas están entrando rápidamente al mercado de agua potable como una opción para que las plantas convencionales de coagulación/filtración aborden los nuevos problemas de salud relacionados con el agua potable. Las membranas sumergidas de afuera hacia adentro están compitiendo contra los microfiltros de extremo cerrado de afuera hacia adentro y las membranas de flujo cruzado de adentro hacia afuera.

Tanto la microfiltración mejorada con coagulación como la nanofiltración se están comercializando para el tratamiento de aguas superficiales con color y sustancias orgánicas. El uso de la microfiltración facilita las necesidades de pretratamiento, pero requiere el uso de productos químicos. Por otro lado, la nanofiltración en espiral no requiere productos químicos para flocular las sustancias orgánicas, pero requiere un pretratamiento mediante filtración en arena para prevenir la obstrucción y contaminación de la membrana en espiral. La nanofiltración de fibra hueca está disponible para prevenir estos problemas de pretratamiento pero no se usa comúnmente.

La decisión final sobre el método que se debe usar para el tratamiento de agua con contenido orgánico se basará en el costo de productos químicos frente a los costos de energía y frente a la disponibilidad de recursos humanos capacitados. Los resultados diferirán de una región a otra.

La nanofiltración se está usando efectivamente para la desalinización de aguas salobres en todo el mundo, especialmente en las áreas costeras del sureste de los Estados Unidos, tales como Florida.

Los sistemas con membrana son compactos, fáciles de operar, y están convirtiéndose en la tecnología preferida para pequeñas comunidades y ubicaciones remotas. Dado que son modulares, las plantas de membrana pueden construirse para tratar volúmenes tan pequeños como 10 gpm pero actualmente también se están vendiendo para plantas de tratamiento con un flujo de más de 20 millones de galones por día.

## 5. Agradecimientos

El autor desea agradecer la colaboración de Intech Inc. y del Ministerio de Investigación y Desarrollo de Egipto por su apoyo en la obtención de datos sobre tratamiento de agua potable en aguas subterráneas y en aguas superficiales. Además el autor expresa su reconocimiento al Operador de Tratamiento de Agua del pueblo de Rothesay, por su cooperación.

## 6. Referencias

Clark, S.W. and Parrotta, M.J., *“Membrane Technologies and Drinking Water Regulations”*. Proceedings of the AWWA Seminar on Membrane Technologies in the Water Industry, marzo de 1991.

Fane, A.G., *An overview of the use of microfiltration for drinking water and waste water treatment*. Documento presentado en el Microfiltration Symposium for Water Treatment, Irvine, CA., 1994.

Jacangelo, J.G. et al. Mechanism of Cryptosporidium, Giardia, and MS2 Virus Removal by MF and UF. *Journal AWWA*, setiembre de 1995.

Mourato, D et al, *Applications of Immersed Membranes in the Drinking Water Field*. Documento presentado en la 1997 AWWA Membrane Technology Conference, Louisiana, febrero de 1997.

VandeVenter et al, *Application of Immersed Membrane Microfiltration for NOM Removal*. Documento presentado en la 1998 AWWA Annual Conference, Dallas, Texas, junio de 1998.

Tan, L. And Sudak, R.G. “Removing Colour From a Groundwater Source”, *Journal American Water Works Association*, enero de 1992.

Taylor, J.S., Reiss, C.R., Jones, P.S., Morris, K.E., Lyn, T.L., Smith, D.K., Mulford, L.A., and Duranceau, S.J., *“Reduction of Disinfection By-Product Precursors by*

*Nanofiltration*". U.S. Environmental Protection Agency Project Summary, Proyecto No. EPA/600/SR-92/023, abril de 1992.

Wiesner, M.R., Hackey, J., Sethi, S., Jacangelo, J., and Lainé, J.M., "A Comparison of Cost Estimates for Membrane Filtration and Conventional Treatment", AWW Conference on Membrane Technologies, 1993.

Zenon Environmental Inc., "Development of Membrane Technology for Treatment of Coloured Water", Informe presentado al Ontario Ministry of Environment and Energy, ET007WS, setiembre de 1993.