



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y  
PUERTOS**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS DEL AGUA Y DEL MEDIO  
AMBIENTE**

**PROGRAMA DE DOCTORADO: INGENIERÍA AMBIENTAL**

**SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE  
PRETRATAMIENTO DE ÓSMOSIS  
INVERSA**

**DOCTORANDO:** NOELIA QUEVEDO DÍAZ

**DIRECTOR DE TESIS:** JUAN IGNACIO TEJERO y AMAYA LOBO

Santander, octubre 2013







# AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar, me gustaría agradecer al Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria, la oportunidad que me brindaron para retomar con ellos mis estudios de Doctorado, permitiéndome continuar con la ilusión de poder realizar un trabajo de investigación. Me merecen especial mención:

➤ *Iñaki Tejero*, como responsable del Departamento, profesor y tutor de Tesis Doctoral, por abrirme las puertas de su Departamento, animándome a retomar la Tesis, y facilitándome la realización de las diferentes etapas del Doctorado, que sin su apoyo no hubiera sido posible. Además, la formación impartida en su programa de Doctorado ha conseguido unir las bases teóricas con aplicaciones prácticas, que me han sido de gran ayuda tanto para la realización de la Tesis como en mi desarrollo profesional.

➤ *Amaya Lobo*, como profesora y tutora de Tesis Doctoral. Comenzando por el Curso de Doctorado “Tratamientos Biológicos Avanzados” que Amaya impartía y en el que adquirí conocimientos fundamentales para el tratamiento de aguas, sector al cual me dedico profesionalmente; continuando por su ayuda para enfocar las publicaciones y trabajos integrados en la Tesis, así como por su disponibilidad para resolver todas las dudas y problemas que han surgido por el camino.

➤ *Javier Temprano*, como coautor en mis artículos. Por su ayuda para poder llevar a cabo las publicaciones que sirvieron como base de este trabajo.

Por otro lado, me gustaría agradecer a mi compañero *Joan Sanz*, responsable de la Dirección Técnica en Veolia Water Systems Iberica S.L., por ayudarme en la selección de trabajos de investigación y posibilitar la utilización de los resultados de los estudios de demostración realizados en la compañía para esta Tesis. Además, quisiera expresar mi agradecimiento al personal de laboratorio de Veolia Water Systems Iberica S.L.

Finalmente, y no por ello menos importante, mi agradecimiento a las personas de mi entorno, *mis padres, mis abuelos y Álvaro*, por su apoyo incondicional.



# RESUMEN

---

En la actualidad, el proceso de ósmosis inversa presenta numerosas aplicaciones, entre las que se encuentran la obtención de agua potable ó conseguir aguas con la calidad adecuada para su utilización en diferentes procesos industriales. En cualquiera de sus aplicaciones, la ósmosis inversa requiere una calidad de agua de alimentación que permita obtener un rendimiento adecuado del proceso, siendo por tanto fundamental el pretratamiento del agua para minimizar el ensuciamiento de las membranas y permitir un funcionamiento óptimo de las mismas. El agua de alimentación a la ósmosis inversa puede ser tanto agua de mar como aguas salobres o bien superficiales, adecuándose el pretratamiento de dicha fuente de alimentación en función de su procedencia, su calidad y por tanto su potencial de ensuciamiento.

En general, los procesos de pretratamiento del agua de alimentación a ósmosis inversa se pueden clasificar en dos tipos, tratamientos convencionales y tratamientos con membranas. Los primeros, engloban tecnologías como la desinfección, coagulación, floculación, decantación, flotación y filtración. En el caso de los tratamientos con membranas, se incluyen los procesos de microfiltración y ultrafiltración. Estos últimos suelen proporcionar mayor eliminación de partículas coloidales y bacterias que las tecnologías convencionales. Sin embargo, en algunas plantas el tratamiento convencional es suficiente para obtener la calidad de agua requerida para alimentar la ósmosis inversa.

En el presente trabajo se plantea como primer objetivo la optimización de la línea de tratamiento previa a la ósmosis inversa para reducir el ensuciamiento de las membranas. Para ello, se han considerado dos casos de estudio basados en los resultados de pretratamiento convencional para agua de alimentación a ósmosis inversa obtenidos en dos plantas de demostración. En el primer caso, se trata de una ósmosis inversa para la potabilización de agua de mar en la desaladora de Carboneras (Almería) mientras el segundo, se centra en el tratamiento de agua de embalse para obtener agua de proceso industrial. En ambos casos, se prueban diferentes configuraciones de pretratamiento, basadas en un tratamiento fí-

sico-químico seguido por una doble etapa de filtración incluyendo ésta filtros bicapa y tri-capa presurizados, combinadas con la adición de diversos coagulantes y floculantes.

Para cada una de las configuraciones de pretratamiento estudiadas, se determinó el potencial de atascamiento del agua de alimentación a la ósmosis inversa en función de los valores de los parámetros SDI (índice de densidad de sedimentos) y MFI (índice de atascamiento modificado). El SDI es una medida estática de resistencia que permite conseguir buenos resultados cuando se trata de un agua bastante limpia ya que, en esos casos, los flujos inicial y final a través de la membrana son similares. En cambio, el MFI es un parámetro basado en el mecanismo de filtración a través de la torta y tiene en cuenta el mecanismo de reducción de flujo que tiene lugar en las membranas. Por lo tanto, el MFI representa mejor las condiciones de operación de las membranas que el SDI y puede utilizarse para medir en aguas con alto y bajo potencial de ensuciamiento.

En cuanto al análisis de resultados, los valores de SDI y MFI obtenidos en cada ensayo se evaluaron en gráficos de probabilidad con una distribución normal y manteniendo intervalos de confianza del 95%. Teniendo en cuenta las recomendaciones de los fabricantes de membranas, se consideraron óptimas las configuraciones de pretratamiento que permitieron conseguir valores de SDI y MFI menores de 3 y  $1 \text{ s/l}^2$ , respectivamente. Además, se consideraron aceptables los pretratamientos que permitieron obtener valores de SDI y MFI por debajo de 5 y  $4 \text{ s/l}^2$ , respectivamente. En ambos casos de estudio, teniendo en cuenta los valores límite establecidos para cada parámetro, se concluyó que la configuración óptima era la que incluía tratamiento físico-químico seguido por la doble etapa de filtración. Aparte, para cada caso de estudio otras configuraciones de pretratamiento también permitieron conseguir valores de SDI y MFI óptimos ó admisibles.

Finalmente, como segundo objetivo del trabajo se estudió si existe una correspondencia entre los criterios basados en los parámetros SDI y MFI, analizados previamente. Para comprobar dicha correspondencia, se agruparon los datos según los valores límite establecidos y se analizaron los valores de ambos parámetros mediante gráficos de probabilidad y gráficos de intervalos de confianza. De dicho análisis se concluyó que, aunque en general el SDI resulta una medida adecuada del potencial de ensuciamiento del agua, no siempre existe una correspondencia entre los criterios SDI y MFI.

# SUMMARY

---

Nowadays, reverse osmosis is used in numerous applications, such as drinking water production or for obtaining suitable water quality to be used in different industrial processing. Whatever the reverse osmosis application, a feed water quality is required in order to get an adequate process performance, suitable pretreatment being essential to minimize membranes fouling as well as to allow their optimum performance. Seawater, brackish water or surface water can be utilized for feeding reverse osmosis, the type of pretreatment depending on the feed water source, its quality and thus, its fouling potential.

In general, reverse osmosis pretreatments are classified in two groups, conventional pretreatments and membranes. The first one, includes technologies such as disinfection, coagulation, flocculation, settling, flotation and filtration. Membrane filtration techniques, include microfiltration and ultrafiltration. These last ones usually enable higher rates of removal of colloidal particles and bacteriological contaminants than the conventional technologies. However, in some reverse osmosis systems conventional pretreatment is effective enough in producing water with the required quality.

The first objective of current work is to establish the best reverse osmosis pretreatment line in order to reduce the membranes fouling. Two case studies have been considered, both of them based on the conventional pretreatment results obtained in demonstration plants. The first case, is a seawater desalination plant in Carboneras (Almería) for producing drinking water while the second one, is based on dam water treatment for industrial processing. In both studies, different reverse osmosis pretreatment configurations, resulting from the combination of a physical-chemical treatment with a double stage filtration, with pressurized dual-media and three-layer filters, and completed with coagulants/flocculants addition, are tested.

For each configuration, two parameters, the SDI (silt density index) and the MFI (modified fouling index), were used to predict the fouling potential of reverse osmosis feed water. The SDI tests is a static measurement of resistance that allows good results to be obtained for fairly clean waters where the initial and final flows are similar. On the other hand, the MFI is based on the cake filtration mechanism so it takes into account the flow reduction mechanism that occurs in the case of membranes. As a consequence, MFI is a better representation of membrane operating conditions than SDI, and it can be used to measure high and low fouling feed water.

Regarding the results analysis, the SDI and MFI values for each test were evaluated in probability graphics with normal distribution and keeping confidence intervals of 95%. According to membrane manufacturers recommendations, the configurations that allowed the obtaining of SDI and MFI values lower than 3 and  $1 \text{ s/l}^2$ , respectively, were considered as the optimum pretreatment. Moreover, the configurations that allowed the accomplishment of SDI and MFI values lower than 5 and  $4 \text{ s/l}^2$ , respectively, were considered as an acceptable reverse osmosis pretreatment. For both case studies, with the limit values already established for each parameter, it was concluded that the optimum configuration included a physical-chemical treatment followed by a double stage filtration. Furthermore, for each case study other pretreatment configurations also allowed the obtaining of SDI and MFI optimum or acceptable values.

Finally, the second objective of current work was to study whether there is a correspondence between SDI and MFI based criteria or not. To check the correspondence, the data were grouped according to the limit values already established, the SDI and MFI values being analysed for each group in probability graphics and confidence interval graphics. From the analysis it was concluded that, although generally the SDI is a suitable water fouling potential measurement, the correspondence between SDI and MFI criteria does not always exist.

## **PUBLICACIONES DE LA TESIS**

---

Los casos de estudio para optimización del pretratamiento del agua de alimentación a ósmosis inversa analizados en el presente trabajo, han dado lugar a las siguientes publicaciones:

N. Quevedo, J. Sanz, C. Ocen, A. Lobo, J. Temprano, I. Tejero, Reverse osmosis pretreatment alternatives: Demonstration plant in the seawater desalination plant in Carboneras, Spain, *Desalination* 265 (2011) 229-236.

M. García, J. Sanz, C. Carulla, E. Nebot, J. M. Ortega, A. Casañas, L. M. Lubian, N. Quevedo, Assesment of MFI as Seawater Pretreatment Design Tool at Carboneras Demonstration Plant, in: *Proceedings of IDA World Congress PER11-260*, Perth, Western Australia, 2011.

N. Quevedo, J. Sanz, A. Lobo, J. Temprano, I. Tejero, Filtration demonstration plant as reverse osmosis pretreatment in an industrial water treatment plant, *Desalination* 286 (2012) 49-55.





## SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE PRETRATAMIENTO DE ÓSMOSIS INVERSA

\*\*\*\*\*

### ÍNDICE

\*\*\*\*\*

<b>LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS.....</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>39</b>
<b>CAPÍTULO 3. PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA....</b>	<b>45</b>
<b>CAPÍTULO 4. PRETRATAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN PLANTA INDUSTRIAL.....</b>	<b>77</b>
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL DEL PRETRATAMIENTO SDI vs MFI.....</b>	<b>101</b>
<b>CAPITULO 6. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES PRÁCTICAS .....</b>	<b>123</b>
<b>CAPITULO 7. REFERENCIAS.....</b>	<b>129</b>
<b>ANEJOS.....</b>	<b>139</b>



## **LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS**

---

### **LISTADO DE FIGURAS**

Figura 1.1.- Esquema ósmosis

Figura 1.2.- Esquema ósmosis inversa

Figura 3.1.- Diagrama de flujo de la planta de demostración

Figura 3.2.- Datos de SDI medidos con diferentes membranas

Figura 3.3.- Datos de SDI de entrada a planta (intervalo de confianza 95% para la media)

Figura 3.4.- Datos de MFI de entrada a planta (intervalo de confianza 95% para la media)

Figura 3.5.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 2.1.3.

Figura 3.6.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 2.1.3.

Figura 3.7.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 2.2.9.

Figura 3.8.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 2.2.8.

Figura 3.9.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 2.3.7.

Figura 3.10.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 2.3.7.

Figura 3.11.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 3.4.5.

Figura 3.12.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 3.4.5.

Figura 4.1.- Diagrama de flujo de la planta de demostración

Figura 4.2.- Características principales de las configuraciones ensayadas

Figura 4.3.- Datos de MFI de entrada a planta (intervalo de confianza 95% para la media)

Figura 4.4.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 1.1.1.

Figura 4.5.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 1.1.1.

Figura 4.6.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 1.2.1.

Figura 4.7.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 1.2.1.

Figura 4.8.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 2.3.1.

Figura 4.9.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 2.3.1.

Figura 5.1.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para  $SDI < 3$

Figura 5.2.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para  $SDI < 3$

Figura 5.3.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para  $3 < SDI < 5$

Figura 5.4.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para  $3 < SDI < 5$

Figura 5.5.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para  $MFI < 1$

Figura 5.6.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para  $MFI < 1$

Figura 5.7.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para  $1 < MFI < 4$

Figura 5.8.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para  $1 < MFI < 4$

Figura 5.9.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para  $SDI < 5$

Figura 5.10.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para  $SDI < 5$

Figura 5.11.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para  $MFI < 4$

Figura 5.12.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para  $MFI < 4$

## **LISTADO DE TABLAS**

Tabla 3.1.- Nomenclatura (X, Y, Z)

Tabla 3.2.- Resumen de ensayos

Tabla 3.3.- Clasificación de resultados de SDI según los objetivos

Tabla 3.4.- Clasificación de resultados de MFI según los objetivos

Tabla 3.5.- Parámetros estadísticos ensayos SDI

Tabla 3.6.- Parámetros estadísticos ensayos MFI

Tabla 4.1.- Características principales de los filtros

Tabla 4.2.- Nomenclatura (X, Y, Z)

Tabla 4.3.- Resumen de ensayos

Tabla 4.4.- Características del agua a tratar en la planta de demostración

Tabla 4.5.- Clasificación de resultados según los objetivos

Tabla 4.6.- Parámetros estadísticos

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCIÓN**



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>19</b>
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL A LA ÓSMOSIS INVERSA.....	19
1.2 APLICACIONES DE LA ÓSMOSIS INVERSA .....	20
1.2.1 Obtención de agua potable.....	20
1.2.2 Aplicaciones en la industria.....	21
1.2.3 Obtención de agua ultrapura .....	22
1.3 PRETRATAMIENTO DEL AGUA A TRATAR EN ÓSMOSIS INVERSA.....	23
1.3.1 Objetivos.....	23
1.3.2 Tecnologías disponibles.....	24
1.3.3 Pretratamiento de agua de mar.....	29
1.3.4 Pretratamiento de agua superficial.....	30
1.4 PARÁMETROS DE MEDIDA DEL POTENCIAL DE ATASCAMIENTO DE UN AGUA.....	31
1.4.1 Índice de densidad de sedimentos, SDI .....	31
1.4.2 Índice de atascamiento modificado, MFI .....	32
1.5 ORGANIZACIÓN DE LOS CONTENIDOS DEL TRABAJO .....	33
1.6 REFERENCIAS .....	36



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL A LA ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa tiene su origen en la comprobación de la reversibilidad del fenómeno de ósmosis directa o natural.

La ósmosis es un fenómeno espontáneo que tiene lugar cuando a ambos lados de una membrana semipermeable hay dos disoluciones, del mismo compuesto, de diferente concentración. Una membrana semipermeable es una membrana que permite el paso del disolvente pero impide el flujo de ciertos solutos o iones de la disolución. El flujo osmótico es un proceso natural por el cual el disolvente tiende a atravesar la membrana desde la disolución más diluida a la más concentrada hasta igualar las concentraciones a ambos lados de la membrana, es decir, hasta que el sistema alcanza el equilibrio y se igualan los potenciales químicos. Este flujo osmótico puede reducirse aplicando una presión externa sobre la disolución concentrada. A mayor presión aplicada menor es el flujo osmótico. Cuando el flujo se detiene, la presión aplicada es la presión osmótica ( $\pi$ ). A presiones mayores que dicha presión osmótica, el flujo se invierte y se transfiere disolvente desde la disolución concentrada a la diluida. Esto es lo que se conoce como ósmosis inversa. Ambos fenómenos, ósmosis y ósmosis inversa, aparecen ilustrados en las figuras 1.1 y 1.2 respectivamente [1,2].

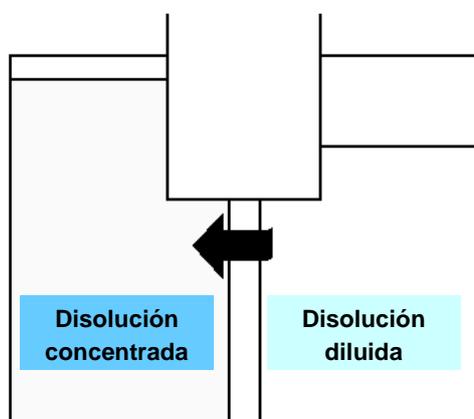


Figura 1.1.- Esquema ósmosis

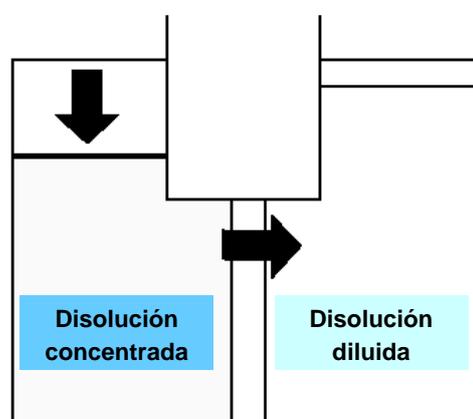


Figura 1.2.- Esquema ósmosis inversa

## 1.2 APLICACIONES DE LA ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa es aplicable a todos los casos en los que se pretende una desmineralización o una concentración de iones o de moléculas orgánicas. Principalmente se utiliza en:

- abastecimiento de agua potable o de aguas industriales principalmente en lugares donde se dispone de aguas salobres
- producción de agua de elevada calidad, como las aguas de caldera, aguas ultrapuras en la industrias electrónica, farmacéutica, nuclear, etc., así como las de laboratorios u hospitales.

En este caso, se utilizan las propiedades de las membranas para eliminar no sólo las sales disueltas, sino también las moléculas orgánicas de masa superior a 70 g/mol aproximadamente, y, con mayor motivo, los elementos particulares más finos, tales como los virus [3,4].

A continuación se describen las principales aplicaciones del proceso de ósmosis inversa (OI).

### 1.2.1 Obtención de agua potable

La OI juega un papel importante en la tarea de proveer agua potable, definida tanto por el criterio de la OMS de menos de 1.000 ppm de sólidos totales disueltos (STD) como por la EPA de los EE.UU, que establece un límite de 500 ppm de STD [5]. La OI es el tratamiento más destacado en el Oriente Medio y en muchas islas, donde la demanda de agua potable ha dejado atrás al suministro natural. También se utilizan pequeñas plantas de OI para obtención de agua potable en barcos.

En la desalación del agua de mar, la OI compite con otros procesos como son, la destilación, la electrodiálisis o el intercambio iónico. En la selección de la tecnología a aplicar, debe considerarse por un lado, el tamaño de la instalación y por otro, que la presión osmótica se incrementa a medida que aumenta la salinidad del agua, siendo por tanto fundamen-

tal tener en cuenta la compacidad de la solución y el consumo de energía en cada caso. Asimismo, debe considerarse que la OI, a diferencia de los otros procesos mencionados, permite obtener una buena calidad de agua independientemente del agua bruta considerada [3].

En esta aplicación de desalación de agua de mar, debido a la presión osmótica del océano, se requiere una sobrepresión elevada para mantener una filtración de buena calidad, siendo habituales presiones de operación en el rango de 6-8 MPa. Por ello, además de por el coste implícito del proceso, en casos donde hay otras opciones de suministro de agua potable tales como canales, líneas de tuberías o pozos, la opción de la OI resulta más desfavorable económicamente.

En el caso del tratamiento de aguas salobres, desde agua de mar diluida hasta fuentes naturales que contienen varias sales pero siempre con menor STD que el agua de mar, la OI y otros procesos con membranas como la nanofiltración, compiten económicamente con la electrodiálisis para la desalación de agua salobre. Aquí, en función de la calidad requerida prevalece un proceso de tratamiento sobre los otros [5].

Cuando se trata de aguas superficiales, la OI retiene igualmente un gran número de contaminantes que escapan a la autodepuración de los ríos [3].

### **1.2.2 Aplicaciones en la industria**

Como en el apartado anterior, algunas industrias disponen de cadenas de tratamiento incluyendo OI, tanto para aguas superficiales como para aguas salobres e incluso agua de mar, que permiten la obtención de agua con la calidad necesaria para ser utilizada en los procesos industriales.

Por otro lado, la OI es una solución útil en aplicaciones pequeñas donde el agua contiene una pequeña cantidad de contaminante, como puede ser un efluente contaminado con metales (por ejemplo, el níquel) [3].

La OI es a menudo capaz de recuperar la mayor parte del agua a una pureza lo suficientemente alta para su reutilización. El residuo se concentra haciendo su eliminación menos costosa, lo cual generalmente paga el proceso de recuperación.

Asimismo, la OI puede aplicarse en la depuración y concentración de corrientes de alimentos como es el caso de la concentración del azúcar y los usos en la industria de la bebida. Sin embargo, en estas aplicaciones de concentración, la OI presenta el inconveniente de la alta presión osmótica y la pérdida de sabor que se puede generar a través de la membrana [5].

### **1.2.3 Obtención de agua ultrapura**

Ciertos procesos industriales (industria electrónica, farmacéutica, etc.) y aplicaciones de laboratorio requieren un agua con una elevada calidad química, física y biológica que se conoce como agua ultrapura. En este tipo de aplicaciones la utilización de membranas, en combinación con otros tratamientos como el intercambio iónico, permiten conseguir sistemas con gran fiabilidad, incluso cuando no se conoce en profundidad la composición del agua bruta (especialmente la naturaleza de la materia orgánica y de las partículas).

En la producción de vapor, el agua de alimentación a calderas también representa una aplicación importante de la OI. En este caso, los incrustantes y coloides son particularmente bien rechazados por las membranas, y la cantidad de sólidos totales disueltos se reduce a un nivel que logra que el intercambio iónico o la desionización continua para los iones residuales sea muy económica.

Incluso la extremadamente elevada calidad del agua requerida para las plantas de energía nuclear puede obtenerse a partir del agua de mar.

En el caso de la producción de microcircuitos electrónicos, la elevada calidad del agua requerida para el proceso se obtiene generalmente a partir de dos sistemas de OI que operan en serie, seguidos por otras muchas etapas, o mediante OI combinada bien con

otros procesos de membrana como son la microfiltración o la ultrafiltración o bien con resinas de intercambio iónico.

En la industria farmacéutica, aunque cuantitativamente sea menor, en términos de calidad de agua requerida para los procesos se asemeja a la de la industria electrónica, siendo las membranas una buena opción para conseguir dicha calidad y compitiendo con otros procesos como la destilación de doble etapa [3, 5].

### **1.3 PRETRATAMIENTO DEL AGUA A TRATAR EN ÓSMOSIS INVERSA**

#### **1.3.1 Objetivos**

La ósmosis inversa requiere una calidad de agua de alimentación que permita obtener un rendimiento adecuado para la producción de agua con la calidad y cantidad exigidas. Por ello, es necesario un pretratamiento del agua de alimentación a la ósmosis inversa para evitar el ensuciamiento de las membranas y conseguir un funcionamiento óptimo de las mismas.

El ensuciamiento de las membranas conocido como fouling es la acumulación de materiales procedentes del agua de alimentación, en la superficie activa de la membrana o en el espaciador de la alimentación hasta el punto de causar problemas de operación. El tipo de fouling varía con la calidad del agua a tratar, clasificándose principalmente en los siguientes tipos:

- Incrustaciones, que tienen lugar cuando se produce la concentración de sales solubles sobre las membranas por encima de su límite de solubilidad, incluyendo carbonato cálcico, sulfato de bario, sulfato de calcio, sulfato de estroncio y fluoruro cálcico.

- Fouling coloidal, causado por la aglomeración de los coloides y su adherencia en las membranas

- Fouling orgánico, que se debe a la adsorción de compuestos orgánicos específicos como sustancias húmicas y aceites en la superficie de las membranas. Este tipo de fouling, no sólo favorece el crecimiento de los microorganismos sino que además da lugar a la formación de una segunda fase cuando se excede su límite de solubilidad.

- Fouling biológico, provocado por los microorganismos presentes en el agua que secretan polímeros los cuales se pegan a la superficie de las membranas, favoreciendo el crecimiento biológico en forma de una biopelícula.

En función de la procedencia del agua a tratar, su calidad y por tanto su potencial de ensuciamiento varía, siendo necesario adecuar la cadena de pretratamiento a cada caso concreto [6, 7].

### **1.3.2 Tecnologías disponibles**

Hoy en día, se pueden clasificar los procesos de pretratamiento en dos tipos, tratamientos convencionales y tratamientos con membranas.

En el primer caso, los tratamientos convencionales engloban tecnologías como la desinfección, coagulación, floculación, decantación, flotación y filtración. En función de la calidad del agua a tratar, la línea de pretratamiento puede estar compuesta por una o varias de las tecnologías indicadas permitiendo la obtención de agua con la calidad adecuada para alimentar a las membranas de ósmosis inversa.

En el caso de los tratamientos con membranas, se incluyen los procesos de microfiltración y ultrafiltración como alternativas a las tecnologías convencionales de pretratamiento.

En general, los procesos de membranas permiten una mayor eliminación de partículas coloidales y bacterias que las tecnologías convencionales. Sin embargo, su uso no siempre está justificado ya que hay plantas de ósmosis inversa donde el tratamiento convencional es suficiente para obtener la calidad de agua requerida o bien, casos en los que las membranas empleadas en el pretratamiento se ensucian siendo necesario recurrir a limpiezas frecuentes e incluso duplicidad del equipamiento para poder operar en continuo [8, 9, 10, 11, 12, 13].

Por tanto, en función del potencial de ensuciamiento del agua a tratar en la ósmosis inversa, se configuran las cadenas de pretratamiento incluyendo una o varias de las tecnologías indicadas anteriormente. A continuación se realiza una breve descripción de los pretratamientos habitualmente empleados para los distintos tipos de ensuciamiento que pueden producirse en las membranas de ósmosis inversa.

En el caso de aguas naturales saturadas con sulfatos y carbonatos, cuya precipitación puede causar incrustaciones en las membranas, debe preverse el control de dichos precipitados mediante la adición de hexametáfosfato sódico (SHMP) en el caso de los primeros y bajando el pH en el caso de los carbonatos, o bien mediante la adición de antiincrustantes.

Cuando se trata de aguas con una gran carga de coloides, incluyendo bacterias, arcillas, sílice coloidal y productos de la corrosión del hierro, dichos coloides suelen eliminarse utilizando bien tecnologías convencionales como son los procesos de coagulación- floculación combinados con decantación o filtración posterior, o bien con membranas de micro o ultrafiltración combinadas o no con coagulación previa. Los procesos de coagulación y floculación pueden llevarse a cabo en línea o en depósitos separados donde se consiguen mayores tiempos de retención.

Productos químicos usados en los procesos de coagulación son los coagulantes metálicos en base hierro o aluminio (sulfato, cloruro férrico, etc.) o los coagulantes orgánicos, los cuales se utilizan para combinar los coloides y formar microfloculos. Estos microfloculos pueden aglomerarse y formar partículas mayores con la adición de floculantes (poliacrilamidas, compuestos orgánicos cargados o neutros) en la etapa de floculación. Dichos floculos de mayor tamaño pueden eliminarse más fácilmente en la decantación, en una filtración multimedia o en una microfiltración. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que si los floculos formados no se eliminan en una etapa de decantación, dicha aglomeración puede reducir el rendimiento de la filtración multimedia o de la microfiltración posterior. Además, es importante tener en cuenta que estos productos químicos del pretratamiento que se incorporan a los aglomerados pueden convertirse en una fuente de fouling si no se eliminan antes de llegar a las membranas. Los residuales de los coagulantes pueden afectar negativamente al funcionamiento de las membranas. Los polímeros catiónicos, pueden coprecipitar

con antiincrustantes cargados negativamente siendo fuentes potenciales de fouling coloidal [14,15,16].

Otras opciones, aunque menos empleadas, que también pueden utilizarse para combatir el fouling coloidal son el intercambio iónico o los antiincrustantes. Los intercambiadores catiónicos fuertes no sólo eliminan la dureza sino también el hierro y el aluminio residuales que pueden provocar fouling. El agua ablandada presenta menor tendencia al fouling porque los cationes multivalentes promueven la adhesión de los coloides naturales, los cuales suelen tener carga negativa. Por otro lado, algunos inhibidores de incrustaciones pueden utilizarse cuando la concentración de hierro es baja. El control químico con antiincrustantes ofrece la posibilidad de eliminar los coloides que provocan fouling y no han sido eliminados con el pretratamiento. Productos con concentración menor de 10 ppm en la corriente de alimentación, permiten el control de varios tipos de coloides que producen fouling como el sulfuro coloidal, la sílice y los silicatos [17].

En el caso de aguas con elevada carga de materia orgánica, en general aguas con una elevada demanda química de oxígeno (DQO) o elevado valor del carbono orgánico total (TOC), cuando los orgánicos están en emulsión, pueden formar una película orgánica en la superficie de la membrana. Dicha adsorción de sustancias orgánicas en las membranas causa pérdidas de flujo, en algunos casos irreversibles. El proceso de adsorción se favorece con compuestos de alto peso molecular, cuando estos compuestos son hidrofóbicos o cargados positivamente. Por ello, esos orgánicos deben ser eliminados en el pretratamiento.

Los orgánicos presentes en aguas naturales suelen ser sustancias húmicas. El ácido húmico presente en el carbono orgánico disuelto es identificado como el factor más importante que contribuye a la formación de fouling [7, 18].

Los orgánicos también pueden provocar biofouling ya que dan lugar a condiciones que mejoran el crecimiento de microorganismos [19].

Para prevenir el fouling orgánico, el pretratamiento más común es la filtración a través de carbón activo granular seguido por cloración para inhibir el crecimiento biológico. La adsorción de la materia orgánica con carbón activo puede combinarse con tecnologías convencionales tales como, la coagulación-floculación y la sedimentación, o bien con pro-

cesos como la microfiltración o la ultrafiltración. Por otro lado, los antiincrustantes, con concentración menor de 10 ppm en la corriente de alimentación, permiten el control de varios tipos de coloides que contienen materia húmica contribuyendo a la prevención del fouling [7, 17].

Finalmente, está el biofouling que es la acumulación indeseada de un depósito microbiológico en una superficie. El tipo y cantidad de bacterias presentes en el agua depende de la fuente. Las aguas superficiales ofrecen una atmósfera perfecta para la proliferación de bacterias aerobias. Las características que favorecen el crecimiento son: temperaturas templadas, nutrientes abundantes, y muchos caminos para la inoculación.

El biofilm del fouling es una película orgánica compuesta de microorganismos vivos y muertos incrustados en una matriz polimérica hecha por ellos mismos, que consiste en polisacáridos excretados o exopolisacáridos. La mayoría de los microorganismos que producen exopolisacáridos utilizan carbohidratos como fuente de carbono y energía y sales de amonio o aminoácidos como fuente de nitrógeno. Las características de ciertas membranas de ósmosis inversa bajo condiciones adecuadas, pueden promover la formación de un biofilm en la superficie de la membrana. El tipo de membrana y los cationes monovalentes tienen gran influencia en la acumulación de biofouling. Por un lado, el biofouling disminuye con un incremento en la concentración de cationes monovalentes porque una elevada concentración del ión cloruro puede reprimir las enzimas de las bacterias para restringir el crecimiento bacteriano en disolución disminuyendo las bacterias presentes en el biofilm [18]. Por otro lado, ciertos tipos de membranas, como las de arrollamiento en espiral ofrecen una atmósfera ideal para el crecimiento de los microorganismos que forman el biofilm en la superficie de la membrana y en el material espaciador de la alimentación [20]. Además, ciertas propiedades de las membranas, tales como la rugosidad y el potencial zeta, también influyen en la formación de biofouling, siendo el potencial de ensuciamiento mayor cuanto menos rugosa sea la membrana y menor valor de potencial zeta presente [18].

El biofouling puede comenzar por una sola bacteria capaz de sobrevivir a la desinfección del pretratamiento. Una vez incrustadas en la masa de sus propias excreciones de polisacáridos, las bacterias pueden presentar resistencia a los biocidas que en solución las matarían. En consecuencia, una vez formado el biofilm es muy difícil de eliminar, incluso con desinfección o limpiezas químicas. Además los antiincrustantes empleados en el acondiciona-

miento de agua de alimentación a ósmosis, actúan como nutrientes para los microbios que crecen en las membranas, favoreciendo el biofouling.

El método más común para prevenir el fouling biológico es la cloración seguida por una dechloración [19, 20, 21], con lo cual se inactiva la mayoría de microorganismos patógenos. La efectividad depende de la concentración del cloro, el tiempo de exposición y del pH. La dechloración (generalmente mediante la adición de bisulfito sódico) debe llevarse a cabo antes de llegar a las membranas para protegerlas de la oxidación del cloro libre.

Sin embargo, en algunos casos, el problema del biofouling se agrava con la desinfección (cloración u ozonización) de la corriente de alimentación, ya que intentando desinfectar, se oxida una fuente de alimentación orgánica no bioasimilable a otra fuente que es asimilable. Además como no hay cloro presente en las membranas, los microorganismos pueden crecer con nutrientes. En el caso del ozono [19], se trata de un oxidante más fuerte que el cloro, pero se descompone rápidamente. Un cierto nivel de ozono debe mantenerse para matar a los microorganismos y al igual que ocurre con el cloro, la eliminación de ozono debe ser total para proteger a las membranas. Se suele utilizar radiación ultravioleta para eliminarlo.

Como alternativa a los sistemas de desinfección en continuo, se utilizan los tratamientos de choque como la aplicación de cloración off-line al pretratamiento periódicamente. Durante la cloración off-line, el agua de alimentación se envía a alcantarilla. Antes de que el sistema esté de nuevo en operación, todo el cloro del agua de alimentación debe ser eliminado. En otros casos, se utilizan choques intermitentes de biocida como DBNPA (2,2 dibromo-3-nitropropionamida). El permeado debe tirarse a alcantarilla durante su utilización porque puede contener elevados niveles de orgánicos [19].

Otras opciones de desinfección son, los lechos de carbón activo, activados biológicamente por el tratamiento de la alimentación con ozono, que eliminan prácticamente el 100% del carbono orgánico disuelto biodegradable [22, 23], pretratamientos que incluyen membranas de microfiltración o ultrafiltración, la radiación ultravioleta y la utilización de ciertas membranas de ósmosis inversa que son resistentes al fouling combinadas con choques periódicos de biocida [19,24].

### 1.3.3 Pretratamiento de agua de mar

La OI se utiliza cada vez más en todo el mundo para la desalación de agua de mar debido principalmente a las mejoras que se han conseguido en el rendimiento de las membranas de OI y su coste reducido en comparación con la desalación térmica.

Para conseguir un funcionamiento óptimo de las membranas de OI, es necesario la selección e implementación de procesos de pretratamiento apropiados para conseguir una eliminación efectiva y consistente de la materia en suspensión.

Se recomienda realizar un estudio detallado de la variabilidad del agua de alimentación (principalmente, variaciones en la concentración de los sólidos disueltos y en suspensión, contenido orgánico, potencial de actividad biológica y temperatura), restricciones del lugar y calidad del agua tratada antes de llevar a cabo la implementación de la tecnología más adecuada para el pretratamiento de la OI. Asimismo, una buena práctica es la obtención de datos del agua de mar a largo plazo.

El agua de mar presenta diferentes características físico-químicas dependiendo tanto de la situación geográfica como de la ubicación de la toma para el bombeo.

Según la situación geográfica, pueden distinguirse agua de mar de baja carga (contenido en sales de 35- 40 g/l, valores de SDI en el rango de 8 a 16, concentración media de boro de 5 mg/l y una variación de temperatura de 12 a 30°C) y agua de mar de alta carga (contenido en sales de 37- 46 g/l, valores de SDI mayores de 30, concentración media de boro que puede superar 5 mg/l, temperaturas mayores de 25°C la mayor parte del año, presencia de hidrocarburos y variación estacional de la concentración de sólidos en suspensión). En general, el agua del Mar Mediterráneo se considera de baja carga y la mayoría de los pretratamientos para su desalación mediante ósmosis inversa consisten en tecnologías convencionales (una etapa de cloración, proceso de coagulación/floculación, en línea o en cámaras de mezcla, y una etapa de filtración). Por otro lado, en el caso de agua de mar de alta carga, tales como aguas del Golfo Pérsico o del Mar de Omán, el pretratamiento puede consistir en tecnologías convencionales (en estos casos es necesario el proceso de coagula-

ción/floculación y una doble etapa de filtración incluyendo la adición de coagulante orgánico previo a los filtros o una coagulación/floculación con etapa de clarificación posterior seguidas por una doble etapa de filtración ) o bien en tecnologías de membranas (microfiltración o ultrafiltración) [9].

En función de la ubicación de la toma, se puede distinguir entre agua de pozo o toma abierta. En general, el agua de pozo es una fuente de alimentación consistente con una concentración baja de sólidos en suspensión, valores bajos de SDI (<2) y una carga microbológica baja. En este caso, mediante una única etapa de filtración o incluso simplemente con filtros de cartucho de 5  $\mu\text{m}$ , es posible conseguir valores de SDI menores de 3.

En el caso de las tomas abiertas, la optimización del pretratamiento es más compleja debido al alto contenido de sólidos en suspensión, los elevados valores de SDI, los metales precipitados, la materia orgánica, etc. así como a la variabilidad estacional. Por ello, el tipo de pretratamiento es el mismo que se ha mencionado anteriormente para el agua de mar altamente cargada [7, 25, 26].

#### **1.3.4 Pretratamiento de agua superficial**

El tipo y concentración de contaminantes de un agua superficial dependen de la fuente (ríos, lagos, pantanos, etc.) y generalmente, es rica en partículas, coloides en suspensión y materia orgánica.

El pretratamiento previo a una OI en el caso del tratamiento de aguas superficiales, debe conseguir la eliminación de toda la materia particulada tanto orgánica como inorgánica. Dicho pretratamiento no es siempre el mismo ni es fácil de definir a priori, siendo necesaria en ocasiones la realización de un pilotaje previo a la implantación a escala real. En general, las aguas procedentes de lagos o ríos son susceptibles a cambios rápidos en la carga de sólidos suspendidos y disueltos, siendo por ello aconsejable la obtención de datos a largo plazo del agua a tratar antes de seleccionar el tipo de pretratamiento.

Durante años, tal como también se ha indicado en el apartado 1.3.3, los tratamientos convencionales como la desinfección, coagulación, floculación, sedimentación, filtración

multimedia, filtración monocapa, filtros de carbón activo, doble etapa de filtración y filtros de cartucho, se han considerado adecuados como pretratamiento de OI. Sin embargo, tal como también ocurre en el tratamiento de agua de mar, hoy día los tratamientos basados en membranas (como microfiltración o ultrafiltración) también se consideran como opción de pretratamiento de OI [8,9].

## 1.4 PARÁMETROS DE MEDIDA DEL POTENCIAL DE ATASCAMIENTO DE UN AGUA.

### 1.4.1 Índice de densidad de sedimentos, SDI

Parámetros como la turbidez, la concentración de sólidos en suspensión y el recuento de partículas se utilizan habitualmente para indicar la concentración de partículas en el agua a tratar. Sin embargo, dichos parámetros no proporcionan información acerca de la resistencia de las partículas cuando éstas se depositan en las membranas de OI.

El SDI se aplica generalmente para predecir el potencial de atascamiento del agua de alimentación a OI así como para determinar la eficiencia de los procesos de pretratamiento. Según los estándares americanos para material de ensayo (ASTM) [27], el ensayo del SDI consiste en pasar el agua de alimentación a través de una membrana de microfiltración de 0,45  $\mu\text{m}$  a una presión constante (207 kPa) y determinar la velocidad de atascamiento de la membrana. El  $SDI_T$  se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$SDI_T = \frac{\%PF}{T} = \frac{\left[1 - \frac{t_i}{t_T}\right] \times 100}{T}$$

Donde  $t_i$  es el tiempo para recoger una muestra inicial filtrada a través de la membrana,  $t_T$  es el tiempo para recoger una segunda muestra después de un tiempo de filtración total (T) de 5, 10, o 15 minutos y el %PF es el porcentaje del factor de atascamiento. Las unidades del valor de SDI calculado son por tanto %/min, pero a lo largo del trabajo se ha tomado el criterio de indicar los valores calculados de SDI sin repetir las unidades para cada caso, como es lo habitual en la literatura científica. El volumen de muestra recogido es

normalmente de 500 ml y el SDI<sub>15</sub> (medido tras 15 minutos de filtración) es el SDI estándar.

En general, los fabricantes de membranas recomiendan un valor de SDI<sub>15</sub> menor de 3 pero consideran aceptables valores de 4 ó 5 [6, 9, 28]. Por ello, la mayoría de los estudios de pretratamiento se basan en un valor SDI<sub>15</sub> objetivo menor de 3.

Sin embargo, en el ASTM sólo se especifica que las membranas deben tener un tamaño de poro medio de  $0,45 \pm 0,02 \mu\text{m}$ , y los valores de SDI obtenidos con membranas de diferentes suministradores, que presenten diferencias en su morfología tales como la porosidad, pueden diferir.

Por otro lado, el ensayo del SDI es una medida estática de resistencia en la cual se asume que se produce una reducción lineal del flujo. Esta teoría permite conseguir buenos resultados cuando se trata de un agua bastante limpia ya que, en esos casos, los flujos inicial y final son similares. En cambio, la utilidad del SDI está limitada cuando se trata de aguas con alto potencial de ensuciamiento porque no permite la distinción de los diferentes mecanismos de filtración, y no es lineal con la concentración de partículas [29, 30, 31].

Para compensar las limitaciones que presenta el SDI, se propone un parámetro menos conocido, el índice de atascamiento modificado (MFI).

#### **1.4.2 Índice de atascamiento modificado, MFI**

El MFI es un parámetro basado en el mecanismo de filtración a través de la torta y tiene en cuenta el mecanismo de reducción de flujo que tiene lugar en las membranas. Por lo tanto, representa mejor las condiciones de operación de las membranas que el SDI y puede utilizarse para medir en aguas con alto y bajo potencial de ensuciamiento.

El MFI se determina en un ensayo de microfiltración con membrana de  $0,45 \mu\text{m}$ , a partir de una curva donde se representa la inversa del flujo ( $t/V$ ) frente al volumen acumulado ( $V$ ), el tiempo expresado en segundos y el volumen en litros, correspondiéndose con el gradiente de la zona lineal con mínima pendiente del gráfico. Las unidades de medida

del MFI son por tanto  $s/l^2$ . Generalmente, los volúmenes filtrados se miden cada 30 segundos durante un total de 15 minutos y, entonces, se representan en el gráfico  $t/V$  vs.  $V$ . La zona del gráfico considerada es la lineal, en la que se produce la filtración a través de la torta, excluyéndose la zona inicial que corresponde al bloqueo de la filtración, y la zonal final que considera la filtración a través de la torta con compresión.

En el caso de aguas con una elevada concentración coloidal, el gráfico  $t/V$  vs.  $V$  es menos lineal y, el cálculo del MFI se realiza a partir de la primera zonal lineal observada en el gráfico [32].

Los fabricantes de membranas recomiendan un valor de MFI menor de  $1 s/l^2$  para controlar el atascamiento de las membranas, con un valor máximo permitido de  $4 s/l^2$ . Además, la mayoría de estudios de MFI realizados se basan en un valor objetivo menor de  $1 s/l^2$  [21, 33, 34].

En la práctica, resulta más complejo el cálculo del MFI por lo que en la mayoría de los casos se opta por realizar únicamente la medida del SDI.

## 1.5 ORGANIZACIÓN DE LOS CONTENIDOS DEL TRABAJO

El presente estudio se plantea en la línea de optimización de los tratamientos previos a la OI basándose en el análisis de dos casos reales. En resumen, los capítulos siguientes se han estructurado como se indica a continuación:

- **CAPÍTULO 2: OBJETIVOS Y METODOLOGÍA**

Breve exposición de los objetivos marcados para el estudio y de la metodología empleada para conseguirlos. Dichos objetivos se reducen por un lado, a la determinación de la configuración óptima de pretratamiento para cada caso, y por otro, al establecimiento de las variables de control más adecuadas. En cuanto a la metodología, en ambos casos se trata de estudios experimentales en los cuales se han probado diferentes configuraciones de pretratamiento en plantas de demostración.

- **CAPÍTULO 3: PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA**

Descripción detallada del caso real estudiado en la desaladora de Carboneras. En resumen, se trata de un estudio de demostración en el cual se probaron cuatro configuraciones basadas en la combinación de los siguientes procesos de pretratamiento: Actiflo® (tratamiento físico-químico que consiste en un proceso de coagulación, seguido de una floculación con inyección de polímero y microarena, una etapa de maduración y, finalmente una decantación de los flóculos lastrados con la microarena), filtración multimedia a presión atmosférica, filtración bicapa presurizada y filtración tricapa a presión. Finalmente, se realiza el análisis estadístico de los resultados obtenidos con cada configuración para concluir cuál permite conseguir la calidad óptima y cuál o cuáles permiten alcanzar los requerimientos mínimos.

- **CAPÍTULO 4: PRETRATAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN PLANTA INDUSTRIAL**

Descripción detallada del caso real estudiado en una industria de acero (España). En este caso, se probaron diferentes configuraciones de pretratamiento, basadas en la combinación del tratamiento físico-químico existente con las diferentes etapas de filtración disponibles en la planta de demostración (filtración bicapa presurizada y/o filtración tricapa a presión). Al igual que en el caso de estudio anterior, se realiza el análisis estadístico de los resultados obtenidos con cada configuración determinando cuál es la que permite conseguir los mejores resultados y cuál llega a la calidad mínima requerida.

- **CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL DEL PRETRATAMIENTO SDI VS MFI**

Definición de los valores de referencia para los parámetros de control del pretratamiento teniendo en cuenta los límites establecidos para los estudios de demostración presentados en los capítulos 3 y 4, y según las recomendaciones de los fabricantes de membranas.

Posteriormente, se trata de establecer la posible existencia de una correspondencia entre los criterios basados en los parámetros SDI y MFI medidos para cada uno de los casos de estudio. Para ello, se han agrupado los datos en función de los valores límite ante-

riormente definidos, y se ha hecho un nuevo análisis estadístico de los parámetros mediante gráficos de probabilidad y gráficos de intervalos de confianza.

- **CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES E IMPLICACIONES PRÁCTICAS**

En este capítulo, se resumen las conclusiones obtenidas en cada caso de estudio, indicándose las configuraciones que permitieron obtener los mejores resultados así como aquellas que permitieron conseguir los requerimientos mínimos de calidad. Además, se incluyen una serie de implicaciones prácticas basadas en las recomendaciones de los fabricantes de membranas y en los resultados experimentales de los casos de estudio del presente trabajo.

- **CAPÍTULO 7: REFERENCIAS**

Recopilación de todas las referencias previamente incluidas en cada uno de los capítulos del trabajo.

- **ANEJOS**

Se incluyen los valores de SDI y MFI obtenidos en cada ensayo para las configuraciones de tratamiento estudiadas.

## 1.6 REFERENCIAS

- [1] P.C.Wankat, Rate-Controlled Separations, Blackie Academic and Professional, London, 1994.
- [2] N. Al.-Bastaki, A.Abbas, Long-term performance of an industrial water desalination plant, *Chemical Engineering and Processing* 43 (2004) 555-558.
- [3] Degrémont, Manual Técnico del Agua, 4ª ed. Española traducida del “Mémento Technique de l’eau”. Sociedad Degrémont, Artes gráficas Grijelmo S.A., Bilbao, 1979.
- [4] L. Malaeb, G.M. Ayoub, Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review, *Desalination* 267 (2011) 1-8.
- [5] Manual del Ingeniero Químico volumen IV, 4ª ed. Española traducida de la 7ª ed. de “Perry’s Chemical Engineers Handbook”. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U., Madrid, 2001.
- [6] K.T. Chua, M.N.A. Hawlader and A. Malek, Pretreatment of seawater: results of pilot trials in Singapore, *Desalination*, 159 (2003) 225-243.
- [7] J.A. Redondo, I. Lomax, Y2K generation FILMTEC RO membranes combined with new pretreatment techniques to treat raw water with high fouling potential: summary of experience, *Desalination* 136 (2001) 287-306.
- [8] S. Gare, RO systems: The importance of pretreatment, *Filtr. Separat.*, January/February (2002) 22-27.
- [9] K. Gaid, Y. Treal, Le dessalement des eaux par osmose inverse: l’expérience de Véolia Water, *Desalination* 203 (2007) 1-14.
- [10] B. Durham, A. Walton, Membrane pretreatment of reverse osmosis: long term experience on difficult waters, *Desalination* 122 (1999) 157-170.
- [11] C.J. Gabelich, T.I. Yun, B.M.Coffey, I.H.M. Suffet, Pilot scale testing of reverse osmosis using conventional treatment and microfiltration, *Desalination* 154 (2003) 207-223.
- [12] R. Rosberg, Ultrafiltration (new technology), a viable cost-saving pretreatment for reverse osmosis and nanofiltration, a new approach to reduce costs, *Desalination* 110 (1997) 107-114.

- [13] H. Bae, H. Kim, S. Jeong, S. Lee, Changes in the relative abundance of biofilm-forming bacteria by conventional sand-filtration and microfiltration as pretreatments for seawater reverse osmosis desalination, *Desalination* 273 (2011) 258-266.
- [14] C.J. Gabelich, T. I. Yun, K. P. Ishida, M. B. Leddy, J. Safarik, The effect of naturally occurring biopolymers on polyamide membrane fouling during surface water treatment, *Desalination* 161 (2004) 263-276.
- [15] C.J. Gabelich, T. I. Yun, B. M. Coffey, I. H. Suffet, Effects of aluminum sulfate and ferric chloride coagulant residuals on polyamide membrane performance, *Desalination* 150 (2002) 15-30.
- [16] N. Voutchkov, Considerations for selection of seawater filtration pretreatment system, *Desalination* 261 (2010) 354-364.
- [17] R. Y. Ning, T. L. Troyer, R. S. Tominello, Chemical control of colloidal fouling of reverse osmosis systems, *Desalination* 172 (2005) 1-6.
- [18] W. Peng, I. C. Escobar, D. B. White, Effects of water chemistries and properties of membrane on the performance and fouling, a model development study, *Journal of Mem. Sci.*, 238 (2004) 33-46.
- [19] T. Bagwell, *Handbook of Public Water Systems*, John Wiley and sons, 2001.
- [20] M. Al-Ahmad, F. A. A. Aleem, A. Mutiri, A. Ubaisy, Biofouling in RO membrane systems Part 1: Fundamentals and control, *Desalination* 132 (2000) 173-179.
- [21] Dow Water & Process Solutions, *FILMTEC™ Reverse Osmosis Membr. Tech. Man.*, 2009.
- [22] C. Visvanathan, N. Boonthanon, A. Sathasivan, V. Jegatheesan, Pretreatment of seawater for biodegradable organic content removal using membrane bioreactor, *Desalination* 153 (2003) 133-140.
- [23] J. P. van der Hoek, J. A. M. H. Hofman, P. A. C. Bonn e, M. M. Nederlof, H. S. Vrouwenvelder, RO treatment: selection of a pretreatment scheme based on fouling characteristics and operating conditions based on environmental impact, *Desalination* 127 (2000) 89-101.
- [24] J. A. Redondo, Improve RO system performance and reduce operating cost with FILMTEC fouling-resistant (FR) elements, *Desalination* 126 (1999) 249-259.
- [25] M. Galloway, J. Mahoney, Ultrafiltration for seawater reverse osmosis pretreatment, *Membr. Technol.*, January (2004) 5-8.

- [26] T. Peters, D. Pintó, Seawater intake and pretreatment/brine discharge environmental issues, *Desalination* 221 (2008) 576-584.
- [27] ASTM, D 4189-95, Standard Test Method for Silt Density Index (SDI) of Water, West Conshohocken, PA, 1995.
- [28] C.K. Teng, M.N.A. Hawlader, A. Malek, An experiment with different pretreatment methods, *Desalination* 156 (2003) 51-58.
- [29] J. C. Schippers, J. Verdouw, The modified fouling index, a method of determining the fouling characteristics of water, *Desalination* 32 (1980) 137-148.
- [30] A. Casañas, J. Sanz, E. Taberna, L. Guerrero, J.M. Ortega, Predicción del ensuciamiento coloidal en sistemas de ósmosis inversa y nanofiltración. Aplicación del índice de atascamiento modificado (MFI), *Tecnología del Agua* 257 (2005) 54-60.
- [31] S.F.E. Boerlage, Understanding the SDI and modified fouling indices (MFI<sub>0,45</sub> and MFI<sub>UF</sub>), Proceedings of IDA World congress MP07-143, Maspalomas, Spain, 2007.
- [32] E. Brauns, E.V. Hoof, B. Molenberghs, C. Dotremont, W. Doyen, R. Leysen, A new method of measuring and presenting the membrane fouling potential, *Desalination* 150 (2002) 31-43.
- [33] M.M Nederlof, J.C. Kruithof, J.A.M.H. Hofman, M. Koning, J.P. Van der Hoek, P.A.C. Bonn e, Integrated multi objective membrane systems application of reverse osmosis at the Amsterdam Water Supply, *Desalination* 119 (1998) 263-273.
- [34] S.F.E. Boerlage, M.D. Kennedy, M.P. Aniye, E.M. Abogrean, D.E.Y El-Hodali, Z.S. Tarawneh, J.C. Schippers, Modified Fouling Index ultrafiltration to compare pretreatment processes of reverse osmosis feedwater, *Desalination* 131 (2000) 201-214.

## **CAPÍTULO 2**

### **OBJETIVOS Y METODOLOGÍA**



ÍNDICE

<b>2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>43</b>
2.1 OBJETIVOS .....	43
2.2 METODOLOGÍA .....	43



## **2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA**

### **2.1 OBJETIVOS**

En el presente trabajo se plantean dos objetivos en relación con los procesos de pretratamiento de agua de alimentación a OI:

1. Establecer las configuraciones óptimas de pretratamiento de agua para reducir el potencial ensuciamiento de las membranas de OI en dos casos diferenciados:

- Tratamiento de agua de mar para potabilización en una planta desaladora
- Tratamiento de agua de embalse para obtención de agua industrial.

2. Establecer las mejores variables de control del pretratamiento y determinar si existe alguna correspondencia entre ellas. De esta forma, se podrá concluir si para dichas aplicaciones sería suficiente con conocer el valor de unos de los parámetros para determinar la línea de tratamiento necesaria.

### **2.2 METODOLOGÍA**

El estudio se ha basado en el análisis de los resultados obtenidos en dos casos reales:

1. En la desaladora de Carboneras (Almería, España).
2. En una industria de acero (España).

Al tratarse de estudios experimentales independientes y en distintas localizaciones, en los capítulos 3 y 4 se describe con detalle la metodología experimental y de análisis de resultados para cada uno de ellos. No obstante, la metodología de los dos casos presenta varios aspectos en común que se resumen a continuación.

En ambos casos se han probado diferentes configuraciones de pretratamiento, basadas en la combinación de un tratamiento físico-químico seguido por una doble etapa de filtración incluyendo ésta, filtros bicapa presurizados seguidos por filtros tricapa también presurizados.

También en los dos casos, se ha probado la dosificación de productos químicos, tanto en el proceso físico-químico previo como antes de las etapas de filtración. Dichas dosificaciones, se han adaptado a cada caso concreto en lo que se refiere a tipo de reactivos y dosis de los mismos.

En cuanto al análisis de resultados, en ambos casos se basó en parámetros estadísticos. Los resultados de los ensayos, basados en los valores de los parámetros de SDI y MFI, se evaluaron en gráficos de probabilidad con una distribución normal y manteniendo intervalos de confianza del 95%. En dichos gráficos se representan los valores de SDI ó MFI medidos tanto para le agua bruta como para el agua filtrada frente a los percentiles correspondientes (valor que indica el porcentaje de la distribución que es igual o menor a dicho valor).

Del análisis de resultados se determinan los tratamientos óptimos en cada caso de acuerdo con los objetivos planteados en términos de ensuciamiento.

Por otro lado, se han empleado los resultados de ambas experiencias para comprobar si existe una correspondencia entre los criterios basados en los parámetros SDI y MFI, empleados para medir la eficiencia de los procesos de pretratamiento. Para comprobar dicha correspondencia, se agrupan los datos obtenidos con cada configuración estudiada en función de rangos de valores predefinidos según los valores límite establecidos. Posteriormente, se analizan los valores de ambos parámetros para cada uno de los grupos indicados y, mediante gráficos de probabilidad y gráficos de intervalos de confianza, se establece si existe la correspondencia entre ambos criterios para cada caso.

**CAPÍTULO 3**

**PRETRATAMIENTO DE AGUA DE**

**MAR EN DESALADORA**



## ÍNDICE

<b>3. PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA .....</b>	<b>49</b>
3.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	49
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE DEMOSTRACIÓN .....	49
3.3 CONFIGURACIONES ESTUDIADAS .....	51
3.3.1 Configuración 1 .....	51
3.3.2 Configuración 2 .....	52
3.3.3 Configuración 3 .....	52
3.3.4 Configuración 4 .....	52
3.4 METODOLOGÍA .....	53
3.4.1 Muestreo y Análisis .....	53
3.4.2 Criterio de Clasificación de los Ensayos .....	54
3.4.3 Análisis Estadístico .....	55
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	57
3.5.1 Agua Bruta en Carboneras .....	57
3.5.2 Membranas para la Medida del SDI y MFI .....	59
3.5.3 Clasificación de la Secuencia de Resultados .....	59
3.5.4 Resultados de la Configuración 1 .....	62
3.5.5 Resultados de la Configuración 2 .....	65
3.5.6 Resultados de la Configuración 3 .....	68
3.5.7 Resultados de la Configuración 4 .....	70
3.6 CONCLUSIONES .....	73
3.7 REFERENCIAS .....	75



### **3. PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA**

#### **3.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

El análisis de las opciones de pretratamiento de agua de mar para alimentación de una OI se basa en los resultados obtenidos en un estudio de demostración llevado a cabo en la desaladora de Carboneras (Almería, España) durante 40 semanas. Como ya se indicó en el Capítulo 2, uno de los objetivos era probar diferentes configuraciones de pretratamiento de OI para establecer el límite de cada proceso así como su fiabilidad. Para ello, se probaron cuatro configuraciones basadas en la combinación de los siguientes procesos de pretratamiento: Actiflo® (tratamiento físico-químico que consiste en un proceso de coagulación, seguido de una floculación con inyección de polímero y microarena, una etapa de maduración y, finalmente una decantación de los flóculos lastrados con la microarena), filtración multimedia a presión atmosférica, filtración bicapa presurizada y filtración tricapa a presión.

Una vez concluidos los ensayos, se analizaron los valores de SDI y MFI obtenidos con las diferentes configuraciones. Considerando las garantías de las membranas, se establecieron los siguientes valores objetivo para la calidad del agua pretratada:

- i) valor máximo de SDI de 5
- ii) valor máximo de SDI de 4
- iii) valor de SDI menor que 3
- iv) valor máximo de MFI de  $4 \text{ s/l}^2$
- v) valor de MFI menor que  $1 \text{ s/l}^2$

#### **3.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE DEMOSTRACIÓN**

El agua bruta estudiada procedía de una toma abierta de mar en Carboneras (Almería, España), situada aproximadamente a 15 metros bajo el nivel del mar y a 150 m de la costa.

En la figura 3.1 se muestra un esquema de la planta de demostración, que incluía: un bombeo de agua de mar desde la cámara de entrada a la línea de pretratamiento en la planta de demostración; ajuste de pH; sistema Actiflo®; un filtro multimedia a presión atmosférica; dos filtros multimedia presurizados en serie y un sistema de ósmosis inversa que consistía en 7 membranas de 8” en serie. Además, había tanques intermedios y bombes que permitían probar diferentes configuraciones para el pretratamiento de la ósmosis inversa. Aunque en la cámara de entrada se podía adicionar NaClO para la desinfección, durante el estudio de demostración no se utilizó.

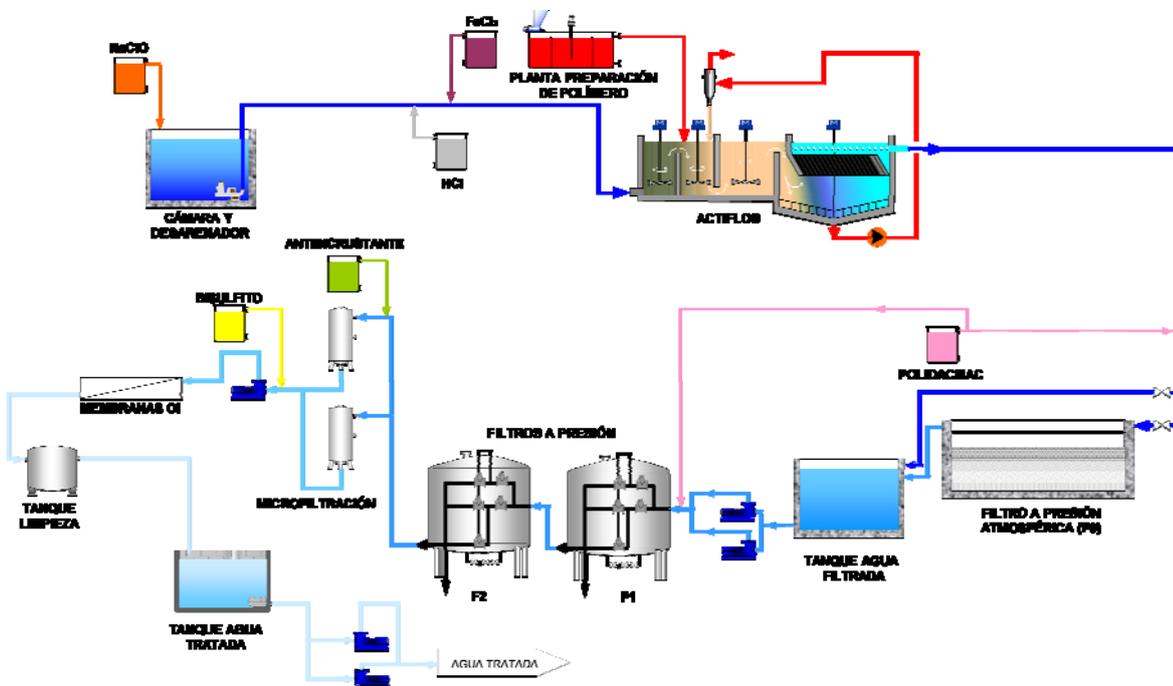


Figura 3.1.- Diagrama de flujo de la planta de demostración

Los reactivos que se probaron, fueron seleccionados de acuerdo a los resultados de optimización obtenidos en otros estudios previos realizados por Veolia. Se utilizaron los siguientes productos químicos: ácido clorhídrico para la corrección de pH; sales de Fe ó Al como coagulantes inorgánicos,  $\text{FeCl}_3$  (40%  $\text{FeCl}_3$ ) y Hydrex 3240 (17,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); poli-DADMAC (PD340 y PD420) como coagulantes orgánicos y floculantes (Hydrex 6111 y Hydrex 3551). Durante los primeros ensayos, el coagulante en base aluminio fue desechado debido a los malos resultados obtenidos, por lo que la mayoría de los ensayos se realiza-

ron utilizando  $\text{FeCl}_3$  como coagulante. En el proceso Actiflo<sup>®</sup>, también se utilizó microarena para conseguir flóculos más pesados (tamaño efectivo de la microarena  $d_{10} = 80 \mu\text{m}$ , con un coeficiente de uniformidad de 1,5).

Durante la operación normal de la planta de demostración, se bombeaba el agua de mar desde la cámara de entrada, incluyéndose una dosificación de ácido clorhídrico en línea cuando el ajuste de pH era necesario. Después, se añadía un coagulante antes de que el agua entrara en el sistema Actiflo<sup>®</sup> (o en un tanque auxiliar). En el sistema Actiflo<sup>®</sup>, se añadía el floculante y la microarena y entonces, una vez decantada, el agua pasaba a la etapa de filtración con o sin dosificación previa de coagulante orgánico. Esta etapa consistía en un filtro multimedia a presión atmosférica o un filtro bicapa presurizado, ambos seguidos por un filtro tricapa presurizado. En una de las configuraciones probadas, la coagulación se realizó en línea, sin ningún tanque de coagulación previo a la filtración.

### 3.3 CONFIGURACIONES ESTUDIADAS

Los siguientes apartados describen las diferentes configuraciones que fueron estudiadas en este trabajo.

#### 3.3.1 Configuración 1

Esta configuración consiste en el sistema Actiflo<sup>®</sup> seguido por un filtro multimedia a presión (F0) y un filtro tricapa presurizado (F2) en serie. El caudal de entrada al Actiflo<sup>®</sup> fue de  $106 \text{ m}^3/\text{h}$  (velocidad ascensional de 40 m/h en el decantador) y la velocidad de filtración estuvo en el rango de 8 a 10 m/h. El pH se ajustó en el rango de 6,6 a 7,2. En este caso, los coagulantes utilizados para la coagulación en línea, previa al sistema Actiflo<sup>®</sup>, fueron  $\text{FeCl}_3$  o Hydrex 3240. Para la etapa de floculación, se usaron el Hydrex3551 o el Hydrex 6111. En esta configuración, la filtración se ensayó sin dosificación química previa.

### 3.3.2 Configuración 2

Esta configuración consiste en el sistema Actiflo<sup>®</sup> seguido por dos filtros multimedia presurizados, bicapa (F1) y tricapa (F2) en serie. El caudal de entrada al Actiflo<sup>®</sup> fue de 106 m<sup>3</sup>/h (velocidad ascensional de 40 m/h en el decantador) y la velocidad de filtración estuvo en el rango de 8 a 10 m/h. El pH se ajustó en el rango de 6,6 a 7,2. En este caso, el coagulante utilizado para la coagulación en línea, previa al sistema Actiflo<sup>®</sup>, fue FeCl<sub>3</sub>. Para la etapa de floculación, se usó el Hydrex3551. En la filtración, se ensayó la dosificación química, añadiendo un coagulante catiónico (PD340 ó PD420) antes de F1.

### 3.3.3 Configuración 3

Esta configuración consiste en dos filtros multimedia presurizados, bicapa (F1) y tricapa (F2) en serie. La velocidad de filtración estuvo en el rango de 8 a 10 m/h. El pH se ajustó en el rango de 6,6 a 8,2. En este caso, el coagulante utilizado para la coagulación en línea, previa a los filtros, fue FeCl<sub>3</sub>. Se añadió un coagulante catiónico (PD340) antes de los filtros F1 y/o F2 y se realizaron algunos ensayos añadiendo al filtro F2 el floculante Hydrex3551 en lugar del coagulante catiónico (PD340). En este caso, el primer filtro (F1) funciona como una etapa de coagulación y el segundo (F2) como un tratamiento de afino.

### 3.3.4 Configuración 4

Esta configuración consiste en una etapa de coagulación, con el sistema Actiflo<sup>®</sup> sin adición de floculante ni microarena o sólo con un tanque auxiliar, seguido por dos filtros multimedia presurizados, bicapa (F1) y tricapa (F2) en serie. El caudal de entrada al Actiflo<sup>®</sup> fue de 106 m<sup>3</sup>/h (velocidad ascensional de 40 m/h en el decantador) y la velocidad de filtración estuvo en el rango de 10 a 15 m/h. El pH se ajustó en el rango de 7,2 a 7,3. En este caso, el coagulante utilizado para la etapa de coagulación, fue FeCl<sub>3</sub>. En algunos ensayos, se añadió el coagulante catiónico (PD340) en el sistema Actiflo<sup>®</sup>. En la filtración, se ensayó la dosificación química, añadiendo un coagulante catiónico (PD340) antes de F1.

### **3.4 METODOLOGÍA**

#### **3.4.1 Muestreo y Análisis**

Cada configuración de pretratamiento se evaluó inicialmente durante una semana. Después, las configuraciones se repitieron a lo largo de las 40 semanas que duró el estudio de demostración para obtener resultados con agua bruta en diferentes condiciones. En cada ensayo se midieron tanto el SDI como el MFI.

Se utilizaron medidores en línea incluyendo, sensores de presión, caudalímetros, pHmetros y sensores de nivel, para monitorear y controlar el proceso vía un sistema SCADA.

Los valores de SDI y los datos para determinar el MFI se midieron con un analizador automático que consistía en dos botellas para recogida del agua, un conjunto de regulación, tuberías y válvulas, básculas de medición, un cuadro eléctrico con pantalla táctil y un compresor. Aunque algunas medidas se realizaron con dos membranas diferentes (Millipore HAWP y Pall Tuffryn) ambas con un tamaño de poro de 0,45  $\mu\text{m}$ , tal como se muestra en la figura 3.2, todos los resultados de los ensayos se basan en las medidas realizadas con la membrana HAWP de Millipore. Se midieron los valores de SDI y MFI tanto del agua bruta como del agua filtrada (en el efluente de cada filtro en operación) para cada una de las configuraciones ensayadas.

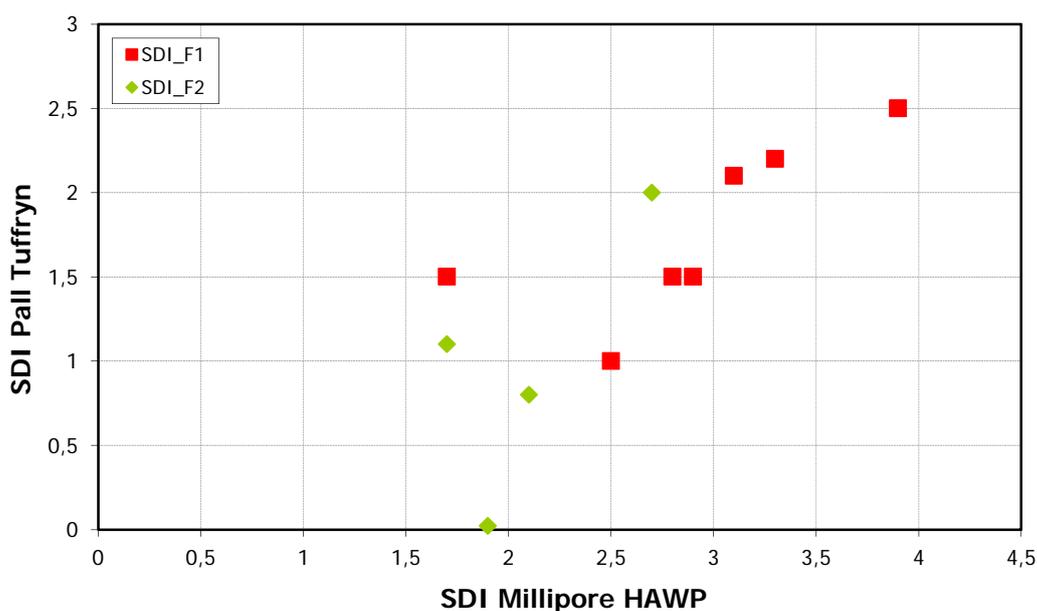


Figura 3.2.- Datos de SDI medidos con diferentes membranas

En algunas muestras puntuales tanto del agua bruta como del agua tratada también se midieron el hierro (por espectrofotometría, dos veces al día) y el adenosin trifosfato de las células vivas presentes en el agua (por bioluminiscencia, una vez por semana). Del mismo modo, durante diferentes períodos, se realizaron análisis más exhaustivos de muestras puntuales del agua bruta pero no son objeto del presente estudio.

### 3.4.2 Criterio de Clasificación de los Ensayos

Se definió un criterio de nomenclatura para clasificar las diferentes configuraciones ensayadas y para simplificar el análisis de resultados. El criterio se basa en tres números (X.Y.Z) para caracterizar cada ensayo. En la Tabla 3.1 se resumen los valores de cada ensayo. El primer número (X) indica el rango de SDI del agua bruta. El segundo valor (Y) se refiere a los elementos o unidades que constituyen el proceso de pretratamiento: como ya se ha comentado, se estudiaron cuatro configuraciones diferentes. El tercer valor (Z) se refiere a la dosificación química que se ensayó en el proceso. Hay varios ensayos para cada configuración. Finalmente, como había muchas muestras para cada ensayo, se llamó medida al resultado obtenido en cada muestra.

Tabla 3.1.- Nomenclatura (X, Y, Z)

Número	Valor	Significado
X: SDI agua bruta	1	$4.5 < \text{SDI agua bruta} < 7.5$
	2	$7.5 < \text{SDI agua bruta} < 14$
	3	$14 < \text{SDI agua bruta} < 25$
Y: Configuración	1	Actiflo (AF) + Filtro a presión atmosférica (F0) + Filtro tricapa presurizado (F2)
	2	Actiflo (AF) + Filtro bicapa presurizado (F1) + Filtro tricapa presurizado (F2)
	3	Filtración a presión directa (F1+F2)
	4	Coagulación* + Filtro bicapa presurizado (F1) + Filtro tricapa presurizado (F2)
Z: Ensayo	1--9	Combinación de diferentes dosis de reactivos

\* Adición de coagulante al Actiflo (AF) o al tanque de coagulación auxiliar (CT).

### 3.4.3 Análisis Estadístico

Generalmente, la evaluación de los procesos de tratamiento de agua se basa en su capacidad para obtener la calidad requerida durante un período de tiempo, así como en su fiabilidad para conseguir dicha calidad a lo largo del tiempo. Para estudiar tanto la capacidad como la fiabilidad de los tratamientos, pueden representarse los resultados en un gráfico de probabilidad. El gráfico permite verificar el grado de ajuste de los datos a una distribución de probabilidad determinada y visualizar, no sólo la variabilidad de los resultados del tratamiento sino también la fiabilidad de los mismos, por medio de algunos parámetros estadísticos como la media y la desviación estándar [1,2].

En este caso, sólo se tuvieron en cuenta para el análisis estadístico los valores de SDI y de MFI menores que 5. Estos resultados experimentales se evaluaron en gráficos de probabilidad con una distribución normal utilizando el software Minitab<sup>®</sup> [3]. Solamente se consideraron válidos los ensayos con fiabilidad de al menos un 90% con un intervalo de confianza (CI) de al menos un 95%. Considerando el criterio mencionado, tal y como puede verse en la tabla 3.2, para las conclusiones del estudio sólo se tuvieron en cuenta 26 ensayos .

Tabla 3.2.- Resumen de ensayos

Referencia	Configuración	Filtración (m/h)	pH	FeCl <sub>3</sub> (mg/l)	Floculante (mg/l)	PoliDADMAC (mg/l)	
						F1	F2
1.2.6	AF+F1+F2	10	6.6	10	Hydrex 3551(0.05)	PD340 (1)	0
1.3.1	F1+F2	10	8.2	0	0	PD340 (1)	0
1.3.2	F1+F2	10	8.2	0	0	PD340 (1)	PD340 (1)
1.3.4	F1+F2	10	6.6	3	0	0	PD340 (1)
1.4.2	AF+F1+F2	10	7.3	3	0	0	0
2.1.1	AF+F0+F2	10	7.2	H3240 (10)*	Hydrex 6111(0.05)	0	0
2.1.3	AF+F0+F2	8	6.6	12	Hydrex 3551(0.05)	0	0
2.1.4	AF+F0+F2	10	7.2	0	0	0	0
2.2.5	AF+F1+F2	10	6.6	6	Hydrex 3551(0.05)	PD340 (1)	0
2.2.7	AF+F1+F2	10	6.9	6	Hydrex 3551(0.05)	PD340 (1)	0
2.2.8	AF+F1+F2	10	7.2	3	Hydrex 3551(0.05)	PD340 (1)	0
2.2.9	AF+F1+F2	8	7.2	1.5	Hydrex 3551(0.05)	PD340 (1)	0
2.3.3	F1+F2	10	6.9	0	0	PD340 (1)	PD340 (1)
2.3.5	F1+F2	10	8.2	0	0	PD340 (1)	0
2.3.6	F1+F2	8	8.2	0	0	PD340 (0.5)	PD340 (0.5)
2.3.7	F1+F2	8	7.2	3	0	PD340 (1)	0
2.3.9	F1+F2	10	6.6	2	0	0	Hydrex** 3551(0.02)
2.4.4	AF+F1+F2	10	7.2	3	0	PD340 (1)	0
2.4.8	CT+F1+F2	15	7.2	3	0	PD340 (1)	0
3.2.1	AF+F1+F2	10	6.6	12	Hydrex 3551(0.05)	0	0
3.2.2	AF+F1+F2	10	6.6	6	Hydrex 3551(0.05)	0	0
3.2.3	AF+F1+F2	10	6.6	6	Hydrex 3551(0.05)	PD420 (1)	0
3.2.4	AF+F1+F2	10	6.6	6	Hydrex 3551(0.05)	PD340 (1)	0
3.4.3	AF+F1+F2	10	7.3	3	0	PD340 (1)	0
3.4.5	AF+F1+F2	15	7.2	3	0	PD340 (1)	0
3.4.6	AF+F1+F2	15	7.2	3	PD340 (0.5)	0	0

\* Adición de coagulante Hydrex3240 en lugar de FeCl<sub>3</sub>.

\*\* Adición de floculante Hydrex3551 en lugar de PoliDADMAC.

Aunque en el análisis de resultados se consideraron las configuraciones que consiguieron los objetivos i), ii) y iv), es decir, valores máximos de SDI de 4 ó 5 y de MFI de 4  $s/l^2$ , se adoptaron como las más adecuadas aquellas que permitieron obtener los valores indicados en iii) y v) que a su vez, se corresponden con valores máximos de SDI y MFI de 3 y 1  $s/l^2$ , respectivamente.

## **3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.5.1 Agua Bruta en Carboneras**

El agua en Carboneras se caracteriza por una turbidez baja ( $< 1$  NTU) y una concentración de sólidos en suspensión baja ( $< 2$  mg/l), típicas del Mediterráneo [4].

En las figuras 3.3 y 3.4 se muestran, respectivamente, los datos correspondientes al SDI y MFI medidos en el agua bruta en Carboneras durante el estudio de demostración. Se puede observar un aumento importante de los valores tanto de SDI como de MFI entre las semanas 11 y 20 que se corresponde con un episodio estacional en el que se produjeron movimientos del suelo marino, dando lugar a un incremento de la turbidez del agua. En general, el resto de valores no presentaron una variación estacional significativa.

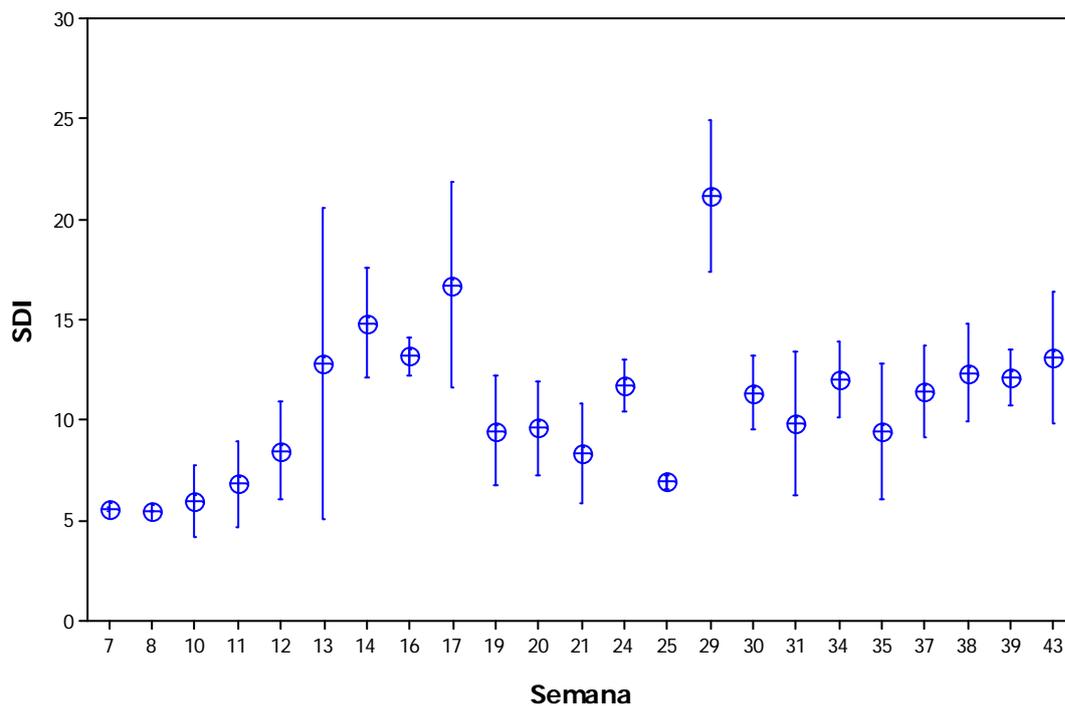


Figura 3.3.- Datos de SDI de entrada a planta (intervalo de confianza 95% para la media)

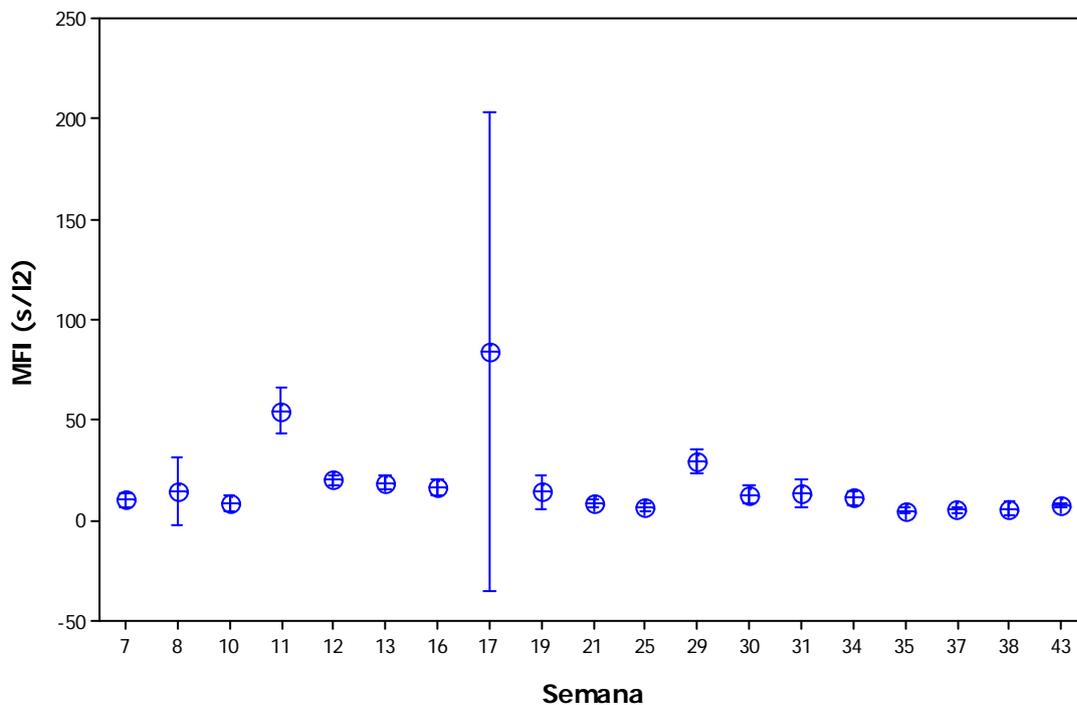


Figura 3.4.- Datos de MFI de entrada a planta (intervalo de confianza 95% para la media)

### **3.5.2 Membranas para la Medida del SDI y MFI**

Los resultados obtenidos en la medida del SDI del efluente de los filtros multimedia, utilizando membranas HAWP de Millipore y Tuffryn de Pall, mostraron que el tipo de membrana utilizada en la medida puede tener influencia en el valor de SDI (Figura 3.2). Estos datos permitieron confirmar que, a pesar de que los valores de SDI obtenidos con ambos tipos de membrana presentaban un perfil similar, los valores de SDI obtenidos en un mismo ensayo con membranas de diferentes suministradores no pueden compararse.

### **3.5.3 Clasificación de la Secuencia de Resultados**

Los 26 ensayos considerados en el estudio, que pueden verse en las tablas 3.3 y 3.4, se clasificaron en 6 grupos de acuerdo con los valores de SDI y MFI en el efluente de los filtros (F1 y F2). En cada ensayo, se utilizaron los símbolos ✓ y – para indicar que se habían conseguido o no los valores de SDI y MFI, respectivamente. Algunas medidas no pudieron realizarse y se representaron con un blanco.

Tabla 3.3.- Clasificación de resultados de SDI según los objetivos

Referencia	SDI<5 (F2)	SDI<5 (F1)	SDI<4 (F2)	SDI<4 (F1)	SDI<3 (F2)	SDI<3 (F1)
2.2.8	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2.2.9	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2.4.4	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3.4.3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3.4.5	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2.4.8	✓		✓		✓	
1.4.2	✓	✓	✓	✓	✓	-
2.2.7	✓	✓	✓	✓	✓	-
3.4.6	✓	✓	✓	-	✓	-
2.3.7	✓	-	✓	-	✓	-
3.2.4	✓	✓	✓	-	✓	-
1.2.6	✓	✓	✓	✓	-	-
2.3.6	✓	✓	-	✓	-	-
3.2.3	✓	✓	-	✓	-	-
2.2.5	✓	✓	✓	✓	-	✓
2.3.5	✓	✓	✓	✓	-	-
2.1.3	✓	-	✓	-	-	-
1.3.4	✓	✓	✓	-	-	-
3.2.1	✓	-	✓	-	-	-
3.2.2	✓	-	✓	-	-	-
1.3.1	✓	✓	-	-	-	-
1.3.2	✓	✓	-	-	-	-
2.3.3	✓	✓	-	-	-	-
2.3.9	✓	-	-	-	-	-
2.1.1	✓	-	-	-	-	-
2.1.4	✓	-	-	-	-	-

Tabla 3.4.- Clasificación de resultados de MFI según los objetivos

Referencia	MFI<5 s/l <sup>2</sup> (F2)	MFI<5 s/l <sup>2</sup> (F1)	MFI<4 s/l <sup>2</sup> (F2)	MFI<4 s/l <sup>2</sup> (F1)	MFI<1 s/l <sup>2</sup> (F2)	MFI<1 s/l <sup>2</sup> (F1)
2.2.8	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2.2.9						
2.4.4	✓	✓	✓	✓	✓	-
3.4.3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3.4.5	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2.4.8	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1.4.2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2.2.7	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3.4.6	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2.3.7	✓	✓	✓	✓	✓	-
3.2.4	✓	✓	✓	✓	-	-
1.2.6	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2.3.6	✓	✓	✓	✓	-	-
3.2.3	✓	✓	✓	✓	-	-
2.2.5	✓	✓	✓	✓	-	-
2.3.5	✓	✓	✓	✓	-	✓
2.1.3	✓	✓	✓	✓	-	-
1.3.4	✓	✓	✓	✓	-	-
3.2.1	✓	-	✓	-	-	-
3.2.2	✓	-	✓	-	-	-
1.3.1	✓	✓	-	-	-	-
1.3.2	✓	✓	-	-	-	-
2.3.3	✓	✓	✓	-	-	-
2.3.9	✓	✓	-	-	-	-
2.1.1	-	-	-	-	-	-
2.1.4	-	-	-	-	-	-

En las secciones siguientes se presenta información más detallada de los resultados obtenidos con cada una de las configuraciones, así como con las diferentes condiciones en cada ensayo (p.e. calidad del agua de entrada, ajuste de pH, caudal de entrada, dosificación química).

### 3.5.4 Resultados de la Configuración 1

Como se ha comentado previamente, los resultados de SDI y MFI de cada configuración se evaluaron en gráficos de probabilidad con una distribución normal y manteniendo intervalos de confianza del 95%. En cada gráfico se representan los valores de SDI ó MFI medidos tanto para el agua bruta como para el agua filtrada frente a los percentiles correspondientes (valor que indica el porcentaje de la distribución que es igual o menor a dicho valor). En el área del gráfico de cada distribución de datos, aparecen, por un lado, una línea central que representa el percentil esperado de la distribución. Por otro lado, aparecen líneas discontinuas a la izquierda y derecha de la línea central formadas uniendo los límites superior e inferior respectivamente del intervalo de confianza para los percentiles. Además, en las tablas 3.5 y 3.6 se muestran los principales parámetros estadísticos para la distribución seleccionada en cada configuración tales como la media, la desviación estándar (StDev), el número de muestras (N), el parámetro Anderson-Darling ajustado (AD) y el coeficiente de correlación de Pearson (P).

Tabla 3.5.- Parámetros estadísticos ensayos SDI

Configuración	Ensayo	Grupo de datos	Media	StDev	N	AD	P
Configuración 1	Ensayo 2.1.3	SDI agua bruta	11.4	2.8	4	0.750	0.013
		SDI efluente F0	8.3	5.6	6	0.880	0.010
		SDI efluente F2	2.9	0.6	8	0.334	0.410
Configuración 2	Ensayo 2.2.9	SDI agua bruta	9.3	1.6	6	0.655	0.044
		SDI efluente F1	2.4	0.3	6	0.176	0.863
		SDI efluente F2	2.1	0.4	7	0.816	0.017
Configuración 3	Ensayo 2.3.7	SDI agua bruta	12.6	1.5	5	0.616	0.047
		SDI efluente F1	4.8	0.5	3	0.221	0.512
		SDI efluente F2	2.0	0.2	3	0.220	0.514
Configuración 4	Ensayo 3.4.5	SDI agua bruta	12.8	1.3	8	0.207	0.796
		SDI efluente F1	2.1	0.4	7	0.247	0.630
		SDI efluente F2	2.1	0.5	9	0.202	0.822

Tabla 3.6.- Parámetros estadísticos ensayos MFI

Configuración	Ensayo	Grupo de datos	Media	StDev	N	AD	P
Configuración 1	Ensayo 2.1.3	MFI agua bruta	16.6	2.771	4	0.276	0.434
		MFI efluente F0	2.2	1.106	4	0.397	0.179
		MFI efluente F2	1.5	0.364	8	0.226	0.729
Configuración 2	Ensayo 2.2.8	MFI agua bruta	7.6	1.406	5	0.516	0.095
		MFI efluente F1	0.7	0.050	7	0.350	0.356
		MFI efluente F2	0.7	0.042	7	0.441	0.199
Configuración 3	Ensayo 2.3.7	MFI agua bruta	6.1	2.586	5	0.223	0.657
		MFI efluente F1	1.7	0.846	3	0.272	0.347
		MFI efluente F2	0.4	0.006	3	0.488	0.057
Configuración 4	Ensayo 3.4.5	MFI agua bruta	11.2	5.005	9	0.221	0.761
		MFI efluente F1	0.5	0.051	7	0.375	0.305
		MFI efluente F2	0.4	0.045	10	0.662	0.058

En las figuras 3.5 y 3.6 se muestran los mejores resultados que se obtuvieron con la configuración 1. En el área del gráfico de la figura 3.5, los círculos representan la distribución de SDI del agua bruta (Test 2.1.3\_SDIRAW), los cuadros se corresponden con la distribución de SDI del efluente de F0 (Test 2.1.3.\_SDIF0) y los rombos representan la distribución de SDI del efluente de F2 (Test 2.1.3.\_SDIF2). Del mismo modo, en la figura 3.6, los círculos representan la distribución de MFI del agua bruta (Test 2.1.3\_MFIRAW), los cuadros se corresponden con la distribución de MFI del efluente de F0 (Test 2.1.3.\_MFIF0) y los rombos representan la distribución de MFI del efluente de F2 (Test 2.1.3.\_MFIF2).

Para el agua bruta con valores de SDI correspondientes al grupo 2 (figura 3.5), el SDI obtenido en el efluente de F2 fue menor que 4 con una fiabilidad del 95%, utilizando una dosis de coagulante de 12 mgFeCl<sub>3</sub>/l y una dosis de Hydrex 3551 de 0,05 mg/l, siendo el SDI en el efluente del primer filtro superior a 5. En este caso, los valores de MFI en el efluente de F0 y F2 (figura 3.6) fueron menores que 4 s/l<sup>2</sup> con una fiabilidad del 95%. Según esto, la configuración 1 permitió el cumplimiento de los objetivos i) máximo valor de SDI de 5, ii) un valor máximo de SDI de 4 y iv) un valor de MFI menor que 4 s/l<sup>2</sup>, establecidos para el agua pretratada, pero no del iii) valor de SDI menor que 3 ni del v) valor de MFI menor que 1 s/l<sup>2</sup>.

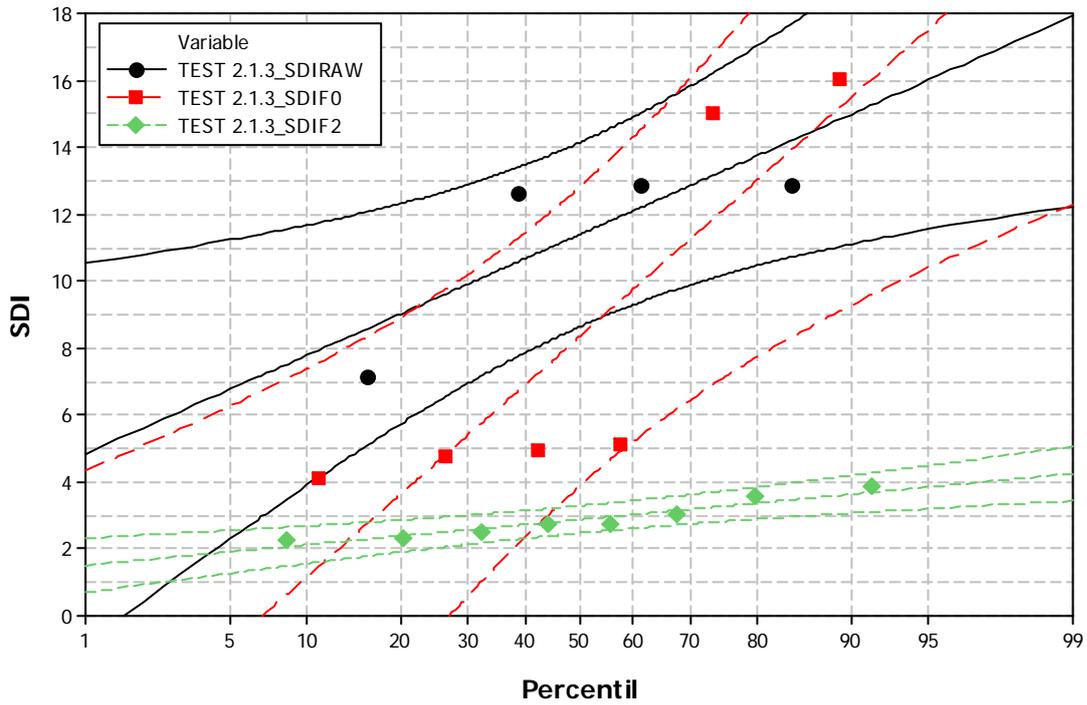


Figura 3.5.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 2.1.3.

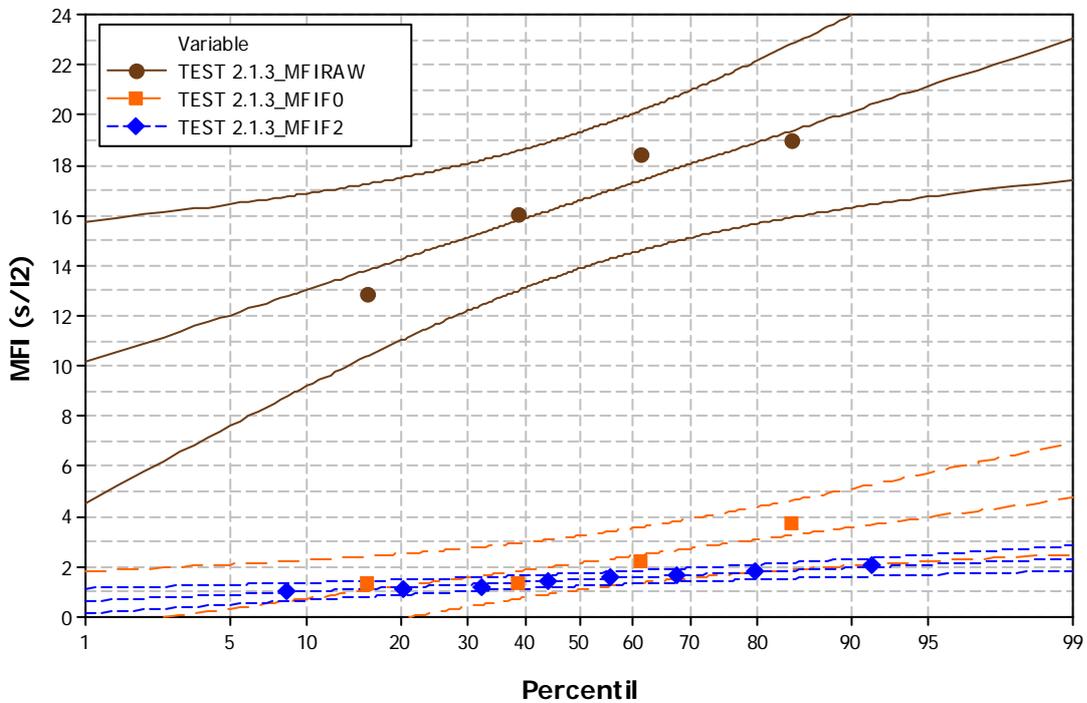


Figura 3.6.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 2.1.3.

Por otro lado, los resultados con una dosis de coagulante Hydrex 3240 de 10 mg/l y de Hydrex 6111 de 0,05 mg/l fueron peores, consiguiéndose un SDI menor que 5 con una fiabilidad del 95% en el efluente de F2. Y al igual que en los ensayos previos, el SDI en el efluente del primer filtro fue mayor que 5. En estas condiciones, los resultados de MFI también fueron peores, con valores superiores al valor máximo de 5 s/l<sup>2</sup> tanto en el efluente de F1 como en el efluente de F2. Estos resultados fueron similares a los obtenidos sin adición de coagulante ni floculante.

### 3.5.5 Resultados de la Configuración 2

En las figuras 3.7 y 3.8 se muestran los mejores resultados que se obtuvieron con esta configuración. En el área del gráfico de la figura 3.7, los círculos representan la distribución de SDI del agua bruta (Test 2.2.9\_SDIRAW), los cuadros se corresponden con la distribución de SDI del efluente de F1 (Test 2.2.9\_SDIF1), y los rombos representan la distribución de SDI del efluente de F2 (Test 2.2.9\_SDIF2). Igualmente, en la figura. 3.8, los círculos representan la distribución de MFI del agua bruta (Test 2.2.8\_MFIRAW), los cuadros se corresponden con la distribución de MFI del efluente de F1 (Test 2.2.8\_MFIF1), y los rombos representan la distribución de MFI del efluente de F2 (Test 2.2.8\_MFIF2)

Para el agua bruta con valores de SDI correspondientes al grupo 2 (figura. 3.7), el SDI obtenido en el efluente de F1 y F2 fueron menores que 3 con una fiabilidad del 95%, utilizando una dosis de coagulante en el rango de 1,5-3 mgFeCl<sub>3</sub>/l, una dosis de floculante (Hydrex 3551) de 0,05 mg/l y una dosis de coagulante catiónico (PD340) de 1 mg/l. Para el mismo tipo de agua, y con las mismas condiciones de operación, como muestra la figura 3.8, se obtuvieron valores de MFI menores que 1 s/l<sup>2</sup> tanto en el efluente de F1 como en el efluente de F2 con una fiabilidad del 95%. Según esto, la configuración 2 permitió el cumplimiento de los objetivos i), ii), iii), iv) y v) para el agua pretratada. En otras referencias [5], también se presentan valores de SDI menores que 3 con configuraciones de tratamiento similares basadas en el sistema Actiflo<sup>®</sup> en la cabeza de la etapa de filtración.

De acuerdo con las figuras. 3.7 y 3.8, se observó que a medida que la dosis de coagulante se reducía hasta un valor de 1,5 mgFeCl<sub>3</sub>/l, la calidad del efluente mejoraba. Con do-

sis de coagulante superiores (como 10 mgFeCl<sub>3</sub>/l, que se ensayó con agua bruta del grupo 1), los valores de SDI en el efluente de F1 y F2 fueron menores que 4 con una fiabilidad del 95%, manteniéndose los valores de MFI por debajo de 1 s/l<sup>2</sup>. Sin embargo, otros autores indican que la eliminación de pycophitoplankton (principalmente *Synechococcus*) es mayor a medida que la dosis de FeCl<sub>3</sub> se incrementa hasta 10 mg/l [6].

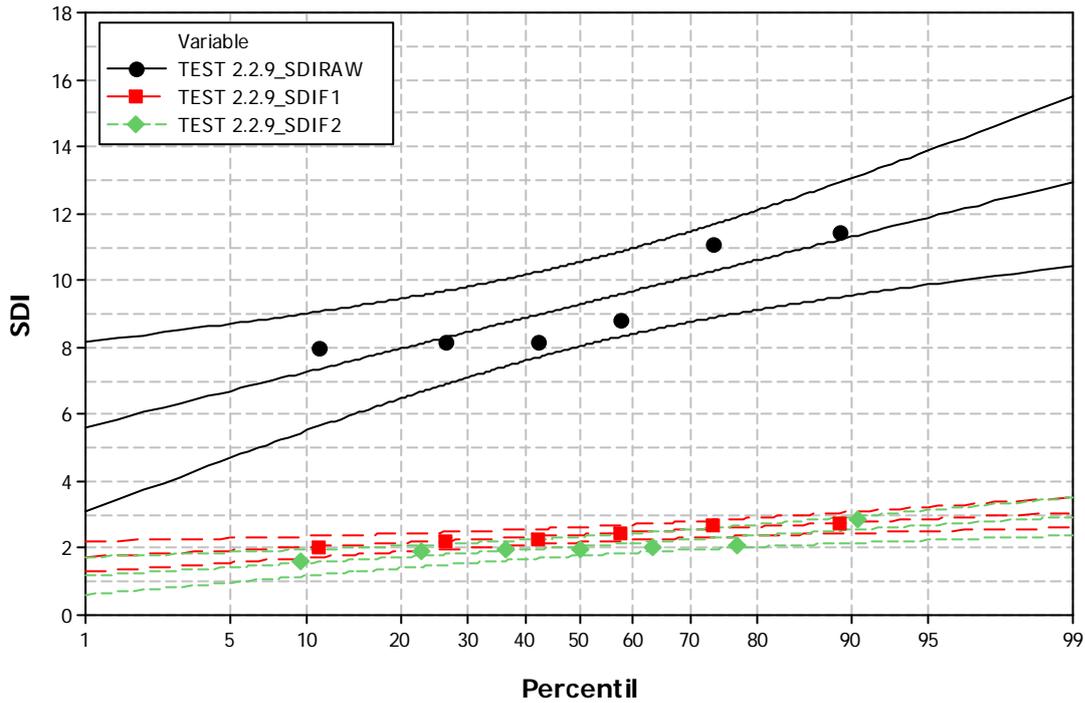


Figura 3.7.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 2.2.9.

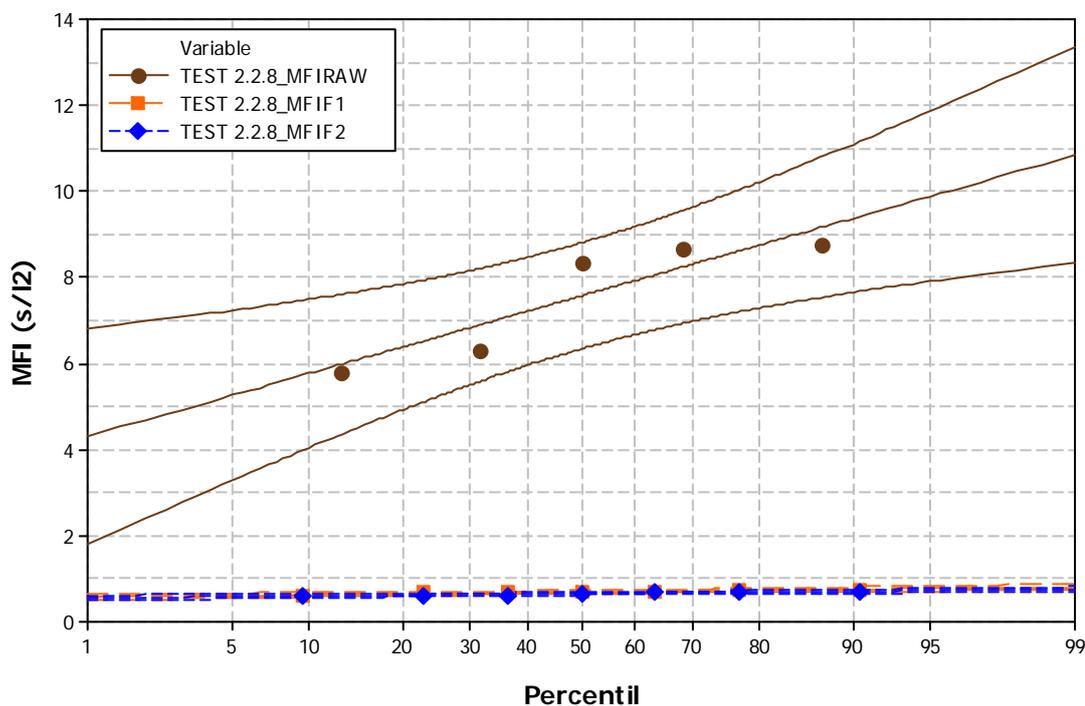


Figura 3.8.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 2.2.8.

Para el agua bruta con SDI perteneciente al grupo 3, el SDI en el efluente de F2 fue menor que 3 con una fiabilidad del 95%, con una dosis de coagulante de 6 mgFeCl<sub>3</sub>/l, una dosis de floculante (Hydrex 3551) de 0,05 mg/l y una dosis de coagulante catiónico (PD340) de 1 mg/l. En este caso, el SDI del efluente de F1 fue menor que 4 con una fiabilidad del 70% y menor que 5 con una fiabilidad del 95%. Sin embargo, en las condiciones indicadas, los valores de MFI fueron menores que 4 s/l<sup>2</sup> en los efluentes de F1 y F2 con una fiabilidad del 95%.

En los ensayos que se realizaron añadiendo el otro coagulante catiónico (PD420) en la entrada de F1, se observaron valores de SDI menores que 4 con una fiabilidad del 95% en el efluente de F1 y con una fiabilidad del 80% en el efluente de F2. Los valores de MFI sin embargo, al igual que en el ensayo anterior, se mantuvieron por debajo de 4 s/l<sup>2</sup>.

Por otro lado, cuando no se añadía coagulante catiónico en la entrada de F1, se observó que la calidad del efluente era peor, con valores de SDI menores que 4 en el efluente de F2 y valores de SDI mayores que 5 en el efluente de F1. En el caso del MFI, igualmen-

te, los valores en el efluente de F1 fueron mayores que  $5 \text{ s/l}^2$ , manteniéndose los valores de MFI del efluente de F2 por debajo de  $4 \text{ s/l}^2$ .

### 3.5.6 Resultados de la Configuración 3

En las figuras 3.9 y 3.10 se muestran los mejores resultados que se obtuvieron con esta configuración. En el área del gráfico 3.9, los círculos representan la distribución de SDI del agua bruta (Test 2.3.7\_SDIRAW), los cuadros se corresponden con la distribución de SDI del efluente de F1 (Test 2.3.7\_SDIF1), y los rombos representan la distribución de SDI del efluente de F2 (Test 2.3.7\_SDIF2). De la misma forma, en la figura. 3.10, los círculos representan la distribución de MFI del agua bruta (Test 2.3.7\_MFIRAW), los cuadros se corresponden con la distribución de MFI del efluente de F1 (Test 2.3.7\_MFIF1), y los rombos representan la distribución de MFI del efluente de F2 (Test 2.3.7\_MFIF2).

Para el agua bruta con valores de SDI correspondientes al grupo 2 (figura. 3.9), el SDI obtenido en el efluente de F2 fue menor que 3 con una fiabilidad del 95%, utilizando una dosis de coagulante de  $3 \text{ mgFeCl}_3/\text{l}$  y una dosis de coagulante catiónico (PD340) de  $1 \text{ mg/l}$  antes del filtro F1. En este caso, el SDI del efluente de F1 fue menor que 5 con una fiabilidad del 60%. Del mismo modo, como se observa en la figura. 3.10, el valor de MFI del efluente de F2 fue menor que  $1 \text{ s/l}^2$  con una fiabilidad del 95%, siendo el valor de MFI del efluente de F1 menor que  $4 \text{ s/l}^2$ . Según esto, los objetivos i), ii), iii), iv) y v) se cumplieron con esta configuración. Otros autores [5] obtuvieron resultados similares basados en un proceso de coagulación en línea seguido por una etapa de filtración. De hecho, existen plantas a escala real, como la planta desaladora de Ashkelon, que ya están operando con esta configuración de pretratamiento de OI [7].

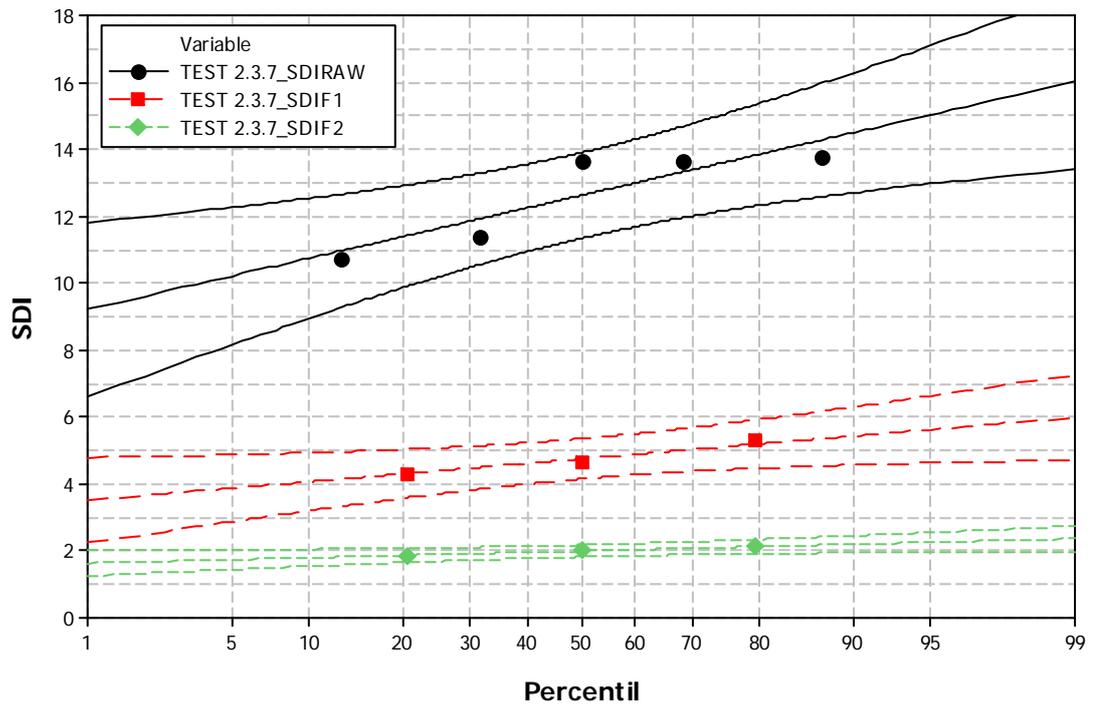


Figura 3.9.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 2.3.7.

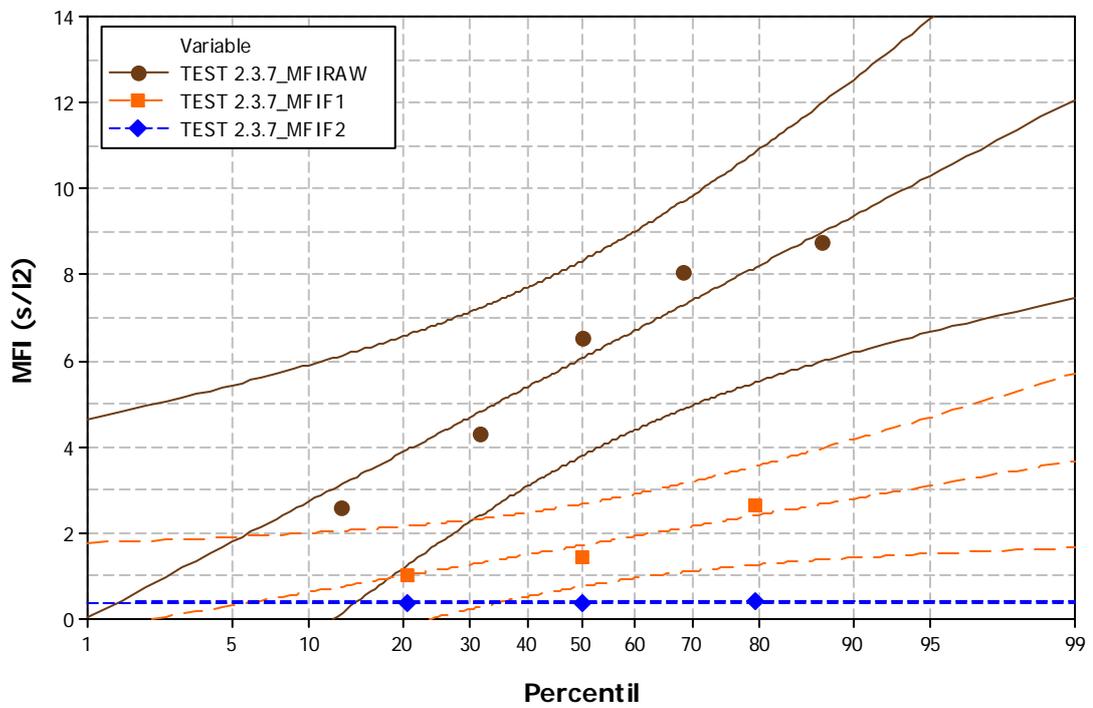


Figura 3.10.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 2.3.7.

Se realizaron algunos ensayos con una dosis de coagulante de 2 mgFeCl<sub>3</sub>/l y una dosis de floculante (Hydrex 3551) de 0,02 mg/l antes de F2, sin adición de coagulante catiónico en la entrada a los filtros, obteniéndose un valor de SDI menor que 5 en el efluente de F2 mientras que el valor de SDI fue mayor que 5 en el efluente de F1. En el caso del MFI, los valores fueron inferiores a 5 s/l<sup>2</sup> en ambos efluentes.

Para la misma calidad de agua bruta del grupo 2, sin coagulación y con una dosis de coagulante catiónico de 1 mg/l antes del filtro F1, el SDI en el efluente de F2 fue menor que 4 con una fiabilidad del 95%. En dicho ensayo, el valor de MFI del efluente de F2 fue menor que 1 s/l<sup>2</sup> con una fiabilidad del 80%. También se realizaron algunos ensayos añadiendo el coagulante catiónico en la entrada de F1 y F2, siendo en este caso el SDI en el efluente de F1 y F2 menor que 5 con una fiabilidad del 95%. En este último ensayo, el MFI en el efluente de F1 fue menor que 5 con una fiabilidad del 95%, y el MFI en el efluente de F2 menor que 4 con una fiabilidad del 95%.

Para el agua bruta con SDI en el grupo 1, con una dosis de coagulante de 3 mgFeCl<sub>3</sub>/l y una dosis de coagulante catiónico de 1 mg/l antes de F2, el SDI en el efluente de F1 fue menor que 5 y el SDI del efluente de F2 menor que 4, con una fiabilidad del 95%. Al igual que para F2 en el caso anterior, los valores de MFI del efluente en ambos filtros se mantuvieron por debajo de 4 s/l<sup>2</sup> con una fiabilidad del 95%.

Con el mismo tipo de agua del grupo 1, se llevaron a cabo algunos ensayos sin coagulación en línea. En este caso, con adición de coagulante catiónico en la entrada del filtro F1 o en la entrada de ambos filtros (F1 y F2), los valores de SDI y de MFI en el efluente de F1 y F2 fueron menores que 5 con una fiabilidad del 95%.

### **3.5.7 Resultados de la Configuración 4**

En las figuras 3.11 y 3.12 se muestran los mejores resultados que se obtuvieron con esta configuración. En el área del gráfico de la figura. 3.11, los círculos representan la distribución de SDI del agua bruta (Test 3.4.5\_SDIRAW), los cuadros se corresponden con la distribución de SDI del efluente de F1 (Test 3.4.5\_SDIF1), y los rombos representan la dis-

tribución de SDI del efluente de F2 (Test 3.4.5\_SDIF2). Igualmente, en la figura. 3.12, los círculos representan la distribución de MFI del agua bruta (Test 3.4.5\_MFIRAW), los cuadros se corresponden con la distribución de MFI del efluente de F1 (Test 3.4.5\_MFIF1), y los rombos representan la distribución de MFI del efluente de F2 (Test 3.4.5\_MFIF2).

Para el agua bruta con valores de SDI correspondientes a los grupos 2 y 3 (figura 3.11), los valores de SDI obtenidos en el efluente de F1 y F2 fueron menores que 3 con una fiabilidad del 95%, utilizando una dosis de coagulante de  $3 \text{ mgFeCl}_3/\text{l}$  y una dosis de coagulante catiónico (PD340) de  $1 \text{ mg/l}$  antes del filtro F1. Los valores de MFI del ensayo (figura 3.12), fueron menores que  $1 \text{ s/l}^2$  con una fiabilidad del 95% en el efluente de ambos filtros. Por tanto, considerando los objetivos establecidos, la configuración 4 permitió la consecución de i) un valor máximo de SDI de 5, ii) un valor máximo de SDI de 4, iii) un valor de SDI menor que 3, iv) un valor máximo de MFI de  $4 \text{ s/l}^2$  y v) un valor de MFI menor que  $1 \text{ s/l}^2$ .

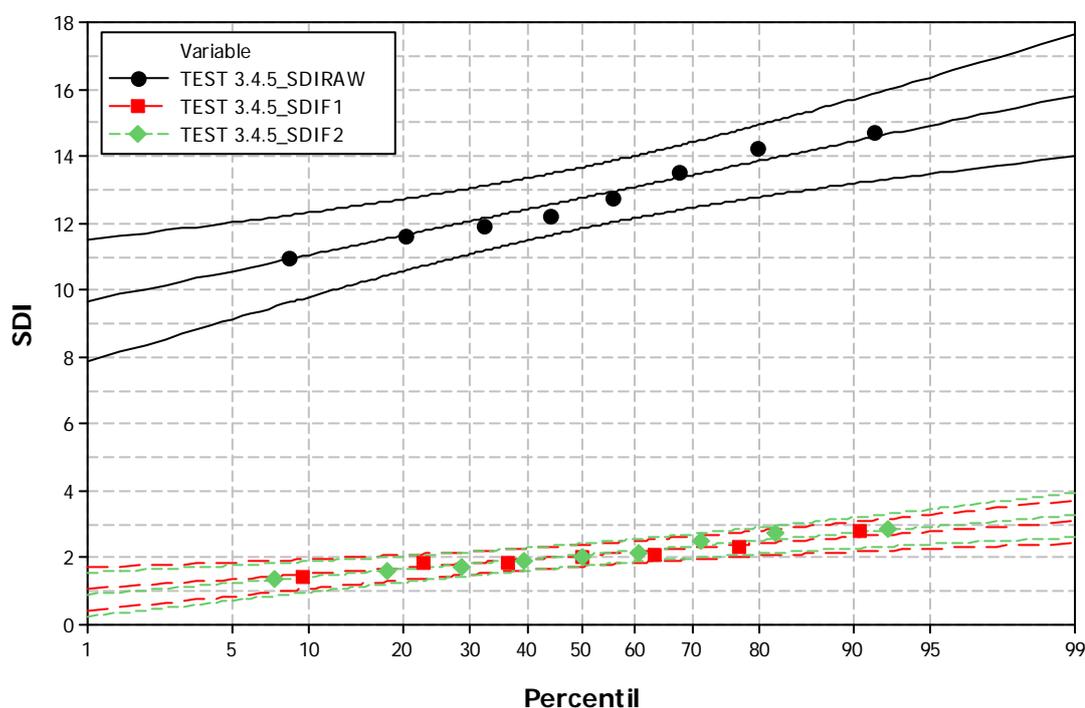


Figura 3.11.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 3.4.5.

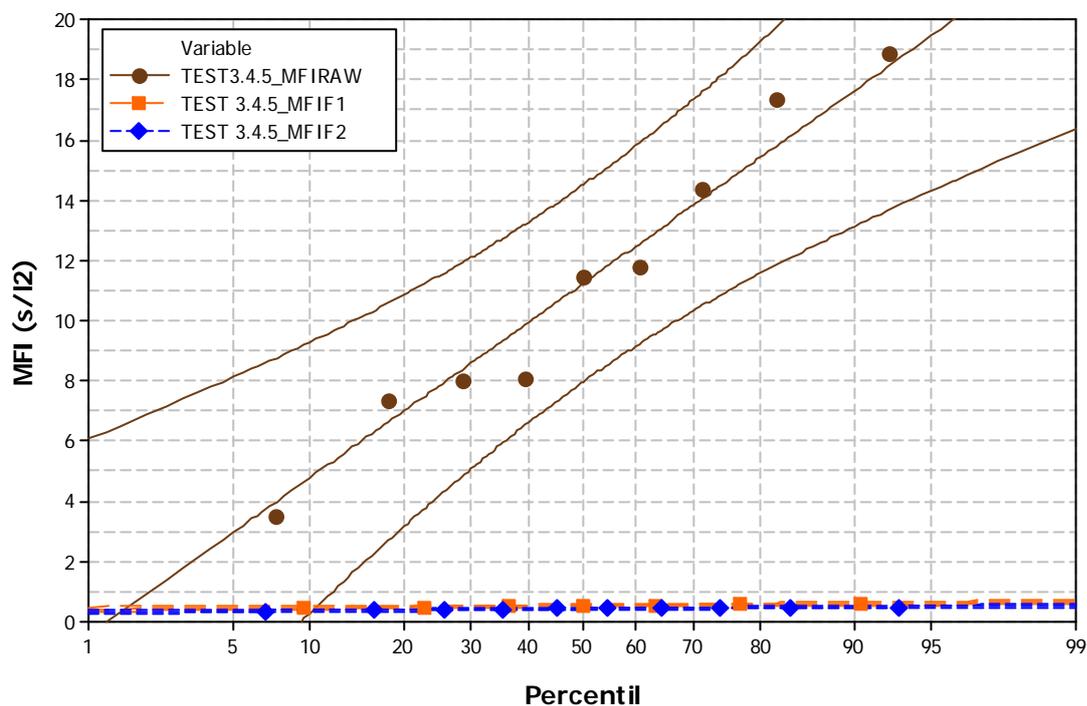


Figura 3.12.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 3.4.5.

Se realizaron algunos ensayos con diferentes velocidades de filtración en un rango de 10 – 15 m/h obteniéndose resultados muy similares, con valores de SDI menores que 3 y valores de MFI menores que  $1 \text{ s/l}^2$  en el efluente de ambos filtros. Otros autores [6] han probado la influencia de la velocidad de filtración en el funcionamiento del filtro, concluyendo que el rendimiento del sistema no es tan sensible a la velocidad de filtración como a otros parámetros. Sin embargo, también comentan que la eliminación de microorganismos permanecía casi constante con velocidades de 8 a 12 m/h, empeorando al subir dicha velocidad a 14 m/h.

Por otro lado, se hicieron algunos ensayos añadiendo el coagulante catiónico (PD340) al sistema Actiflo<sup>®</sup> en lugar de a la entrada del filtro F1, y se observó que los valores de SDI en el efluente de F2 continuaban siendo menores que 3 con una fiabilidad del 90%. Sin embargo, en este caso, los valores de SDI del efluente de F1 eran menores que 3 con una fiabilidad del 10% y menores que 5 con una fiabilidad del 95%. En estas condiciones de operación, el valor de MFI en el efluente de F1 y F2 se mantuvo por debajo de  $1 \text{ s/l}^2$  con una fiabilidad del 95%.

Para el agua bruta con SDI perteneciente al grupo 1, el SDI en el efluente de F2 fue menor que 3 con una fiabilidad del 95%, utilizando una dosis de coagulante de 3 mgFeCl<sub>3</sub>/l y sin dosificación de coagulante catiónico antes de la etapa de filtración. En este caso, el SDI del efluente de F1 fue menor que 3 con una fiabilidad del 80% y menor que 4 con una fiabilidad del 95%. Al igual que en el ensayo anterior, el valor de MFI en el efluente de F1 y F2 se mantuvo por debajo de 1 s/l<sup>2</sup> con una fiabilidad del 95%.

### 3.6 CONCLUSIONES

Tras probar diferentes configuraciones de pretratamiento de agua de mar para OI, se puede concluir que las que permitieron conseguir la calidad óptima fueron bien las compuestas por el sistema Actiflo<sup>®</sup>, incluyendo las etapas de coagulación, floculación (con floculante y adición de microarena) y maduración o simplemente la etapa de coagulación, seguido por una filtración bicapa, o bien la compuesta por dos filtros multimedia presurizados (filtros bicapa y tricapa) en serie con adición previa de coagulante en línea (configuraciones 2, 4 y 3 respectivamente). Los resultados óptimos se obtuvieron añadiendo una dosis de coagulante de 3 mgFeCl<sub>3</sub>/l, una dosis de floculante (Hydrex 3551) de 0,05 mg/l cuando había etapa de floculación (en la configuración 2), y una dosis de coagulante catiónico (PD340) de 1 mg/l antes del filtro bicapa presurizado. Con las configuraciones 2 y 4 se consiguieron valores de SDI menores que 3 y valores de MFI menores que 1 s/l<sup>2</sup> en el efluente de ambos filtros. Sin embargo, en la configuración 3, el SDI en el efluente del primer filtro fue mayor que 5, manteniéndose el valor de MFI por debajo de 4 s/l<sup>2</sup>.

Según los resultados obtenidos, tanto en la configuración 2 como en la 4 se consiguieron los objetivos establecidos con una única etapa de filtración bicapa. Sin embargo, el propósito de un segundo filtro en estos casos es garantizar la calidad del efluente en caso de que el agua bruta presente valores mayores de SDI o servir como seguridad en caso de averías. Por otro lado, comparando las configuraciones 2 y 4, la configuración 2 está más del lado de la seguridad dado que podría absorber cambios en la concentración de sólidos en suspensión del agua bruta sin afectar a la calidad efluente.

Los ensayos realizados con la configuración 1, que consistía en el sistema Actiflo<sup>®</sup> seguido por un filtro multimedia a presión atmosférica y un filtro tricapa presurizado en serie, permitieron obtener valores de SDI y MFI menores que 4 en el efluente del filtro a presión, con una dosis de coagulante de 12 mgFeCl<sub>3</sub>/l y una dosis de floculante (Hydrex 3551) de 0,05 mg/l.

A pesar de que durante el estudio de demostración no hubo ni etapa de desinfección en continuo ni un tratamiento de desinfección de choque, no se produjo ensuciamiento biológico de las membranas.

### 3.7 REFERENCIAS

- [1] R. Mujeriego, La fiabilidad de los procesos de regeneración del agua, II Jornadas Técnicas de Gestión de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales, Barcelona, Spain, 2005.
- [2] R. Mujeriego K.Peters, Process reliability and significance of reclaimed water quality parameters, *Water Sci. Technol.* 57.5 (2008) 667-674.
- [3] Minitab Inc. MINITAB® Statistical Software, Release 14 for Windows, State College, PA, 2003.
- [4] K. Gaid, Y. Treal, Le dessalement des eaux par osmose inverse: l'expérience de Véolia Water, *Desalination* 203 (2007) 1-14.
- [5] J. Leparc, J. C. Schrotter, S. Rapenne, J. P. Croué, P. Lebaron, D. Lafon, K. Gaid, Use of Advanced Analytical Tools for Monitoring Performance of Seawater Pretreatment Processes, in: *Proceedings of IDA World Congress MP07-124*, Maspalomas, Spain, 2007.
- [6] S. Rapenne, C. L. Port, S. J. Roddy, J.P. Croué, Pretreatment Prior to RO for Seawater Desalination: Sydney Pilot Scale Study, *Proceedings of IDA World Congress MP07-231*, Maspalomas, Spain, 2007.
- [7] B. Sauvet-Goichon, Ashkelon desalination plant, a successful challenge, *Desalination* 203 (2007) 75-81.



## **CAPÍTULO 4**

### **PRETRATAMIENTO DE AGUA**

### **SUPERFICIAL EN PLANTA INDUSTRIAL**



## ÍNDICE

<b>4. PRETRATAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN PLANTA INDUSTRIAL</b>	<b>81</b>
4.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	81
4.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE DEMOSTRACIÓN .....	82
4.3 CONFIGURACIONES ESTUDIADAS .....	84
4.3.1 Configuración 1 .....	85
4.3.2 Configuración 2 .....	85
4.3.3 Configuración 3 .....	85
4.4 METODOLOGÍA .....	85
4.4.1 Muestreo y Análisis .....	85
4.4.2 Criterio de Clasificación de los Ensayos .....	86
4.4.3 Análisis Estadístico .....	86
4.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	87
4.5.1 Agua de entrada a la planta de demostración .....	87
4.5.2 Clasificación de la secuencia de resultados .....	89
4.5.3 Resultados de la Configuración 1 .....	90
4.5.4 Resultados de la Configuración 2 .....	92
4.5.5 Resultados de la Configuración 3 .....	95
4.6 CONCLUSIONES .....	97
4.7 REFERENCIAS .....	99



## **4. PRETRATAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN PLANTA INDUSTRIAL**

### **4.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

El análisis de las opciones de pretratamiento de agua superficial para alimentación de una OI se basa en los resultados obtenidos en el estudio de demostración llevado a cabo en una industria de acero (España) durante 8 semanas. Uno de los objetivos del presente estudio, tal y como ya se indicó en el Capítulo 2, fue la reducción del potencial de ensuciamiento del agua de alimentación a la OI mediante la optimización de la etapa previa de filtración. Para ello, en este caso, se probaron diferentes configuraciones de pretratamiento, basadas en la combinación del tratamiento físico-químico existente con las diferentes etapas de filtración disponibles en la planta de demostración (filtración bicapa presurizada y/o filtración tricapa a presión).

Una vez concluidos los ensayos, se analizaron los valores de SDI y MFI obtenidos con las diferentes configuraciones. Teniendo en cuenta los requerimientos de calidad de las membranas, se establecieron los siguientes valores objetivo para las configuraciones de pretratamiento estudiadas:

- i) valor máximo de SDI de 5
- ii) valor máximo de MFI de  $4 \text{ s/l}^2$
- iii) valor de SDI menor que 3
- iv) valor de MFI menor que  $1 \text{ s/l}^2$

De los valores objetivo indicados, el i) y el ii) representan la calidad mínima indicada por los suministradores de membranas, mientras que el iii) y iv) representan las condiciones óptimas para la operación de la OI.

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE DEMOSTRACIÓN

La industria de acero donde se llevó a cabo el estudio ya contaba con una estación de tratamiento de agua (ETA) para tratar el agua de un embalse como pretratamiento de una OI, con el objeto de obtener agua con la calidad adecuada para su utilización en los procesos de la industria. La planta existente consistía en una oxidación con permanganato, adición de cloro, etapa de coagulación/floculación seguida por una decantación y una etapa de filtración con arena. Sin embargo, aunque con esta línea de tratamiento se conseguían valores de turbidez muy bajos ( $<1\text{NTU}$ ), se producía un ensuciamiento excesivo de las membranas. Por ello, con el objeto de mejorar el pretratamiento de la OI, se instaló la planta de demostración.

El agua a tratar en la planta de demostración se tomó en dos puntos diferentes tras su tratamiento en la ETA de la industria ya que se especulaba con la posibilidad de que se produjese la contaminación del agua en la tubería periférica que conectaba la ETA con la OI. El primer punto de toma correspondía a la salida de la tubería periférica de 10 km de longitud que provenía de la ETA (agua tipo 1), mientras que la segunda toma correspondía directamente al efluente de la filtración de la ETA (agua tipo 2).

Tal y como se muestra en la figura 4.1, la planta de demostración incluía los siguientes elementos: bombeo del agua desde el punto de toma a la línea de filtración; dos filtros multimedia presurizados en serie (un filtro bicapa presurizado y un filtro tricapa presurizado), cuatro filtros de cartucho de 5 micras y un sistema de ósmosis inversa que consistía en dieciocho membranas de 4" de diámetro (modelo BW30-4040-FR) en una configuración de dos etapas. Además, los filtros multimedia permitían la operación individual con cada filtro o con los dos filtros en serie para poder ensayar diferentes configuraciones de pretratamiento. En la tabla 4.1 se muestran las principales características de los filtros presurizados.

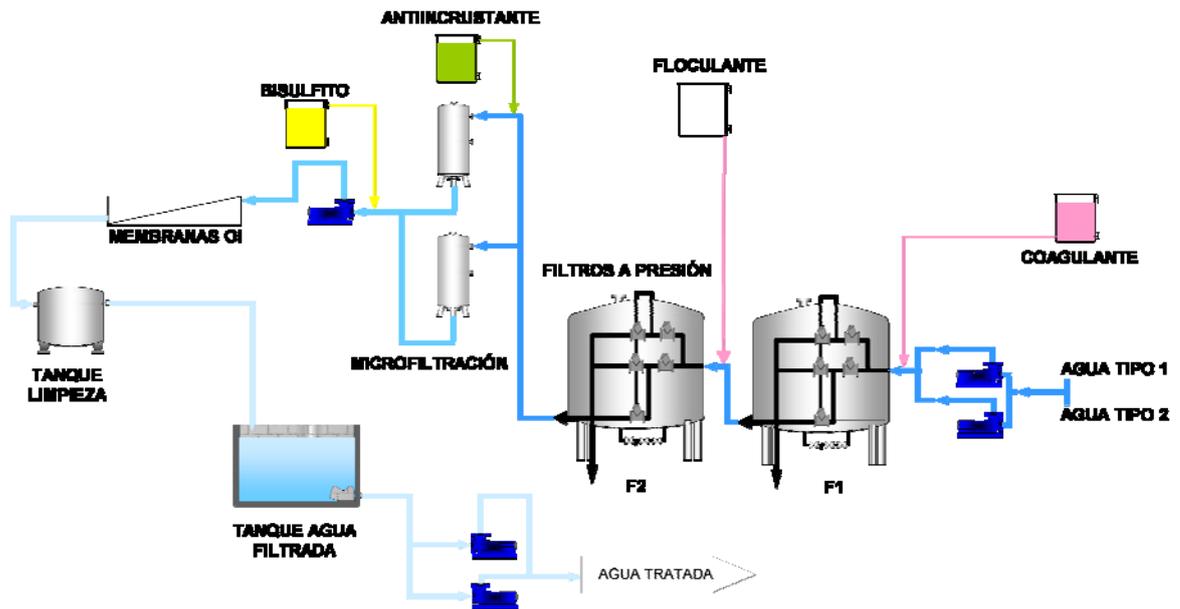


Figura 4.1.- Diagrama de flujo de la planta de demostración

Tabla 4.1.- Características principales de los filtros

	Filtro Bicapa Presurizado (F1)		Filtro Tricapa Presurizado (F2)	
Capa soporte	Material	arena	Material	arena
	Altura	354 mm	Altura	366 mm
Capas de filtración	Material	arena	Material	granate
	Altura	254 mm	Altura	165 mm
	Material	antracita	Material	arena
	Altura	398 mm	Material	antracita
			Altura	265 mm

En esta línea de tratamiento también cabía la posibilidad de utilizar químicos, coagulantes y/o floculantes, previamente a los filtros, para mejorar su operación y por tanto, la calidad del efluente. Según experiencias previas y las referencias de otros autores [1,2], para la coagulación, se utilizaron el coagulante inorgánico Hydrex 3210 (8,5%  $Al_2O_3$ ) y dos coagulantes orgánicos, poliDADMAC (Hydrex 6761) y poliaminas (C581), mientras que el único floculante utilizado fue el Hydrex 6521.

### 4.3 CONFIGURACIONES ESTUDIADAS

Los siguientes apartados describen las diferentes configuraciones que fueron estudiadas en este trabajo. En todas las configuraciones, el caudal de entrada a los filtros fue de  $2,7 \text{ m}^3/\text{h}$ , correspondiéndose con una velocidad de filtración de  $13,6 \text{ m/h}$ . En la figura 4.2 se resumen la principales características de cada configuración.

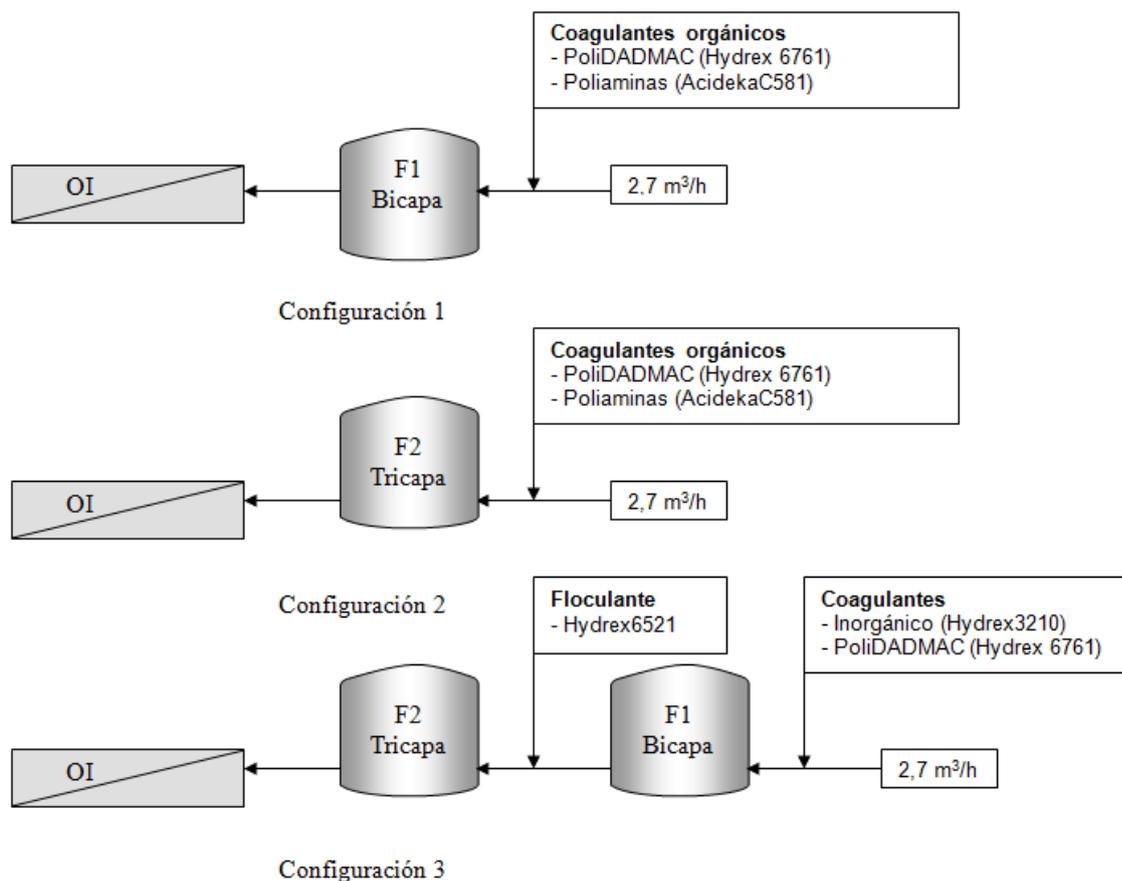


Figura 4.2.- Características principales de las configuraciones ensayadas

### **4.3.1 Configuración 1**

Esta primera configuración consistía en el filtro bicapa (F1) operando solo. En la coagulación en línea previa al filtro, se probaron los dos coagulantes orgánicos, llamados poliDADMAC (Hydrex 6761) y poliaminas (C581).

### **4.3.2 Configuración 2**

Esta segunda configuración consistía en el filtro tricapa (F2) operando solo. En este caso, para la coagulación en línea se probaron los mismos coagulantes orgánicos que en la configuración 1.

### **4.3.3 Configuración 3**

La tercera configuración consistía en los dos filtros multimedia presurizados en serie, es decir, el filtro bicapa (F1) seguido del filtro tricapa (F2). En la coagulación en línea previa a los filtros, se utilizaron el coagulante inorgánico en base aluminio (Hydrex 3210) o bien el coagulante orgánico (Hydrex 6761), ambos seguidos por la adición de floculante (Hydrex 6521) en el filtro F2. En este caso, el primer filtro (F1) funcionaba como etapa de coagulación y el segundo filtro (F2) como etapa de afino.

## **4.4 METODOLOGÍA**

### **4.4.1 Muestreo y Análisis**

Durante el estudio de demostración, se distinguieron dos períodos de trabajo. Primero, se evaluaron las tres configuraciones propuestas para el pretratamiento con el agua tipo 1, ensayando cada configuración durante una semana. Después, basándose en los resultados conseguidos, se repitieron las mejores configuraciones, que fueron la 2 y la 3, con el agua tipo 2 durante dos semanas.

El funcionamiento del proceso de la planta de demostración se controlaba, por un lado, utilizando medidores en línea con un sistema SCADA, incluyendo sensores de presión, caudalímetros, pHmetro y sensores de nivel. Por otro lado, la calidad del afluente y del efluente se controlaba mediante la medida manual de los parámetros necesarios para el cálculo del SDI y MFI. La membrana de microfiltración utilizada en estas medidas era la HAWP de Millipore con un tamaño de poro de 0,45  $\mu\text{m}$ .

En este estudio de demostración se propuso la discusión de los valores tanto de SDI como de MFI, ya que en ciertos casos el SDI no pudo ser calculado debido al alto fouling coloidal. En total se determinaron 36 valores de MFI en el agua de entrada, mientras que en el efluente de los filtros se obtuvieron 39 valores de MFI y 135 valores de SDI.

#### 4.4.2 Criterio de Clasificación de los Ensayos

Al igual que en el Capítulo 3, apartado 3.4.2, se definió un criterio basado en tres números (X.Y.Z), en este caso según la Tabla 4.2. El significado de Z varía para cada combinación de X e Y y por tanto, el mismo número no corresponde siempre al mismo producto químico o a la misma dosis.

Tabla 4.2.- Nomenclatura (X, Y, Z)

Número	Valor	Significado
X: Tipo agua bruta	1	De tubería periférica
	2	De ETA
Y: Configuración	1	Filtro bicapa presurizado (F1)
	2	Filtro tricapa presurizado (F2)
	3	Filtro bicapa presurizado (F1)+ Filtro tricapa presurizado (F2)
Z: Test	1--4	Combinación de diferentes dosificaciones químicas

#### 4.4.3 Análisis Estadístico

En la tabla 4.3 aparecen las principales características de los diferentes ensayos que se realizaron.

Tabla 4.3.- Resumen de ensayos

Referencia (X.Y.Z)	Configuración	Coagulante	Coagulante	Coagulante	Floculante
		Hydrex6761 (mg/l)	C581 (mg/l)	Hydrex3210 (mg/l)	Hydrex6521 (mg/l)
1.1.0	1	0	0	0	0
1.1.1	1	2	0	0	0
1.1.2	1	0	2	0	0
1.2.0	2	0	0	0	0
1.2.1	2	2	0	0	0
1.2.2	2	3.6	0	0	0
1.2.3	2	4.6	0	0	0
1.2.4	2	0	2	0	0
1.3.0	3	0	0	0	0
1.3.1	3	0	0	15	0.05
1.3.2	3	2	0	0	0.05
2.2.1	2	2	0	0	0
2.3.1	3	0	0	15	0.05

El análisis se basó en parámetros estadísticos, tal y como ya se ha descrito en el Capítulo 3, apartado 3.4.3. En este caso, también se utilizó el software Minitab® [3] para procesar los datos experimentales y hacer los gráficos de probabilidad, con distribuciones normales e intervalos de confianza (CI) de un 95%. En este estudio sólo se tuvieron en cuenta los ensayos con los que se consiguieron valores de MFI menores de  $4 \text{ s/l}^2$  y de SDI menores de 5, con una fiabilidad de al menos un 90%.

Como consecuencia, sólo seis de los ensayos mostrados en la tabla 4.3 se consideraron en las conclusiones.

## 4.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.5.1 Agua de entrada a la planta de demostración

El agua de entrada a la planta de demostración en la industria de acero se caracterizaba por una turbidez baja ( $< 1 \text{ NTU}$ ) y valores de SDI muy elevados que no se podían medir. En la tabla 4.4 se resumen algunos datos analíticos del agua a tratar.

Tabla 4.4.- Características del agua a tratar en la planta de demostración

Parámetro	Agua tipo1	Agua tipo2
pH	7.98	7.87
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	361	358
Dureza total ( $^{\circ}\text{F}$ )	16.3	15.3
Dureza cálcica ( $^{\circ}\text{F}$ )	11.2	10.5
Alcalinidad total ( $^{\circ}\text{F}$ )	11.0	11.6
Índice de saturación de Langelier ( $20^{\circ}\text{C}$ )	-0.3	-0.4
Turbidez(NTU)	0.79	0.93
Hierro (mg/l)	0.22	0.01
Manganeso (mg/l)	0.033	0.026
Aluminio (mg/l)	0.01	0.01
orto- fosfatos (mg/l)	0.01	0.01
Fosfato total (mg/l)	0.19	0.19

En la figura 4.3 se muestran los datos correspondientes al MFI del agua de entrada a la planta de demostración. Las medidas de MFI de la semana 16 a la 21 corresponden al agua procedente de la tubería periférica, mientras que las medidas de las semanas 22 y 23 son las correspondientes al efluente que sale directamente de la ETA. Durante la semana 21 se observó un incremento importante del MFI. Por otro lado, durante las semanas 20 y 21 los valores de MFI se movieron en un rango amplio debido supuestamente a las variaciones estacionales de la lluvia. Aunque las medidas del MFI se hicieron por separado, no se apreciaron diferencias significativas entre los dos tipos de agua, tal y como puede verse en la figura 4.3.

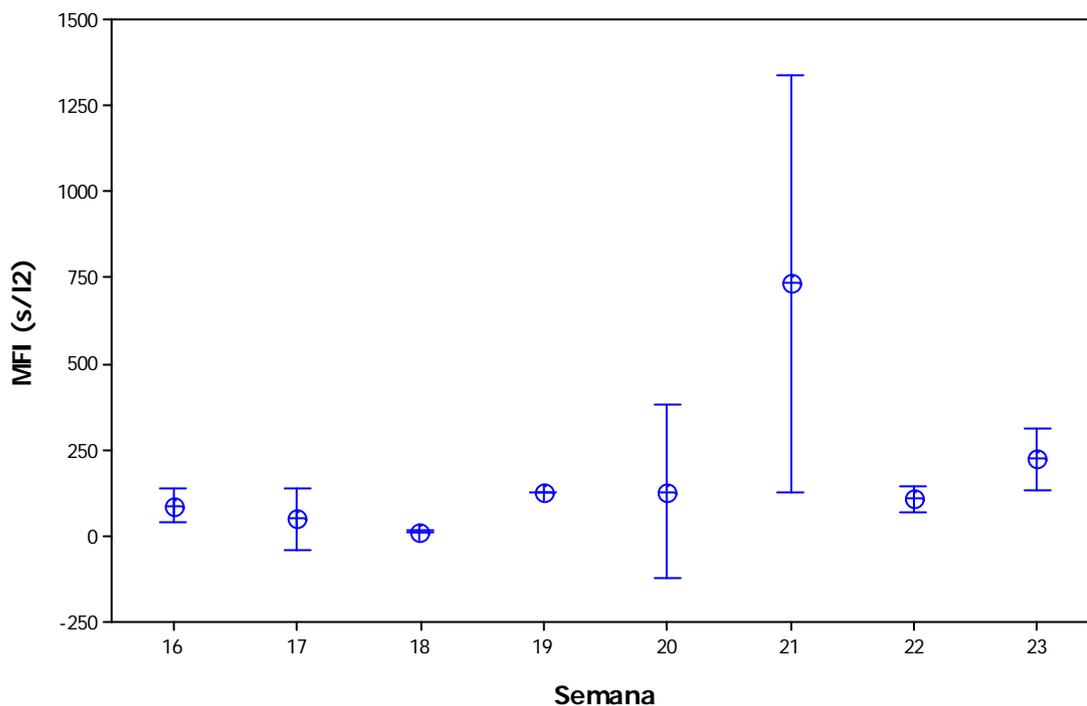


Figura 4.3.- Datos de MFI de entrada a planta (intervalo de confianza 95% para la media)

#### 4.5.2 Clasificación de la secuencia de resultados

En la tabla 4.5 se muestra la clasificación de los seis ensayos en cuatro grupos según los objetivos indicados en la sección 4.1. En cada ensayo, se utilizaron los símbolos ✓ y – para indicar que se habían conseguido o no los valores de MFI y SDI, respectivamente. Algunas medidas de SDI no pudieron realizarse debido al elevado fouling coloidal; éstas se representaron con un blanco.

Tabla 4.5.- Clasificación de resultados según los objetivos

Referencia	SDI<5	MFI<4 s/l <sup>2</sup>	SDI<3	MFI<1 s/l <sup>2</sup>
2.3.1	✓	✓	-	✓
1.3.1	✓	✓	-	-
2.2.1	✓	✓	-	-
1.2.1	✓	✓	-	-
1.2.2		✓		-
1.1.1	✓	-	-	-

En las secciones siguientes se presenta información más detallada de los resultados obtenidos con cada una de las configuraciones, así como con las diferentes condiciones en cada ensayo (p.e. calidad del agua de entrada y dosificación química).

### 4.5.3 Resultados de la Configuración 1

Las figuras 4.4 y 4.5 representan los mejores resultados obtenidos con esta configuración. En la figura 4.4 se representan los valores de MFI del agua de entrada y del agua filtrada frente a los percentiles (valor que indica el porcentaje de la distribución que es igual o menor a dicho valor), mientras que en la figura 4.5 se representan los valores de SDI solamente del agua filtrada frente a los percentiles correspondientes. Además, en la tabla 4.6 se muestran los principales parámetros estadísticos para la distribución seleccionada en cada configuración, tales como la media, la desviación estándar (StDev), el número de muestras (N), el parámetro Anderson-Darling ajustado (AD) y el coeficiente de correlación de Pearson (P).

En el gráfico de la figura 4.4, los círculos representan la distribución de MFI del agua de entrada (Test 1.1.1\_MFIIN) y los cuadros se corresponden con la distribución de MFI del efluente de F1 (Test 1.1.1\_MFIF1). En la figura 4.5, los cuadros representan la distribución de SDI del efluente de F1 (Test 1.1.1\_SDIF1).

Para el agua de entrada del tipo 1 (figura 4.5), el SDI obtenido en el efluente de F1 fue menor que 5 con una fiabilidad del 95%, utilizando una dosis de Hydrex 6761 de 2 mg/l. En este caso, el valor de MFI en el efluente (figura 4.4) fue demasiado elevado, con un valor de 80 s/l<sup>2</sup> y una fiabilidad del 90%. Según esto, la configuración 1 permitió el cumplimiento del objetivo i) máximo valor de SDI de 5, pero no de los objetivos ii) máximo valor de MFI de 4s/l<sup>2</sup>, iii) valor de SDI menor que 3 o iv) valor de MFI menor que 1s/l<sup>2</sup>.

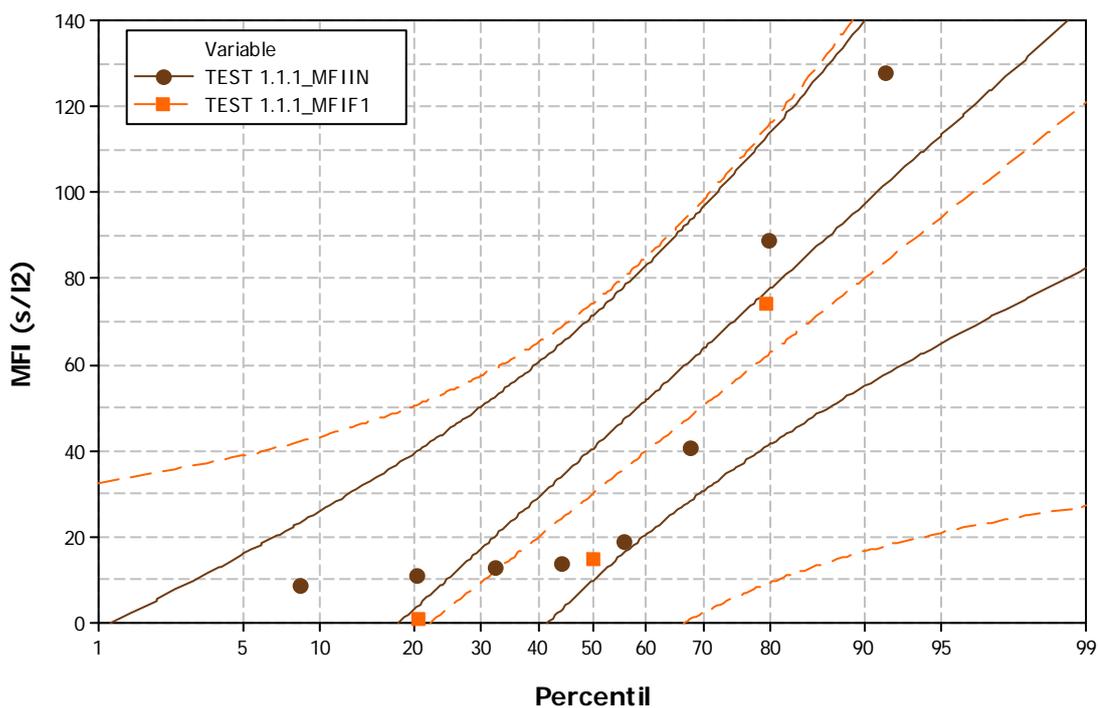


Figura 4.4.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 1.1.1.

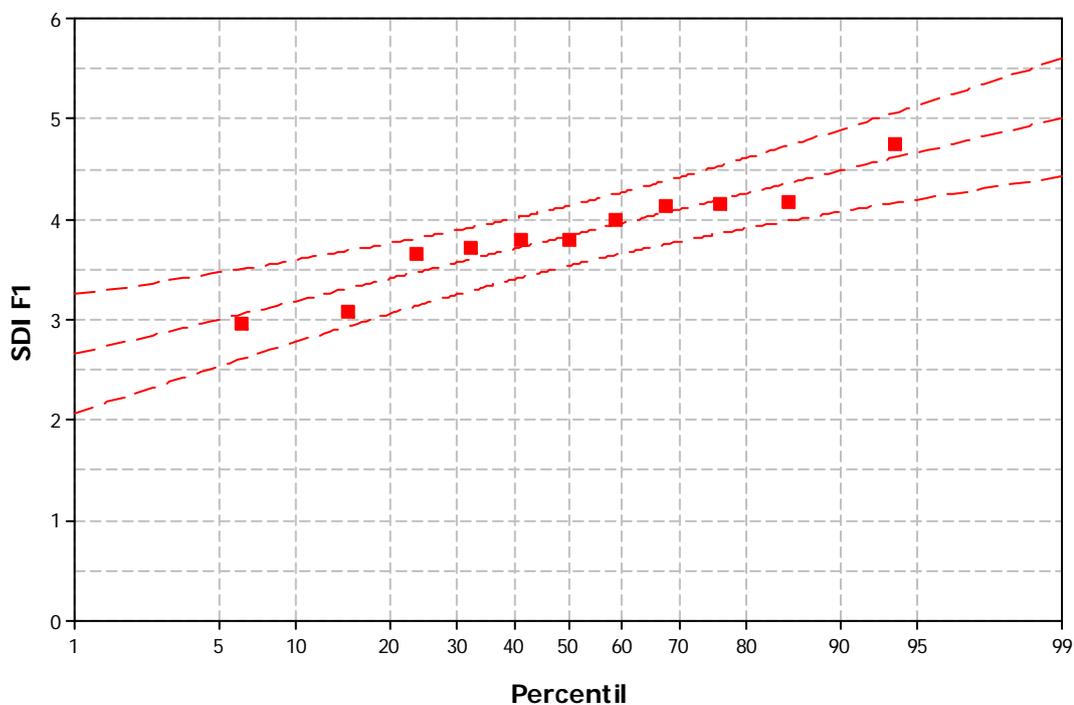


Figura 4.5.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 1.1.1.

Tabla 4.6.- Parámetros estadísticos

Configuración	Ensayo	Grupo de datos	Media	SD	N	AD	P
1	Ensayo 1.1.1	MFI agua de entrada	40.5	44.4	8	0.931	0.009
		MFI efluente F1	29.9	39.1	3	0.320	0.233
		SDI efluente F1	3.8	0.5	11	0.363	0.373
2	Ensayo 1.2.1	MFI agua de entrada	40.5	44.4	8	0.931	0.009
		MFI efluente F2	1.3	0,9	6	0.439	0.184
		SDI efluente F2	2.4	0.8	40	3.237	0.005
3	Ensayo 2.3.1	MFI agua de entrada	144.4	66.7	13	0.526	0.145
		MFI efluente F2	0.7	0.1	3	0.209	0.547
		SDI efluente F2	3.0	0.7	19	0.986	0.01

Por otro lado, los resultados con otro coagulante (C581) fueron peores, obteniéndose un SDI en el efluente de F1 mayor que 5. Por tanto, no se consiguió ninguno de los objetivos establecidos.

En los ensayos realizados sin adición de coagulante, el SDI en el efluente de F1 fue también mayor que 5, lo que implica que tampoco se consiguió ninguno de los objetivos.

#### 4.5.4 Resultados de la Configuración 2

En las figuras 4.6 y 4.7 se muestran los mejores resultados que se obtuvieron con esta configuración. Los símbolos empleados son equivalentes a los utilizados en las figuras 4.4 y 4.5 pero, en este caso, para el efluente de F2. Según esto, en la figura 4.6, los círculos y los rombos, representan la distribución de MFI del agua de entrada (Test 1.2.1\_MFIIN) y del efluente de F2 (Test 1.2.1\_MFIF2). En la figura 4.7 los rombos representan la distribución de SDI del efluente de F2 (Test 1.2.1\_SDIF2).

Para el agua de entrada del tipo 1, el SDI obtenido en el efluente de F2 (figura 4.7), fue menor que 5 con una fiabilidad del 95% y menor de 3 con una fiabilidad del 70%. El valor de MFI en el efluente de F2 (figura 4.6) fue menor que 4 s/l<sup>2</sup> con una fiabilidad del 95%, utilizando una dosis de Hydrex 6761 de 2 mg/l. Según esto, la configuración 2 permitió el cumplimiento de los objetivos i) y ii) pero no de los objetivos iii) y iv) en el agua pre-

tratada. En la misma línea de los objetivos conseguidos con esta configuración, otras referencias indican valores de SDI en el rango de 5 a 6 para aguas que han sido tratadas mediante tecnologías convencionales, frente a valores de SDI de 2 cuando el pretratamiento consiste en una microfiltración, e inferiores a 1 cuando existe una ultrafiltración previa a la OI. Del mismo modo, dichas referencias presentan valores de MFI en el rango de 1,5 a 4,5  $s/l^2$  para pretratamientos basados en filtración multicapa frente a valores de MFI inferiores a 0,7  $s/l^2$  y 0,2  $s/l^2$  en el caso de pretratamientos basados en membranas como la microfiltración y la ultrafiltración, respectivamente. [4]. Tal y como ya se había indicado en el Capítulo 1 de introducción al presente trabajo, en general, los pretratamientos con membranas proporcionan mejor calidad del agua pretratada que las tecnologías convencionales. Sin embargo, en función del tipo de agua a tratar, es posible que las tecnologías convencionales permitan alcanzar los requerimientos mínimos de calidad requeridos.

Se observó que a medida que la dosis de coagulante (Hydrex 6761) se reducía hasta 2 mg/l, la calidad del efluente mejoraba. Con dosis de coagulante superiores, como 3,6 y 4,6 mg/l ensayadas para el agua tipo 1, los valores de MFI en el efluente de F2 fueron menores que 4  $s/l^2$  con una fiabilidad del 95% y mayores que 4  $s/l^2$  respectivamente.

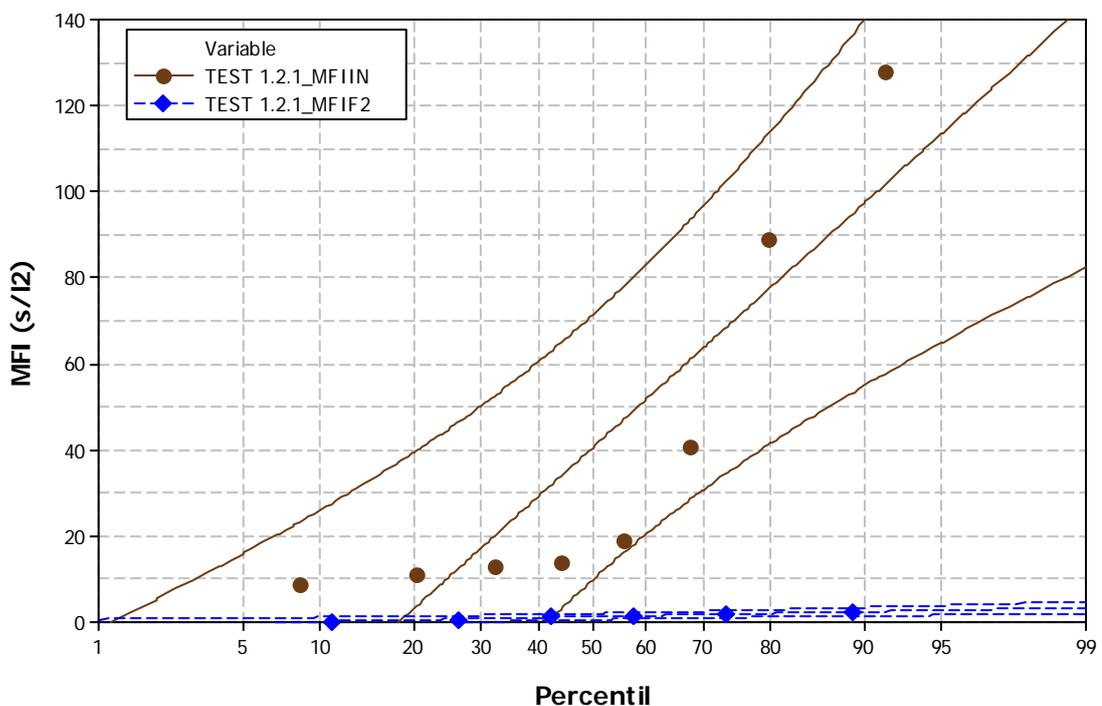


Figura 4.6.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 1.2.1.

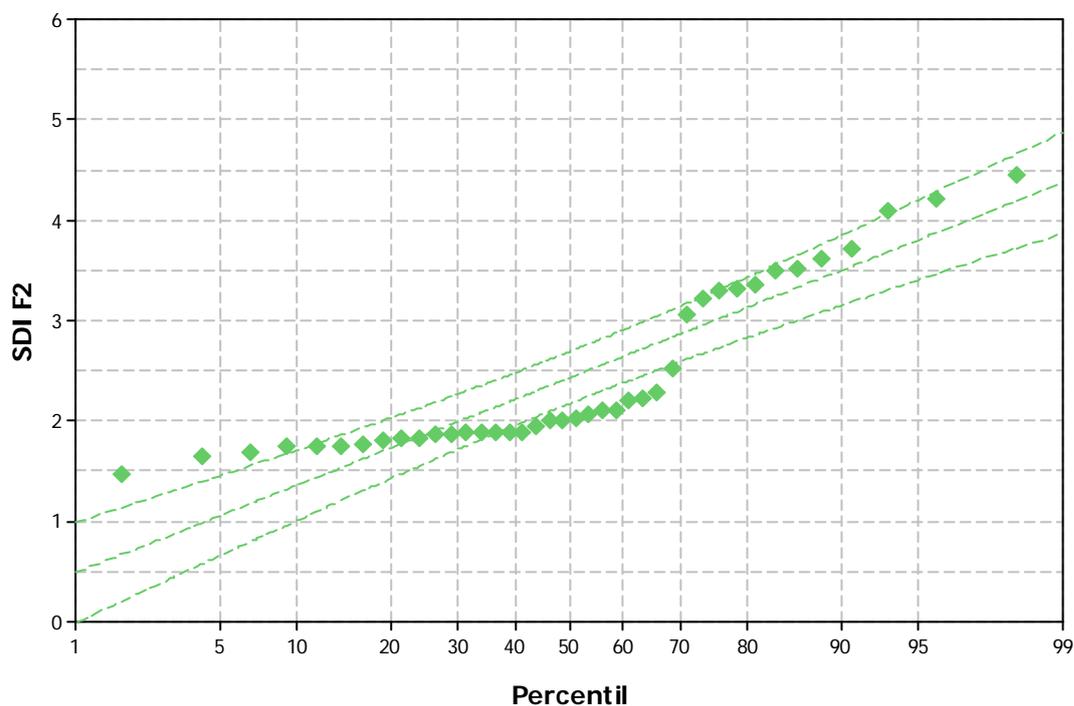


Figura 4.7.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 1.2.1.

Para el agua de entrada del tipo 2, al igual que con el agua tipo 1, el SDI obtenido en el efluente de F2, fue menor que 5 y el valor de MFI fue menor que  $4 \text{ s/l}^2$  con una fiabilidad del 95%, con una dosis de Hydrex 6761 de  $2 \text{ mg/l}$ .

De nuevo, los resultados con otro coagulante (C581) fueron peores, obteniéndose un SDI en el efluente de F2 mayor que 5 y un MFI en el efluente de F2 mayor que  $4 \text{ s/l}^2$ . Por tanto, como ocurría con la configuración 1, no se consiguió ninguno de los objetivos establecidos.

En los ensayos realizados sin adición de coagulante, como en los ensayos previos, el SDI y el MFI en el efluente de F2 fueron también mayores que 5 y  $4 \text{ s/l}^2$  respectivamente, lo que implica que no se consiguió ninguno de los objetivos.

#### 4.5.5 Resultados de la Configuración 3

En las figuras 4.8 y 4.9 se muestran los mejores resultados que se obtuvieron con esta configuración. Como en los otros gráficos, en la figura 4.8 los círculos y los rombos, representan la distribución de MFI del agua de entrada (Test 2.3.1\_MFIIN) y del efluente de F2 (Test 2.3.1\_MFIF2) respectivamente. En la figura 4.9, los rombos representan la distribución de SDI del efluente de F2 (Test 2.3.1\_SDIF2).

Para el agua de entrada del tipo 2, el SDI obtenido en el efluente de F2 (figura 4.9), fue menor que 5 con una fiabilidad del 95% y menor que 3 con una fiabilidad del 50%. En este caso, el valor de MFI en el efluente de F2 (figura 4.8) fue menor que  $1\text{s/l}^2$  con una fiabilidad del 95%, con una dosis de coagulante (Hydrex 3210) de 15 mg/l antes de F1 y una dosis de floculante (Hydrex 6521) de 0,05 mg/l antes de F2. Por tanto, la configuración 3 permitió el cumplimiento de los objetivos i), ii) y iv) pero no del objetivo iii) para el agua pretratada. Otros estudios han obtenido valores de MFI similares con pretratamientos basados en filtros en serie. En el estudio de referencia [5], se compararon los resultados obtenidos con dos etapas de filtración monocapa de arena frente al pretratamiento extendido incluyendo una etapa adicional de filtración con carbón biológicamente activo. Aunque ambos esquemas de pretratamiento permitieron limitar el ensuciamiento coloidal, la versión extendida que incluía la etapa de filtración adicional redujo los valores de MFI por debajo de  $1\text{ s/l}^2$  mientras que en el otro caso el MFI se mantuvo por debajo de  $2\text{s/l}^2$ . Tal y como se espera en estos casos, los tratamientos que incluyen más etapas de filtración permiten alcanzar menores valores de MFI, siendo la configuración óptima la que permite alcanzar el valor objetivo inferior a  $1\text{ s/l}^2$  indicado por los fabricantes de membranas.

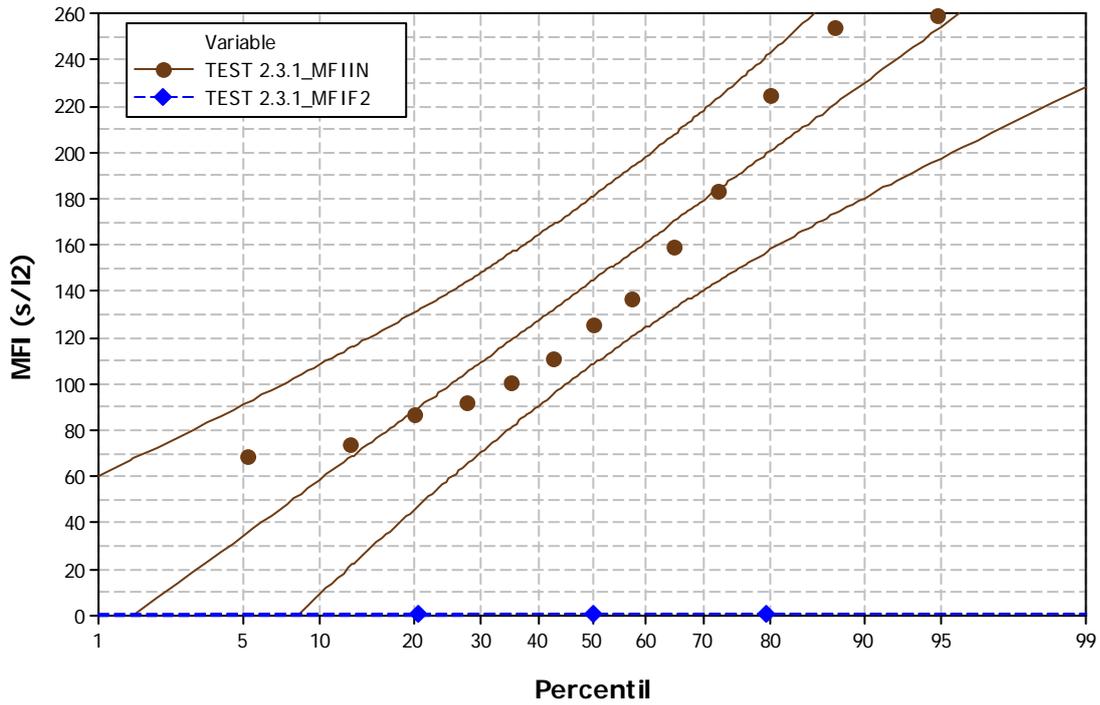


Figura 4.8.- Valores de MFI vs. percentiles para ensayo 2.3.1.

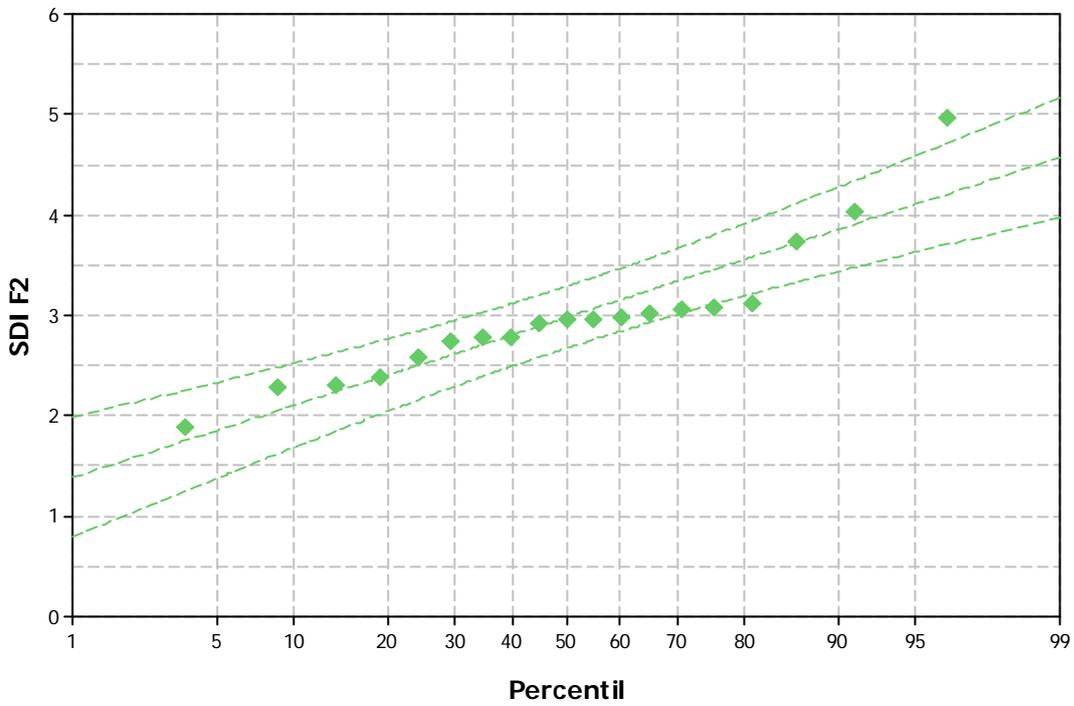


Figura 4.9.- Valores de SDI vs. percentiles para ensayo 2.3.1.

Para el agua de entrada del tipo 1, el SDI obtenido en el efluente de F2 fue menor que 5 pero el valor de MFI fue menor que  $4 \text{ s/l}^2$  con una fiabilidad del 95% con una dosis de coagulante (Hydrex 3210) de 15 mg/l antes de F1 y una dosis de floculante (Hydrex 6521) de 0,05 mg/l antes de F2.

Por otro lado, los resultados con otro coagulante (Hydrex 6761) dosificado antes de F1 y con una dosis de floculante (Hydrex 6521) de 0,05 ppm antes de F2 fueron peores, obteniéndose un SDI en el efluente de F2 mayor que 5. Considerando este mal resultado, este coagulante no fue considerado en otros ensayos.

En los ensayos realizados sin adición de químicos (ni coagulantes ni floculante), tal y como ocurrió en los ensayos previos, el SDI y el MFI en el efluente de F2 fueron también mayores que 5 y  $4 \text{ s/l}^2$  respectivamente, lo que implica que no se consiguió ninguno de los objetivos.

#### **4.6 CONCLUSIONES**

Tras probar diferentes configuraciones de pretratamiento de agua superficial para OI, se extraen las siguientes conclusiones.

Con la configuración 1 se consiguió un SDI menor que 5 con una dosis de coagulante (Hydrex 6761) de 2 mg/l. Sin embargo, en este caso el valor de MFI fue demasiado elevado, con valores en el entorno de  $80 \text{ s/l}^2$ . Por tanto, esta configuración sólo permitió el cumplimiento del objetivo i).

Con la configuración 2, se consiguieron valores de SDI menores que 5 y de MFI menores que  $4 \text{ s/l}^2$ , añadiendo una dosis de coagulante de 2 mg/l antes del filtro tricapa. De acuerdo a estos resultados, se cumplieron los objetivos i) y ii).

Finalmente, la configuración 3, operando con una dosis de coagulante (Hydrex 3210) de 15 mg/l antes del filtro bicapa combinado con una dosis de floculante (Hydrex 6521) de

0,05 mg/l antes del filtro tricapa, proporcionó los mejores resultados. Se consiguieron valores de SDI menores que 5 y valores de MFI menores que  $1 \text{ s/l}^2$ , cumpliendo los objetivos i), ii) y iv).

Según los resultados anteriores, las configuraciones 2 y 3 consiguieron, bajo las condiciones óptimas de operación, la calidad mínima requerida por los fabricantes de membranas para alimentar a las membranas de OI. Por tanto, estas configuraciones puede considerarse aceptables como pretratamiento de OI.

Con ninguna de las configuraciones se consiguieron los dos objetivos iii) y iv), establecidos por los fabricantes de las membranas para el funcionamiento óptimo de la OI. Sin embargo, con la configuración 3 se consiguió alcanzar el valor objetivo iv). Este valor se basa en el parámetro MFI, que tiene en cuenta el mecanismo de filtración a través de la torta. De ahí, que represente mejor el potencial de ensuciamiento del agua de alimentación a OI que el SDI [6], valor en el cual se basa el objetivo iii). En consecuencia, se concluye que la configuración 3, consistente en un filtro bicapa seguido por un filtro tricapa, permite conseguir una calidad mayor que la mínima requerida, proporcionando un pretratamiento de OI mejorado.

#### 4.7 REFERENCIAS

- [1] J.C. Schippers, A. Kostense, J. Verdouw, Colloid removal by in line coagulation, Proceedings of the International Symposium Water Filtration, Antwerp, May 21-23, 1982.
- [2] L. Coccagna: S. Vigneswaran (Ed.), Direct filtration, Water wastewater and sludge filtration, CRC Press, Inc., Florida, 1989.
- [3] Minitab Inc., MINITAB® Statistical Software, Release 14 for Windows, State College, PA, 2003.
- [4] R. Rosberg, Ultrafiltration (new technology), a viable cost-saving pretreatment for reverse osmosis and nanofiltration, a new approach to reduce costs, Desalination 110 (1997) 107-114.
- [5] M.M Nederlof, J.C. Kruithof, J.A.M.H. Hofman, M. Koning, J.P. Van der Hoek, P.A.C. Bonné, Integrated multi objective membrane systems application of reverse osmosis at the Amsterdam Water Supply, Desalination 119 (1998) 263-273.
- [6] A. Casañas, Métodos de predicción del potencial de ensuciamiento en sistemas de membrana: Medida comparativa del MFI en un caso real con dos líneas de pretratamiento diferentes, Research Report, LPGC University PhD Program, 2003.



## **CAPÍTULO 5**

# **ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL DEL PRETRATAMIENTO,**

## **SDI VS MFI**



## ÍNDICE

<b>5. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL DEL PRETRATAMIENTO, SDI VS MFI .....</b>	<b>105</b>
5.1 INTRODUCCIÓN .....	105
5.2 COMPARACIÓN DE PRETRATAMIENTOS DE OI PARA DIFERENTES APLICACIONES .....	107
5.3 DETERMINACIÓN DE LA CORRESPONDENCIA EXISTENTE ENTRE LOS CRITERIOS BASADOS EN SDI Y MFI.....	108
5.3.1 Caso 1: pretratamiento de agua de mar en desaladora.....	109
5.3.2 Caso 2: pretratamiento de agua superficial en planta industrial .....	116
5.4 CONCLUSIONES .....	120
5.5 REFERENCIAS .....	122



## **5. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL DEL PRETRATAMIENTO, SDI vs MFI**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

Tal como se ha indicado en el Capítulo 1, el pretratamiento del agua de alimentación a la ósmosis inversa es fundamental para evitar problemas de ensuciamiento de las membranas. Para la evaluación del potencial ensuciamiento de las membranas, se han desarrollado criterios basados en el cálculo de índices de atascamiento cuyos valores límite admisibles y óptimos vienen dados por los fabricantes de membranas.

Entre los índices de atascamiento mencionados se encuentran el SDI y el MFI analizados en el presente estudio. El SDI es el parámetro más extendido, ya que se trata de un índice cuyo cálculo es relativamente sencillo y suele llevarse a cabo de manera rutinaria por los operadores de planta. De ahí, que existan muchas más referencias de valores de SDI que de cualquier otro parámetro para la predicción del ensuciamiento de las membranas. La mayoría de estas referencias se basan en un valor de SDI objetivo menor que 3, valor a su vez recomendado como óptimo por los fabricantes de membranas. No obstante, estos últimos también consideran como admisibles valores de SDI de 4 ó 5.

Sin embargo, la medida del SDI presenta una serie de limitaciones como son, que no considera un factor de corrección para variaciones de presión y temperatura y tampoco tiene en cuenta los mecanismos de filtración. No presenta, por tanto, una relación directa con la materia coloidal o en suspensión presente en el agua. Por otro lado, el resultado de la medición también puede verse afectado por la resistencia de la membrana empleada así como por las variaciones del tamaño de poro [1].

Para compensar las limitaciones que presenta el SDI, se han desarrollado otros parámetros como el MFI, basado en el mecanismo de filtración a través de la torta, que tiene en cuenta el mecanismo de reducción de flujo que tiene lugar en las membranas. Además,

a diferencia del SDI, se trata de un índice normalizado para las condiciones de presión y temperatura. Por lo tanto, representa mejor las condiciones de operación de las membranas que el SDI, consiguiéndose unos resultados más reproducibles y exactos. Sin embargo, la medida del MFI es más compleja que la del SDI y, dado que necesita un equipamiento más complejo y caro para la toma de los datos de filtración, es más difícil realizarla en campo [1, 2]. La mayoría de estudios de MFI realizados se basan en un valor objetivo menor que  $1 \text{ s/l}^2$ , valor recomendado como óptimo por los fabricantes de membranas para controlar el atascamiento de las membranas. Al igual que en el caso del SDI, los fabricantes de membranas indican valores de MFI más altos considerados como admisibles, con un valor límite de  $4 \text{ s/l}^2$ .

En la práctica, resulta más complejo el cálculo del MFI por lo que en la mayoría de los casos se opta por realizar únicamente la medida del SDI.

Los valores de SDI y MFI que debe cumplir el agua pretratada para alimentación de las membranas de OI son los mismos para el caso de la desalación que para el tratamiento de agua superficial. Por ello, se toman dichos valores para realizar la comparativa de las diferentes configuraciones de pretratamiento estudiadas para ambas aplicaciones. Basado en esta comparativa, se determinará la correspondencia existente entre los criterios basados en los parámetros SDI y MFI.

Otros autores han tratado también de establecer la relación entre el SDI y el MFI teniendo en cuenta los valores límite indicados por los suministradores de membranas. En general, han concluido que, considerando la resistencia media de la membrana recomendada por la ASTM, valores de SDI menores que 3 se corresponden con valores de MFI por debajo de  $1 \text{ s/l}^2$ . También han referenciado que el incremento del MFI da lugar a un incremento exponencial del SDI, con valores de SDI de 5 para valores de MFI mayores que  $5 \text{ s/l}^2$ . En el caso de valores de SDI menores o iguales a 4 los valores de MFI serían también menores o iguales a  $4 \text{ s/l}^2$  [1, 2, 3]. Por otro lado, existe la referencia de valores de SDI inferiores a los valores de MFI medidos, correspondiéndose en este caso valores de SDI menores que 2 con valores de MFI en el rango de 3 a  $5 \text{ s/l}^2$  y valores de SDI menores que 1 con valores de MFI en el rango de 2 a menos de  $1 \text{ s/l}^2$  [4].

Teniendo en cuenta los límites establecidos para los estudios de demostración presentados en los capítulos 3 y 4, y según las recomendaciones de los fabricantes de membranas, se han considerado los siguientes valores de referencia para cada uno de los parámetros:

- i) valor máximo admisible de SDI de 5
- ii) valor máximo admisible de MFI de  $4 \text{ s/l}^2$
- iii) valor óptimo de SDI menor que 3
- iv) valor óptimo de MFI menor que  $1 \text{ s/l}^2$

## **5.2 COMPARACIÓN DE PRETRATAMIENTOS DE OI PARA DIFERENTES APLICACIONES**

En los dos casos de estudio presentados en los capítulos 3 y 4, los pretratamientos de OI realizados incluían las mismas etapas de tratamiento que, en resumen, consisten en un tratamiento físico-químico y/o filtración multimedia combinados en diferentes configuraciones.

A pesar de las diferentes características que presentaba el tipo de agua a tratar en cada una de las aplicaciones, los resultados obtenidos en los casos de estudio presentan muchas similitudes, que se detallan a continuación.

La configuración de tratamientos que proporcionó los mejores resultados, con la consecución de los cuatro valores límite indicados en el apartado anterior, contaba en ambos casos con tratamiento físico-químico seguido por una doble etapa de filtración incluyendo ésta filtros bicapa presurizados seguidos por filtros tricapa también presurizados. Si bien, en el caso del tratamiento de agua de mar, también se obtuvieron resultados similares obviando el tratamiento físico, con una simple etapa de coagulación en depósito previo a los filtros.

Por otro lado, los resultados obtenidos con la configuración que consistía en un tratamiento físico-químico seguido únicamente por un filtro también fueron satisfactorios,

permitiendo conseguir los resultados óptimos en el caso del tratamiento del agua de mar, y conseguir los requerimientos mínimos de calidad i) y ii) para alimentación de membranas de OI con agua superficial.

En el caso de adición de reactivos, se observó que la etapa de coagulación-floculación previa a filtración, complementada con la adición de coagulante en la entrada a filtración, también indicaba similar comportamiento en ambos casos de estudio, tanto en la localización del punto de dosificación de reactivos como en la necesidad de un proceso de coagulación previo al primer filtro. Lógicamente, dadas las diferentes características químicas del agua a tratar en cada caso, los reactivos utilizados, tanto coagulantes como floculantes, debieron adaptarse a cada caso concreto. Asimismo, en el caso del tratamiento del agua superficial, en el caso de la doble filtración en serie, además de la dosificación de coagulante en cabeza del primer filtro, fue necesario realizar una adición de floculante en la entrada del filtro tricapa para conseguir el valor óptimo de MFI que cumpliera con el valor objetivo iv).

### **5.3 DETERMINACIÓN DE LA CORRESPONDENCIA EXISTENTE ENTRE LOS CRITERIOS BASADOS EN SDI Y MFI**

Dados los diferentes escenarios estudiados, incluyendo diferentes calidades de agua bruta y las diferentes configuraciones, además de los gráficos de probabilidad con los cuales se analizaron los resultados obtenidos en cada una de las configuraciones, para la determinación de la correspondencia entre los criterios basados en SDI y MFI también se han realizado gráficos de intervalos de confianza. En estos últimos, asumiendo una distribución normal, se representa una línea vertical para cada grupo de datos en cuya parte central se indica el valor de la media. Además, en los extremos superior e inferior de dicha línea se representan barras horizontales que se corresponden con los valores del intervalo de confianza del 95% para la media, lo cual permite conocer la variabilidad de dichos datos. En el caso de los gráficos de probabilidad, en el capítulo 3, apartado 3.5.4, se detalla tanto lo que representa el área del gráfico como los parámetros estadísticos considerados.

De esta forma, agrupando los datos obtenidos con cada configuración estudiada en función del valor de SDI ó de MFI obtenido, y analizando posteriormente los valores de MFI y de SDI respectivamente, mediante los gráficos de probabilidad y los gráficos de intervalos de confianza, puede establecerse la correspondencia existente entre los criterios basados en los parámetros SDI y MFI en cada caso.

### **5.3.1 Caso 1: pretratamiento de agua de mar en desaladora**

En el caso del pretratamiento de agua de mar, se pudieron establecer dos grupos de datos basados en los valores del SDI: el primero para ensayos que permitieron conseguir el valor objetivo iii) SDI menores que 3, y el segundo incluyendo los ensayos que permitieron conseguir el valor límite i) SDI menores que 5 y por encima de 3. A su vez, se establecieron otros dos grupos de datos basados en los valores de MFI: un primer grupo con ensayos que permitieron conseguir el valor objetivo iv) MFI menores que  $1 \text{ s/l}^2$ , y otro grupo incluyendo los ensayos que permitieron conseguir el valor límite ii) MFI menores que  $4 \text{ s/l}^2$  y por encima de  $1 \text{ s/l}^2$ .

En las figuras 5.1 y 5.2 pueden verse los gráficos de probabilidad y de intervalos de confianza respectivamente, para el grupo de ensayos con valores de SDI menores que 3. En ambos gráficos, se representan los valores de SDI y MFI correspondientes al efluente de cada filtro F1 y F2 probados en las configuraciones seleccionadas. Tal y como muestra el gráfico de probabilidad de la figura 5.1, para valores de SDI menores que 3 se obtuvieron valores de MFI menores que  $1 \text{ s/l}^2$  y muy próximos a  $1 \text{ s/l}^2$  para el percentil 80 y el percentil 90 de la distribución, respectivamente. Por otro lado, analizando el gráfico con intervalos de confianza de la figura 5.2, se observa que la variabilidad de resultados para el intervalo de confianza del 95% respecto al valor medio obtenido en cada caso, presenta siempre valores de MFI menores que  $1 \text{ s/l}^2$  en el efluente.

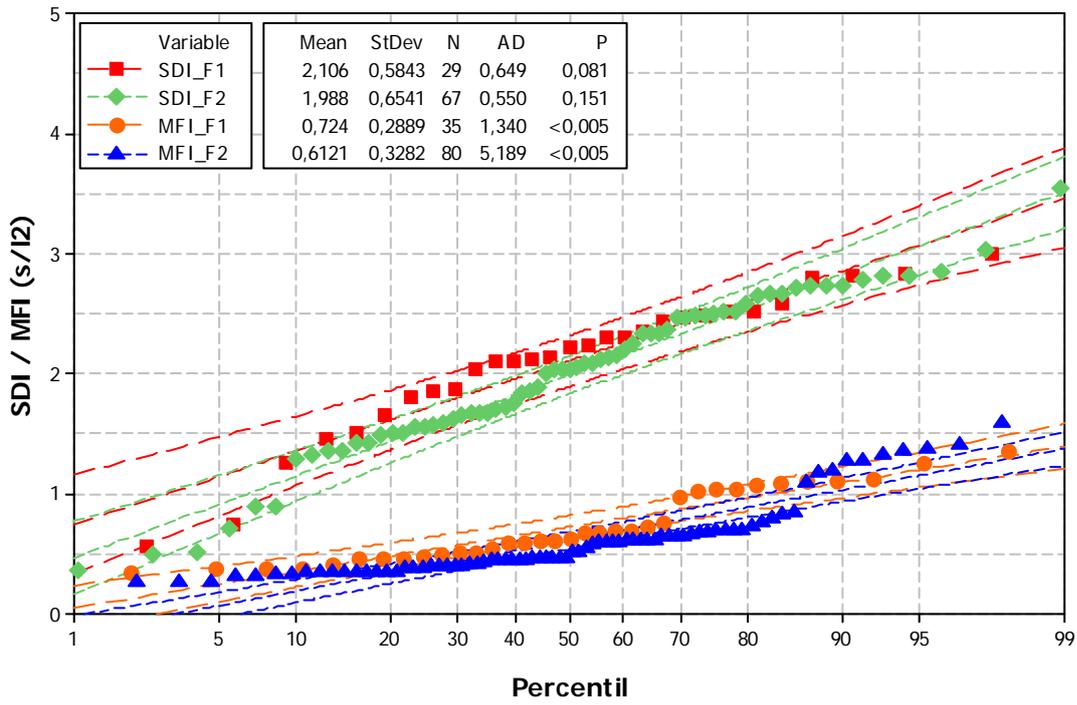


Figura 5.1.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para SDI<3

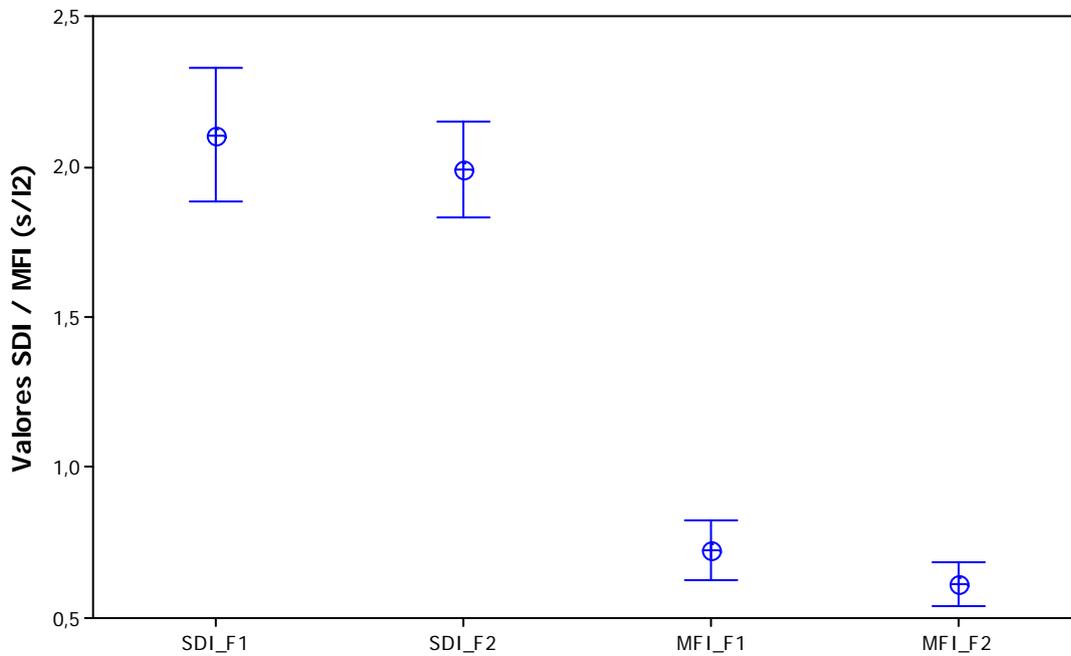


Figura 5.2.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para SDI<3

En las figuras 5.3 y 5.4 pueden verse los gráficos de probabilidad y de intervalos de confianza respectivamente, para el grupo de ensayos con valores de SDI en el rango de 3 a 5. En ambos gráficos, se representan los valores de SDI y MFI correspondientes al efluente de cada filtro F1 y F2 probados en las configuraciones seleccionadas. Tal y como muestra el gráfico de probabilidad de la figura 5.3, para valores de SDI entre 3 y 5 se obtuvieron valores de MFI menores que  $4 \text{ s/l}^2$  para el percentil 90 de la distribución, siendo el MFI menor que  $1 \text{ s/l}^2$  para el percentil 20. Por otro lado, analizando el gráfico con intervalos de confianza de la figura 5.4, se observa que la variabilidad de resultados para el intervalo de confianza del 95% respecto al valor medio obtenido en cada caso, presenta siempre valores de MFI menores que  $3 \text{ s/l}^2$  en el efluente.

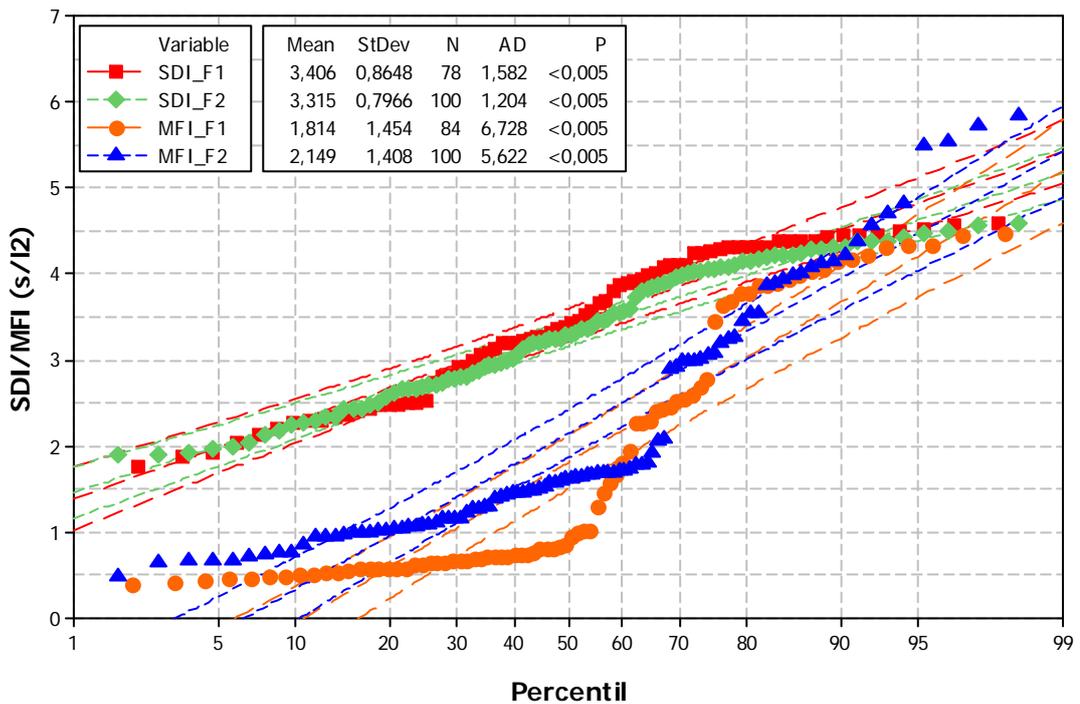


Figura 5.3.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para  $3 < \text{SDI} < 5$

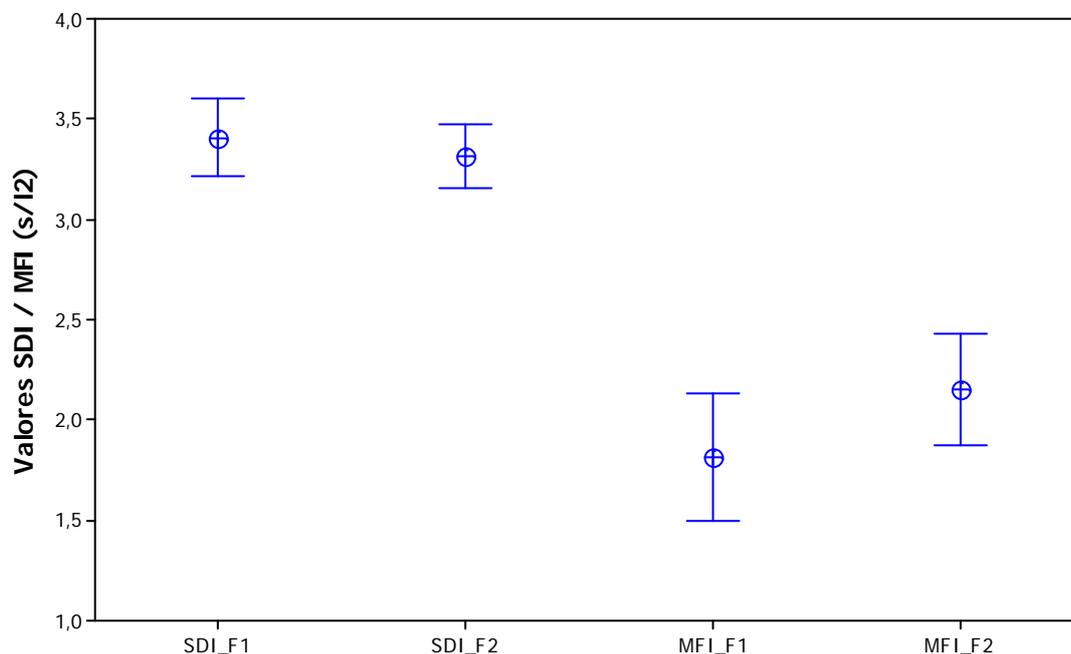


Figura 5.4.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para  $3 < \text{SDI} < 5$

En las figuras 5.5 y 5.6 pueden verse los gráficos de probabilidad y de intervalos de confianza respectivamente, para el grupo de ensayos con valores de MFI menores que  $1 \text{ s/l}^2$ . En ambos gráficos, se representan los valores de SDI y MFI correspondientes al efluente de cada filtro F1 y F2 probados en las configuraciones seleccionadas. Tal y como muestra el gráfico de probabilidad de la figura 5.5, para valores de MFI menores que  $1 \text{ s/l}^2$  se obtuvieron valores de SDI menores que 4 en F1 y menores que 3 en F2, para el percentil 90 de la distribución. Por otro lado, analizando el gráfico con intervalos de confianza de la figura 5.6, se observa que la variabilidad de resultados para el intervalo de confianza del 95% respecto al valor medio obtenido en cada caso, presenta siempre valores de SDI menores que 3 en el efluente.

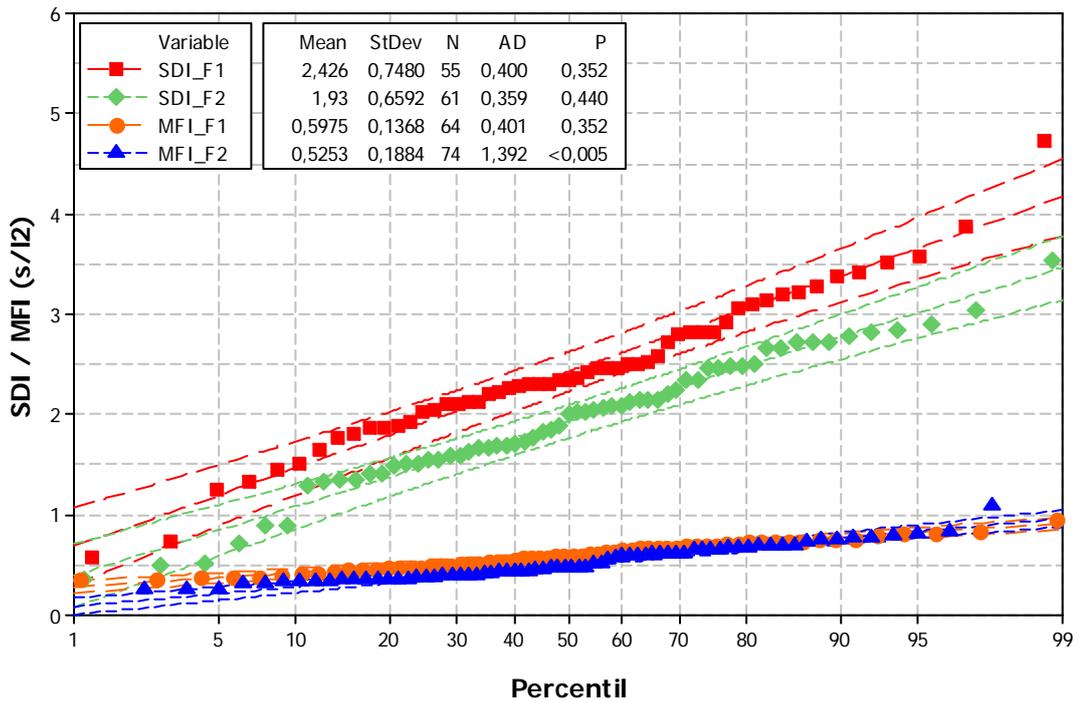


Figura 5.5.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para MFI<1

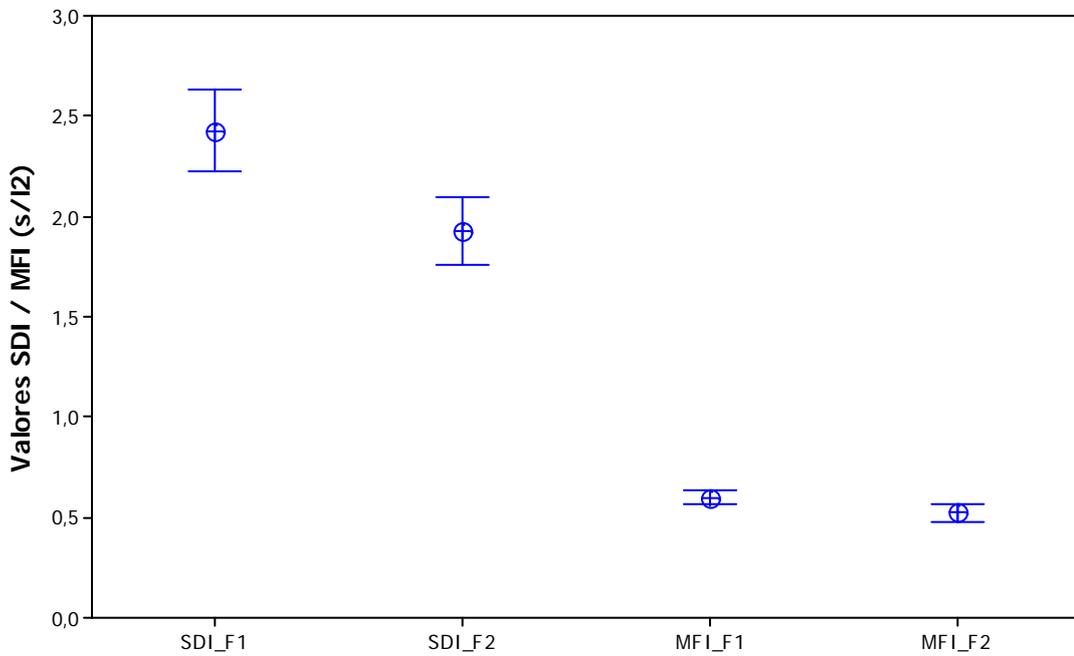


Figura 5.6.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para MFI<1

En las figuras 5.7 y 5.8 pueden verse los gráficos de probabilidad y de intervalos de confianza respectivamente, para el grupo de ensayos con valores de MFI en el rango de 1 a 4 s/l<sup>2</sup>. En ambos gráficos, se representan los valores de SDI y MFI correspondientes al efluente de cada filtro F1 y F2 probados en las configuraciones seleccionadas, a excepción del ensayo 2.1.3 que ha sido desechado del análisis por tratarse de una medida realizada a continuación del lavado del primer filtro presentando por ello variabilidad en las medidas de SDI y MFI.

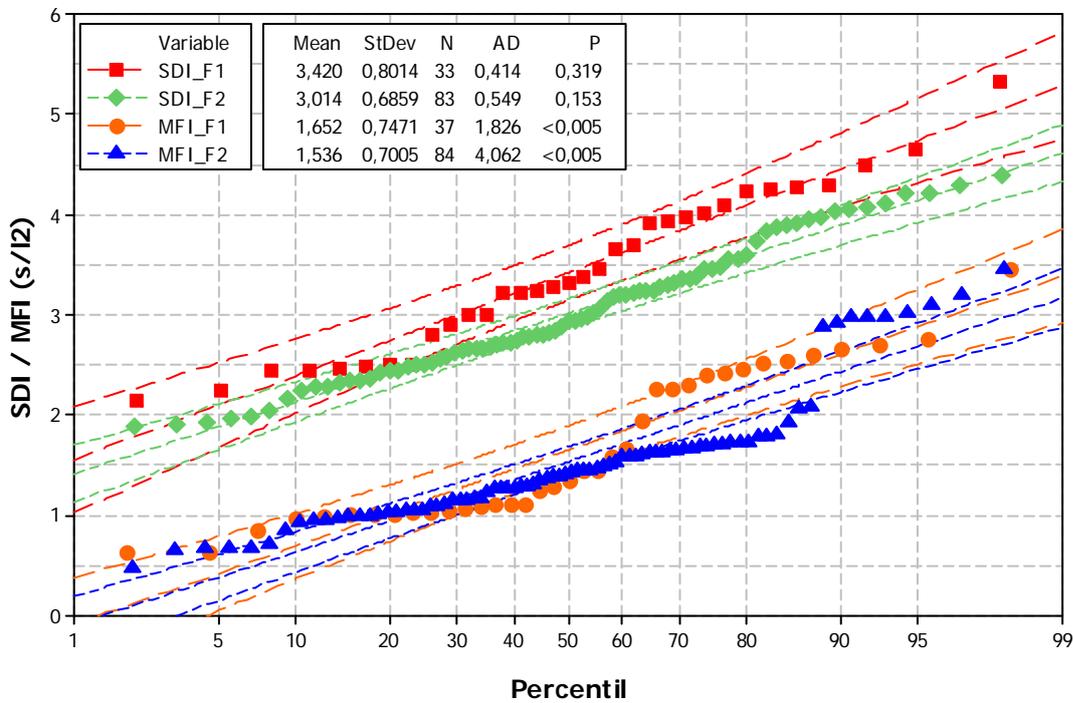


Figura 5.7.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para 1 < MFI < 4

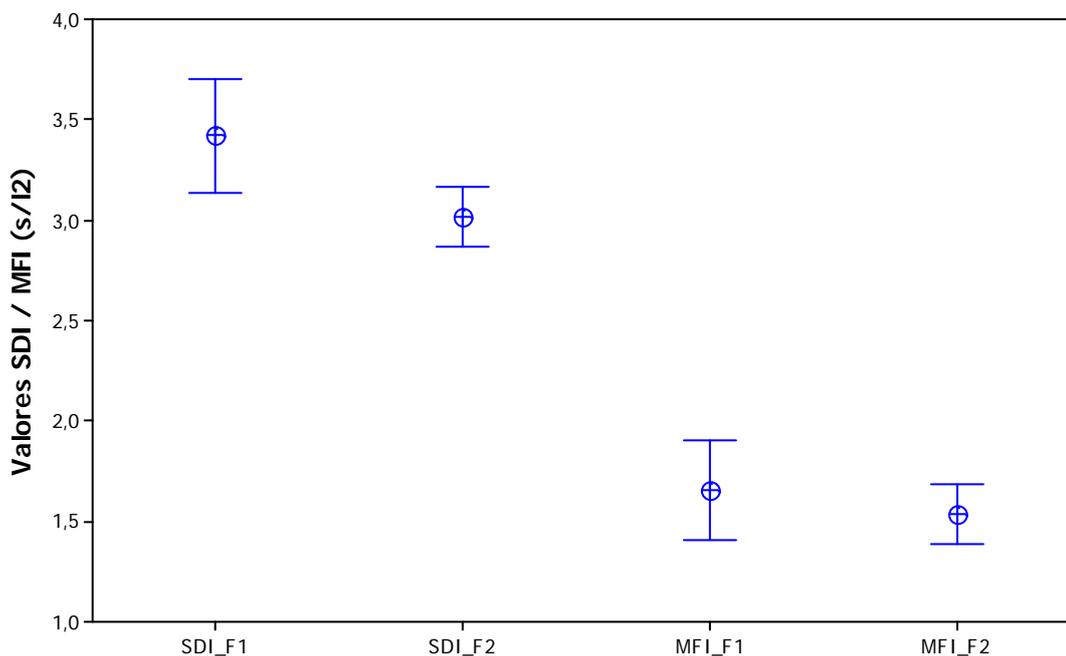


Figura 5.8.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para  $1 < \text{MFI} < 4$

Tal y como muestra el gráfico de probabilidad de la figura 5.7, para valores de MFI entre  $1$  y  $4 \text{ s/l}^2$  se obtuvieron valores de SDI menores que  $5$  para el percentil 95 de la distribución, siendo el SDI menor que  $4$  para el percentil 90 en el caso de F2 y para el percentil 70 en el caso de F1. Por otro lado, analizando el gráfico con intervalos de confianza de la figura 5.8, se observa que la variabilidad de resultados para el intervalo de confianza del 95% respecto al valor medio obtenido en cada caso, presenta siempre valores de SDI menores que  $4$  en el efluente.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que en el caso del agua de mar estudiada, los valores de SDI menores que  $3$  se corresponden con valores de MFI menores de  $1 \text{ s/l}^2$ , objetivos iii) y iv) respectivamente. En el caso del análisis de los valores de MFI menores que  $1 \text{ s/l}^2$ , se ha comprobado que se corresponden con valores de SDI menores de  $3$  ó  $4$ , según el intervalo de confianza del 95% respecto al valor medio ó en función de que se trate del efluente de F2 ó F1, es decir, con el valor óptimo iii) ó con el valor límite i). Por otro lado, en el caso de los valores de SDI en el rango de  $3$  a  $5$ , los valores de

MFI se mantendrán por encima de  $1 \text{ s/l}^2$  y por debajo de  $4 \text{ s/l}^2$ , correspondiéndose en este grupo los valores objetivo i) y ii). Por último, en el caso de los valores de MFI en el rango de 1 a  $4 \text{ s/l}^2$ , se ha comprobado que se corresponden con valores de SDI menores que 4 ó 5, según el intervalo de confianza del 95% respecto al valor medio ó según el percentil considerado, es decir, con el valor límite i).

### **5.3.2 Caso 2: pretratamiento de agua superficial en planta industrial**

En el caso del pretratamiento de agua superficial, solamente se pudo establecer un grupo de datos basado en valores de SDI menores que 5 y otro grupo basado en valores de MFI menores que  $4 \text{ s/l}^2$ .

En las figuras 5.9 y 5.10 pueden verse los gráficos de probabilidad y de intervalos de confianza respectivamente, para el grupo de ensayos con valores de SDI menores que 5 en el efluente de F2. En ambos gráficos, se representan los valores de SDI y MFI correspondientes al efluente del filtro F2 para las configuraciones seleccionadas. Tal y como muestra el gráfico de probabilidad de la figura 5.9, para valores de SDI menores que 5 se obtuvieron valores de MFI menores que  $2 \text{ s/l}^2$  para el percentil 90 de la distribución. Analizando el gráfico con intervalos de confianza del 95% de la figura 5.10, se observa que la variabilidad de resultados para el intervalo de confianza del 95% respecto al valor medio obtenido, presenta siempre valores de MFI menores que  $2 \text{ s/l}^2$  en el efluente. Sin embargo, en el caso de F1 solamente se dispone de medidas de SDI y MFI para la configuración 1 en la que el filtro F1 operaba solo. En este caso, únicamente uno de los ensayos presentaba un valor de SDI menor que 5 para un MFI de  $80 \text{ s/l}^2$ , tal y como se indicó en los gráficos 4.4 y 4.5 para el ensayo 1.1.1 del capítulo 4, siendo el resto de valores de SDI y MFI muy elevados.

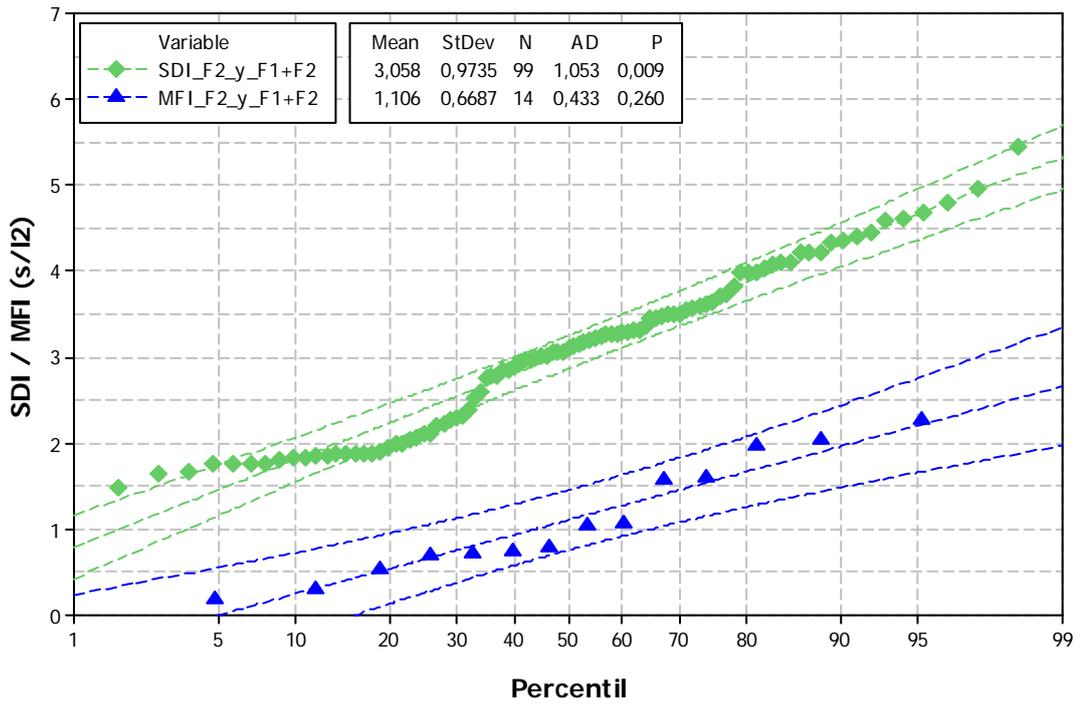


Figura 5.9.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para SDI<5

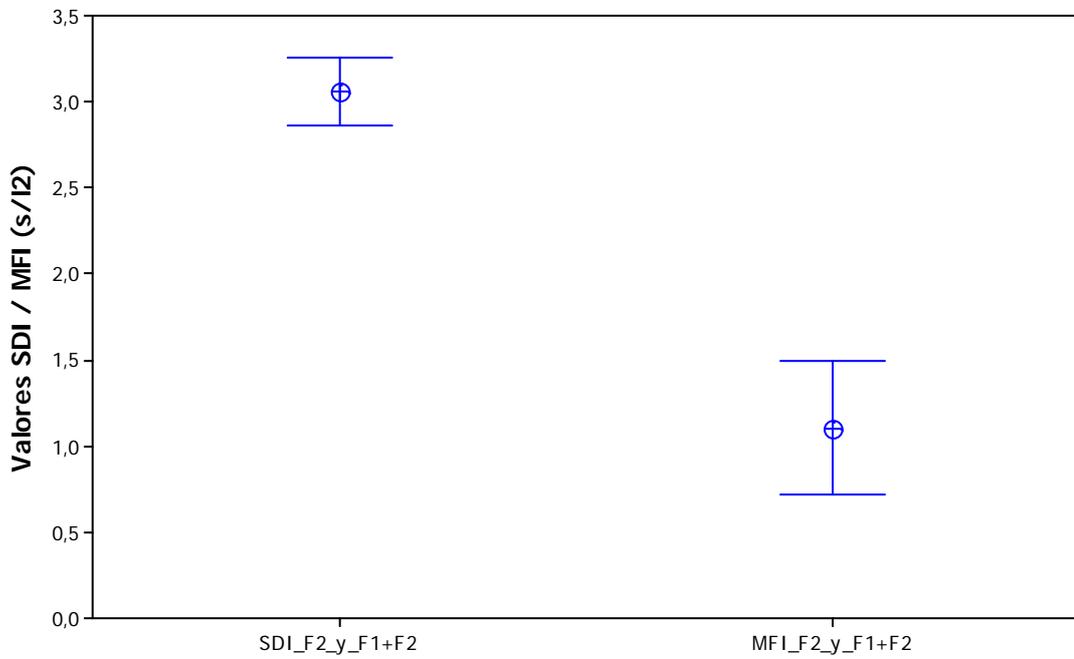


Figura 5.10.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para SDI<5

En las figuras 5.11 y 5.12 pueden verse los gráficos de probabilidad y de intervalos de confianza respectivamente, para el grupo de ensayos con valores de MFI menores que  $4 \text{ s/l}^2$ . En ambos gráficos, se representan los valores de SDI y MFI correspondientes al efluente del filtro F2 para las configuraciones seleccionadas. Tal y como muestra el gráfico de probabilidad de la figura 5.11, para valores de MFI menores que  $4 \text{ s/l}^2$  se obtuvieron valores de SDI menores que 5 para el percentil 90 de la distribución, siendo el SDI menor que 4 para el percentil 80. Analizando el gráfico con intervalos de confianza del 95% de la figura 5.12, se observa que la variabilidad de resultados para el intervalo de confianza del 95% respecto al valor medio obtenido, presenta siempre valores de SDI menores que 4 en el efluente. En el caso del efluente de F1 analizado en la configuración 1 del capítulo 4, ninguno de los ensayos consiguió valores de MFI menores que  $4 \text{ s/l}^2$ .

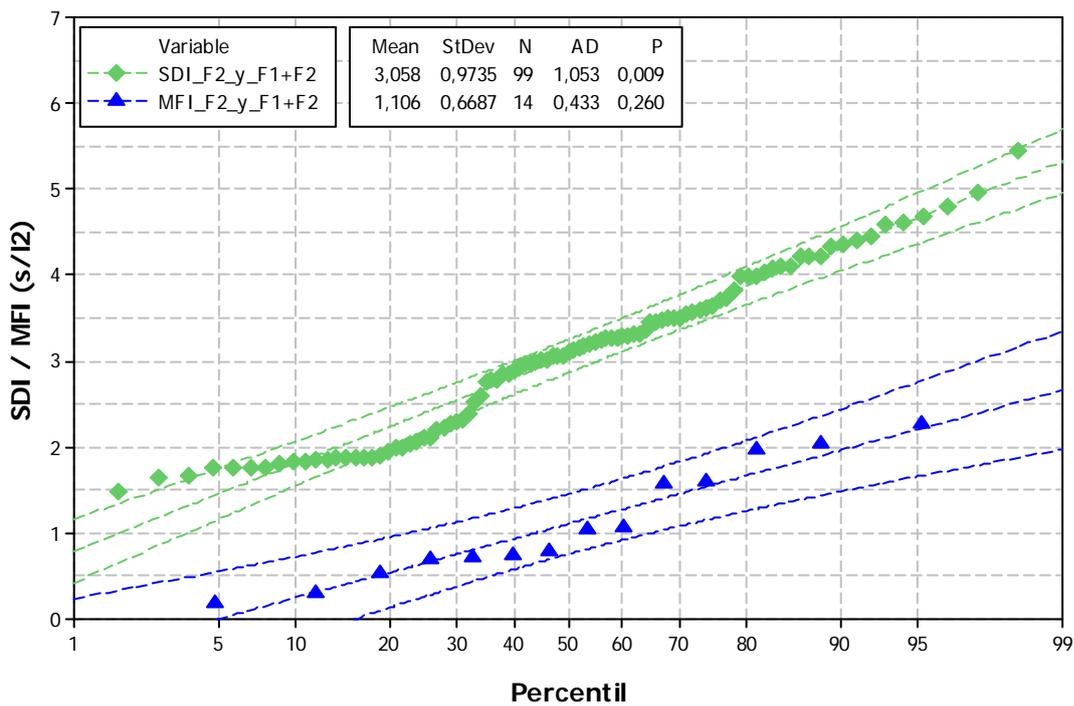


Figura 5.11.- Valores de SDI y MFI vs. percentiles para MFI<4

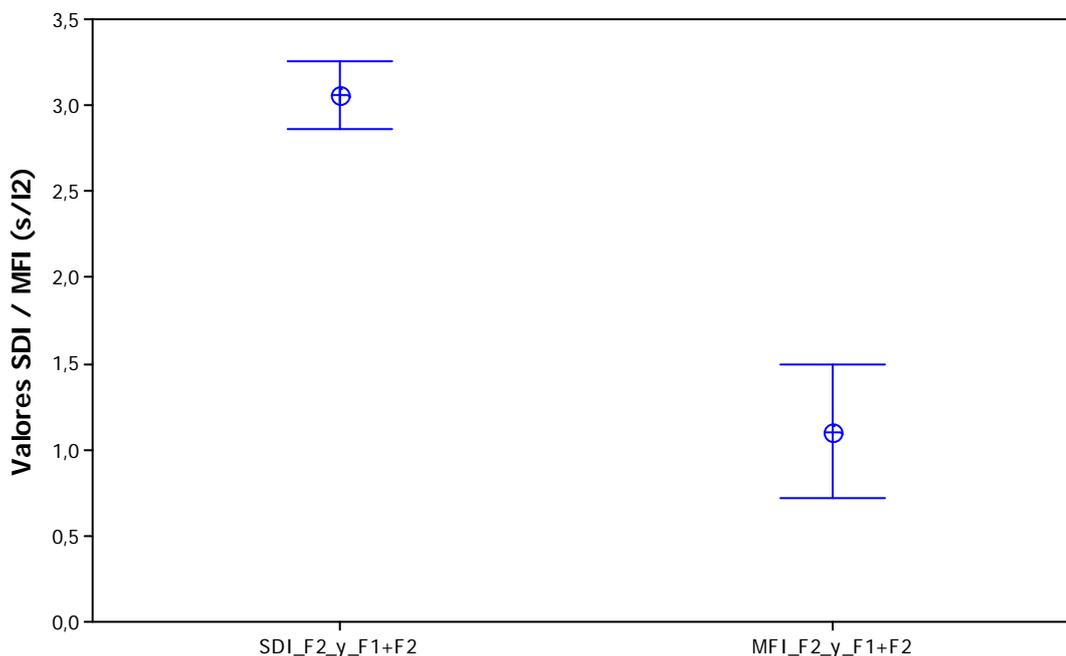


Figura 5.12.- Valores medios de SDI y MFI e intervalo de confianza para MFI<4

Teniendo en cuenta los resultados de los ensayos analizados, se puede concluir que en el caso del agua superficial estudiada, no siempre hay correspondencia entre los criterios basados en SDI y MFI. En el caso del efluente de F2, tanto en la configuración 2 como en la configuración 3, los valores de SDI menores que 5 se corresponden con valores de MFI menores que  $2 \text{ s/l}^2$ . Del mismo modo, en el caso del análisis de datos basado en valores de MFI menores que  $4 \text{ s/l}^2$ , se ha encontrado correspondencia con valores de SDI menores que 4 ó 5, según el intervalo de confianza del 95% respecto al valor medio, según el percentil considerado.

Sin embargo, en el caso de F1 se han encontrado valores de SDI menores que 5 que se corresponden con valores de MFI muy por encima de  $4 \text{ s/l}^2$ .

## 5.4 CONCLUSIONES

Considerando los resultados obtenidos en los dos casos de estudio presentados en los capítulos 3 y 4, se ha estudiado la posible existencia de una correspondencia entre los criterios basados en los parámetros SDI y MFI. En resumen, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

➤ En el caso de estudio del agua de mar y en ciertos escenarios del caso de estudio del agua superficial se ha encontrado correspondencia entre los criterios basados en los parámetros SDI y MFI, verificándose la correspondencia entre los valores óptimos y entre los valores admisibles indicados por los fabricantes de membranas.

➤ En el caso del pretratamiento de agua de mar, los valores del grupo de datos de SDI menores que 3 se corresponden con valores de MFI menores que  $1 \text{ s/l}^2$  y los valores de SDI en el rango de 3 a 5 se corresponden con valores de MFI por encima de  $1 \text{ s/l}^2$  y por debajo de  $4 \text{ s/l}^2$ . Los resultados obtenidos basados en los valores de MFI son similares, con valores de SDI menores que 4 para el grupo de datos con valores de MFI menores que  $1 \text{ s/l}^2$ , y valores de SDI menores que 5 para el grupo de datos con valores de MFI menores que  $4 \text{ s/l}^2$ .

➤ En el caso del pretratamiento de agua superficial, se ha detectado una configuración estudiada en la que no existe correspondencia entre los criterios basados en SDI y MFI. El efluente del filtro bicapa (F1) presenta valores de MFI muy elevados para valores de SDI menores que 5. Esta desviación de los valores de SDI en el efluente de F1 refleja la limitación del SDI cuando se trata de aguas con alto potencial de ensuciamiento. De hecho, en el caso de pretratamientos que consiguen agua más limpia, es decir, aquellos que incluyen la filtración tricapa, sí que se ha observado una correspondencia entre los criterios basados en SDI y los basados en MFI. Así, en las configuraciones que incluyen filtración tricapa (F2), los valores de SDI menores que 5 se corresponden con valores de MFI menores que  $2 \text{ s/l}^2$  en el efluente de F2. En este caso, el grupo de valores de MFI inferiores a  $4 \text{ s/l}^2$  se corresponde con valores de SDI menores que 5.

➤ La correspondencia encontrada entre los criterios basados en SDI y MFI en el efluente del pretratamiento de agua de mar y en el caso de agua superficial cuando el pretratamiento permite conseguir una calidad suficiente según ambos criterios, indica que en general, a pesar de las limitaciones ya comentadas, el SDI resulta una medida adecuada del potencial de ensuciamiento del agua. Sin embargo, considerando que el MFI es un parámetro de control que representa mejor las condiciones de operación de las membranas que el SDI, un control del pretratamiento basado únicamente en el SDI no estará del lado de la seguridad.

## 5.5 REFERENCIAS

- [1] R.M. Rachman, N. Ghaffour, F. Wali, G.L. Amy, Assessment of silt density index (SDI) as fouling propensity parameter in reverse osmosis (RO) desalination systems, *Desalination and Water Treatment* 51 (2013) 1091-1103.
- [2] A. Alhadidi, A.J.B. Kemperman, R. Schurer, J.C. Schippers, M. Wessling, W.G.J. van der Meer, Using SDI, SDI<sup>+</sup> and MFI to evaluate fouling in a UF/RO desalination pilot plant, *Desalination* 285 (2012) 153-162.
- [3] A. Alhadidi, B. Blankert, A.J.B. Kemperman, R. Schurer, J.C. Schippers, M. Wessling, W.G.J. van der Meer, Limitations, improvements and alternatives of the silt density index, *Desalination and Water Treatment* 51 (2013) 1104-1113.
- [4] S.F.E. Boerlage, M.D. Kennedy, M.P. Aniye, E.M. Abogrean, D.E.Y El-Hodali, Z.S. Tarawneh, J.C. Schippers, Modified Fouling Index ultrafiltration to compare pretreatment processes of reverse osmosis feedwater, *Desalination* 131 (2000) 201-214.

**CAPÍTULO 6**

**CONCLUSIONES**

**E**

**IMPLICACIONES PRÁCTICAS**



ÍNDICE

<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES E IMPLICACIONES PRÁCTICAS .....</b>	<b>127</b>
6.1	CONCLUSIONES .....	127
6.2	IMPLICACIONES PRÁCTICAS .....	128



## 6. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES PRÁCTICAS

### 6.1 CONCLUSIONES

➤ En el pretratamiento de agua de mar, se puede concluir que la configuración óptima de tratamiento que permitió lograr los objetivos establecidos según las condiciones de garantía de las membranas fue la compuesta por el sistema Actiflo<sup>®</sup>, incluyendo las etapas de coagulación, floculación (con floculante y adición de microarena) y maduración o simplemente la etapa de coagulación, seguido por una filtración bicapa, o bien la compuesta por dos filtros multimedia presurizados (filtros bicapa y tricapa) en serie con adición previa de coagulante en línea (configuraciones 2, 4 y 3 respectivamente).

En este último caso, con un solo filtro bicapa precedido de una dosificación de coagulante en línea, se alcanzaron los requerimientos mínimos de calidad.

➤ En el pretratamiento de agua superficial, las configuraciones que proporcionaron la calidad mínima para alimentación de membranas de OI consistían en tratamiento físico-químico, incluyendo etapas de coagulación, floculación y decantación, seguido por una coagulación en línea y una filtración, que a su vez consistía bien en filtro tricapa presurizado o bien en una doble etapa de filtros a presión, incluyendo filtro bicapa y filtro tricapa con adición de floculante antes de este último. Los mejores resultados se obtuvieron con la configuración que incluía la doble etapa de filtración, consiguiéndose los valores óptimos de MFI y los mínimos de SDI establecidos en los requerimientos de calidad de las membranas. En el caso de un solo filtro tricapa, únicamente se alcanzaron los requerimientos mínimos de calidad para los dos parámetros analizados.

➤ En la determinación de una posible correspondencia entre los criterios basados en los parámetros SDI y MFI, se ha comprobado que en general, cuando el pretratamiento proporciona agua con suficiente calidad (según ambos criterios), el SDI resulta una medida adecuada del potencial de ensuciamiento del agua. Sin embargo, en las aguas que no están lo bastante limpias, considerando las limitaciones del SDI, y que el MFI es un parámetro de control que representa mejor las condiciones de operación de las membranas,

un control del pretratamiento basado únicamente en el SDI no estará del lado de la seguridad. No puede adoptarse por tanto el SDI como único parámetro de control sin haber comprobado previamente su correspondencia con el MFI en el agua objeto de estudio.

## 6.2 IMPLICACIONES PRÁCTICAS

➤ En el establecimiento de los valores objetivo para la determinación del pretratamiento del agua de alimentación a OI, basándose en las recomendaciones de los fabricantes de membranas, los parámetros SDI y MFI deben ser 3 y 1  $s/l^2$ , respectivamente. Partiendo de dichos valores, los tratamientos que permitan conseguir como mínimo calidades con valores SDI y MFI por debajo de 5 y 4  $s/l^2$ , respectivamente, serán considerados aceptables.

➤ En vista de los resultados obtenidos en los casos de estudio detallados en este trabajo, para la determinación de los pretratamientos más adecuados de OI en aplicaciones de agua de mar o de agua superficial, se recomienda un tratamiento incluyendo, un proceso físico-químico con etapas de coagulación, floculación y decantación, seguido por una doble etapa de filtración con filtros bicapa y tricapa, con posibilidad de dosificación de coagulante antes del primer filtro y floculante antes del segundo. Asimismo, deberán ensayarse diferentes productos químicos tanto para la coagulación como para la floculación para conseguir los resultados óptimos en cada proceso.

➤ En el caso de la etapa de filtración, aunque en ambas aplicaciones un único filtro permitió conseguir valores de calidad aceptables, la introducción de la doble etapa de filtración con un filtro bicapa seguido por un filtro tricapa hace que el segundo filtro permita garantizar la buena calidad del efluente en casos de empeoramiento de la calidad del agua bruta o simplemente, que actúe como seguridad en caso de un fallo en la planta.

➤ Dado que no siempre existe una correspondencia entre los criterios basados en SDI y MFI, y siendo este último el que mejor representa las condiciones de operación de las membranas, se recomienda comprobar si existe dicha correspondencia entre ambos criterios antes de adoptar el SDI como único parámetro de control.

## **CAPÍTULO 7**

### **REFERENCIAS**



ÍNDICE

**7. REFERENCIAS .....133**



## 7. REFERENCIAS

Siguiendo la estructura clásica de una Tesis Doctoral, en este capítulo general de referencias se han recogido todas las referencias previamente incluidas en cada uno de los capítulos del trabajo.

P.C.Wankat, *Rate-Controlled Separations*, Blackie Academic and Professional, London, 1994.

N. Al.-Bastaki, A.Abbas, Long-term performance of an industrial water desalination plant, *Chemical Engineering and Processing* 43 (2004) 555-558.

Degrémont, *Manual Técnico del Agua*, 4ª ed. Española traducida del “Mémento Technique de l’eau”. Sociedad Degrémont, Artes gráficas Grijelmo S.A., Bilbao, 1979.

L. Malaeb, G.M. Ayoub, Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review, *Desalination* 267 (2011) 1-8.

*Manual del Ingeniero Químico volumen IV*, 4ª ed. Española traducida de la 7ª ed. de “Perry’s Chemical Engineers Handbook”. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U., Madrid, 2001.

K.T. Chua, M.N.A. Hawlader and A. Malek, Pretreatment of seawater: results of pilot trials in Singapore, *Desalination*, 159 (2003) 225-243.

J.A. Redondo, I. Lomax, Y2K generation FILMTEC RO membranes combined with new pretreatment techniques to treat raw water with high fouling potential: summary of experience, *Desalination* 136 (2001) 287-306.

S. Gare, RO systems: The importance of pretreatment, *Filtr. Separat.*, January/February (2002) 22-27.

K. Gaid, Y. Treal, Le dessalement des eaux par osmose inverse: l'expérience de Véolia Water, *Desalination* 203 (2007) 1-14.

B. Durham, A. Walton, Membrane pretreatment of reverse osmosis: long term experience on difficult waters, *Desalination* 122 (1999) 157-170.

C.J. Gabelich, T.I. Yun, B.M.Coffey, I.H.M. Suffet, Pilot scale testing of reverse osmosis using conventional treatment and microfiltration, *Desalination* 154 (2003) 207-223.

R. Rosberg, Ultrafiltration (new technology), a viable cost-saving pretreatment for reverse osmosis and nanofiltration, a new approach to reduce costs, *Desalination* 110 (1997) 107-114.

H. Bae, H. Kim, S. Jeong, S. Lee, Changes in the relative abundance of biofilm-forming bacteria by conventional sand-filtration and microfiltration as pretreatments for seawater reverse osmosis desalination, *Desalination* 273 (2011) 258-266.

C.J. Gabelich, T. I. Yun, K. P. Ishida, M. B. Leddy, J. Safarik, The effect of naturally occurring biopolymers on polyamide membrane fouling during surface water treatment , *Desalination* 161 (2004) 263-276.

C.J. Gabelich, T. I. Yun, B. M. Coffey, I. H. Suffet, Effects of aluminum sulfate and ferric chloride coagulant residuals on polyamide membrane performance, *Desalination* 150 (2002) 15-30.

N. Voutchkov, Considerations for selection of seawater filtration pretreatment system, *Desalination* 261 (2010) 354-364.

R. Y. Ning, T. L. Troyer, R. S. Tominello, Chemical control of colloidal fouling of reverse osmosis systems, *Desalination* 172 (2005) 1-6.

W. Peng, I. C. Escobarb, D. B. Whitec, Effects of water chemistries and properties of membrane on the performance and fouling, a model development study, *Journal of Mem. Sci.*, 238 (2004) 33-46.

T. Bagwell, *Handbook of Public Water Systems*, John Wiley and sons, 2001.

M. Al-Ahmad, F. A. A. Aleem, A. Mutiri, A. Ubaisy, Biofouling in RO membrane systems Part 1: Fundamentals and control, *Desalination* 132 (2000) 173-179.

Dow Water & Process Solutions, FILMTECTM Reverse Osmosis Membr. Tech. Man., 2009.

C. Visvanathan, N. Boonthanon, A. Sathasivan, V. Jegatheesanb, Pretreatment of seawater for biodegradable organic content removal using membrane bioreactor, *Desalination* 153 (2003) 133-140.

J. P. van der Hoek, J. A. M. H. Hofman, P. A. C. Bonné, M. M. Nederlof, H. S. Vrouwen-velder, RO treatment: selection of a pretreatment scheme based on fouling characteristics and operating conditions based on environmental impact, *Desalination* 127 (2000) 89-101.

J. A. Redondo, Improve RO system performance and reduce operating cost with FILMTEC fouling-resistant (FR) elements, *Desalination* 126 (1999) 249-259.

M. Galloway, J. Mahoney, Ultrafiltration for seawater reverse osmosis pretreatment, *Membr. Technol.*, January (2004) 5-8.

T. Peters, D. Pintó, Seawater intake and pretreatment/brine discharge environmental issues, *Desalination* 221 (2008) 576-584.

ASTM, D 4189-95, Standard Test Method for Silt Density Index (SDI) of Water, West Conshohocken, PA, 1995.

C.K. Teng, M.N.A. Hawlader, A. Malek, An experiment with different pretreatment methods, *Desalination* 156 (2003) 51-58.

J. C. Schippers, J. Verdouw, The modified fouling index, a method of determining the fouling characteristics of water, *Desalination* 32 (1980) 137-148.

A. Casañas, J. Sanz, E. Taberna, L. Guerrero, J.M. Ortega, Predicción del ensuciamiento coloidal en sistemas de ósmosis inversa y nanofiltración. Aplicación del índice de atascamiento modificado (MFI), *Tecnología del Agua* 257 (2005) 54-60.

S.F.E. Boerlage, Understanding the SDI and modified fouling indices (MFI0,45 and MFIUF), *Proceedings of IDA World congress MP07-143, Maspalomas, Spain, 2007.*

E. Brauns, E.V. Hoof, B. Molenberghs, C. Dotremont, W. Doyen, R. Leysen, A new method of measuring and presenting the membrane fouling potential, *Desalination* 150 (2002) 31-43.

M.M Nederlof, J.C. Kruithof, J.A.M.H. Hofman, M. Koning, J.P. Van der Hoek, P.A.C. Bonné, Integrated multi objective membrane systems application of reverse osmosis at the Amsterdam Water Supply, *Desalination* 119 (1998) 263-273.

S.F.E. Boerlage, M.D. Kennedy, M.P. Aniye, E.M. Abogrean, D.E.Y El-Hodali, Z.S. Tarawneh, J.C. Schippers, Modified Fouling Index ultrafiltration to compare pretreatment processes of reverse osmosis feedwater, *Desalination* 131 (2000) 201-214.

R. Mujeriego, La fiabilidad de los procesos de regeneración del agua, *II Jornadas Técnicas de Gestión de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales, Barcelona, Spain, 2005.*

R. Mujeriego K.Peters, Process reliability and significance of reclaimed water quality parameters, *Water Sci. Technol.* 57.5 (2008) 667-674.

Minitab Inc. MINITAB® Statistical Software, Release 14 for Windows, State College, PA, 2003.

J. Leperc, J. C. Schrotter, S. Rapenne, J. P. Croué, P. Lebaron, D. Lafon, K. Gaid, Use of Advanced Analytical Tools for Monitoring Performance of Seawater Pretreatment Processes, in: Proceedings of IDA World Congress MP07-124, Maspalomas, Spain, 2007.

S. Rapenne, C. L. Port, S. J. Roddy, J.P. Croué, Pretreatment Prior to RO for Seawater Desalination: Sydney Pilot Scale Study, Proceedings of IDA World Congress MP07-231, Maspalomas, Spain, 2007.

B. Sauvet-Goichon, Ashkelon desalination plant, a successful challenge, *Desalination* 203 (2007) 75-81.

J.C. Schippers, A. Kostense, J. Verdouw, Colloid removal by in line coagulation, Proceedings of the International Symposium Water Filtration, Antwerp, May 21-23, 1982.

L. Coccagna: S. Vigneswaran (Ed.), Direct filtration, Water wastewater and sludge filtration, CRC Press, Inc., Florida, 1989.

A. Casañas, Métodos de predicción del potencial de ensuciamiento en sistemas de membrana: Medida comparativa del MFI en un caso real con dos líneas de pretratamiento diferentes, Research Report, LPGC University PhD Program, 2003.

R.M. Rachman, N. Ghaffour, F. Wali, G.L. Amy, Assessment of silt density index (SDI) as fouling propensity parameter in reverse osmosis (RO) desalination systems, *Desalination and Water Treatment* 51 (2013) 1091-1103.

A. Alhadidi, A.J.B. Kemperman, R. Schurer, J.C. Schippers, M. Wessling, W.G.J. van der Meer, Using SDI, SDI<sup>+</sup> and MFI to evaluate fouling in a UF/RO desalination pilot plant, *Desalination* 285 (2012) 153-162.

A. Alhadidi, B. Blankert, A.J.B. Kemperman, R. Schurer, J.C. Schippers, M. Wessling, W.G.J. van der Meer, Limitations, improvements and alternatives of the silt density index, *Desalination and Water Treatment* 51 (2013) 1104-1113.

# **ANEJOS**



## ÍNDICE

<b>ANEJOS.....</b>	<b>143</b>
ANEJO I: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 1 PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA.....	143
ANEJO II: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 2 PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA.....	144
ANEJO III: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 3 PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA .....	146
ANEJO IV: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 4 PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA .....	148
ANEJO V: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 1 PRETRATAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN PLANTA INDUSTRIAL .....	150
ANEJO VI: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 2 PRETRATAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN PLANTA INDUSTRIAL .....	151
ANEJO VII: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 3 PRETRATAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN PLANTA INDUSTRIAL .....	155



## ANEJOS

### ANEJO I: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 1 PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA

ENSAYO	SDI RAW	SDI F0	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) RAW	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F0	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
2,1,1	12,89	4,8	4,56	19	10,46	5,73
	12,62	15	4,58	12,9	12,4	5,49
	7,18		4,58	16,04		
	12,86			18,41		
Percentil 90	14,99		4,59	20,14	13,19	5,83
2,1,3	12,89	15	2,24	19	2,2	1,15
	12,62	16,03	2,49	12,9	1,37	1,17
	7,18	4,78	3,9	16,04	1,36	1,02
	12,86	4,97	3,55	18,41	11,71 <sup>(*)</sup>	2,07
		5,12	2,74		5,73 <sup>(*)</sup>	1,69
		4,1	3,06		4,59 <sup>(*)</sup>	1,79
			2,34		3,71	1,43
		2,72			1,62	
Percentil 90	14,99	15,49	3,63	20,14	3,58	1,96
2,1,4	12,89	15	4	19	9,48	5,55
	12,62	15	4,21	12,9	9,34	4,21
	7,18	4,78	4,09	16,04		4,56
	12,86	4,97	4,48	18,41		4,82
			4,39			5,85
			4,31			5,92
Percentil 90	14,99	17,43	4,48	20,14	9,54	6,07

<sup>(\*)</sup>Valores no considerados en el cálculo del percentil 90. Variabilidad debida al lavado de F0

## ANEJO II: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 2 PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA

ENSAYO	SDI RAW	SDI F1	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) RAW	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F1	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
3,2,1	21	15	3,91	66,08	5,4	1,48
	13,3	15	2,95	32,28	65,48	1,65
	12,23	15	3,17	15,27	69,2	1,49
	15	15	2,68	252		1,7
	15		3,96	56,08		1,58
				2,05		
Percentil 90	19,66	15	3,99	207,13	92,58	1,74
3,2,2	21	15	3,22	66,08	107,97	1,72
	13,3	12,36	3,02	32,28	25,46	1,6
	12,23	7,22	2,44	15,27	8,4	1,46
	15	4,83	2,57	252	3,11	1,79
	15	12,19	3,13	56,08	19,52	1,52
		15	2,79		31,75	1,29
		15	2,44		42,13	0,95
		15	3,59		66,78	1,42
		6,55	3,45		4,32	1,5
		3,65	2,5		1,46	0,99
			2,8			1,04
			2,8			1,09
			2,98			1,16
			3,28			1,27
		2,96			1	
Percentil 90	19,66	16,61	3,39	207,13	74,57	1,67
3,2,3	21	3,24	2,66	66,08	1,67	1,05
	13,3	3,69	1,89	32,28	2,3	1,29
	12,23	2,91	4,05	15,27	1,3	1,46
	15	2,5	3,38	252	0,63	1,58
	15	3,21	3,32	56,08	2,43	1,67
		3,66	3,24		2,6	1,8
Percentil 90	19,66	3,78	4,03	207,13	2,8	1,82
3,2,4	21	3,27	2,52	66,08	2,77	1,4
	13,3	4,3	2,33	32,28	2,55	1,59
	12,23	3,98	2,71	15,27	2,26	1,36
	15	3,94	2,58	252	1,58	1,18
	15	3,21	2,73	56,08	1,46	1,62
			2,37			1,28
			2,82			1,37
			2,65			1,32
			2,51			1,27
	Percentil 90	19,66	4,35	2,79	207,13	2,87

ENSAYO	SDI RAW	SDI F1	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) RAW	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F1	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
2,2,5	7,32	2,14	2,29	17,11	1,11	0,97
	4,17	2,24	1,99	7,76	1,05	0,99
	13,65	3	3,87	31,77	1,11	1,15
	6,92	2,46	2,95	7,65	1,09	1,1
	13,31	2,51	3,19	18,37	1,04	1,03
	4,76		2,66	8,44		1,11
	6,99		1,93	8,99		1,06
			3,29			1,06
			2,28			0,85
			2,17			1,23
			1,9			0,95
		1,97			0,94	
Percentil 90	13,06	2,9	3,37	25,75	1,12	1,17
1,2,6	7,24	2,82	2,14	8,74	0,96	0,75
	7,07	3,22	2,72	6,3	0,75	0,77
	7,3	2,42	2,91	8,34	0,73	0,77
	6,71	2,73		5,81	0,59	
		2,34			0,69	
		2,47			0,71	
	2,8					
Percentil 90	7,42	3,08	3,1	9,17	0,89	0,78
2,2,7	7,3	3,57	2,73	8,74	0,57	1,1
	6,71	2,47	2,5	6,3	0,81	0,82
	11,88	2,51	2,09	8,34	0,81	0,8
	7,01	2,26	1,85	5,81	0,76	0,76
	4,6	2,36	2,06	8,68	0,68	0,68
		2,29	1,76		0,7	0,69
		3,27	2,09		0,74	0,7
		2,53			0,71	
Percentil 90	10,92	3,28	2,6	9,38	0,82	0,98
2,2,8	7,3	2,58	1,36	8,74	0,73	0,62
	6,71	2,51	1,42	6,3	0,68	0,67
	11,88	2,3	1,5	8,34	0,76	0,7
	7,01	2,82	1,7	5,81	0,68	0,68
	4,6	2,1	1,68	8,68	0,6	0,6
		2,3			0,7	0,62
		2,22			0,7	0,7
Percentil 90	10,92	2,72	1,73	9,38	0,76	0,71
2,2,9	8,18	2,77	2,07			
	11,1	2,29	2,04			
	8,19	2,67	1,93			
	7,98	2,46	1,95			
	8,8	2,01	1,62			
	11,46	2,23	2,86			
			1,94			
Percentil 90	11,3	2,77	2,55			

**ANEJO III: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 3 PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA**

ENSAYO	SDI RAW	SDI F1	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) RAW	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F1	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
1,3,1	5,06	4,07	3,84	4,59	1,81	3,06
	7,04	3,9	4,2	9,04	3,64	3,25
	6,7	4,11	4,32	6,16	3,87	3,54
	7,5	4,1	4,38	10,63	4,06	3,88
	7,04	3,79	4,29	9,38	4,15	4,02
	7,07	4,45	4,42	8,48	3,9	3,9
	7,18			11,56		
Percentil 90	7,83	4,36	4,51	11,68	4,7	4,11
1,3,2	5,06	4,44	4,15	4,59	4,44	4,37
	7,04	4,3	4,06	9,04	4,34	4,08
	6,7	4,39	3,81	6,16	4,34	4,13
	7,5	4,38	4,18	10,63	4,31	3,95
	7,04	4,25		9,38	4,47	
	7,07	4,51		8,48	4,21	
	7,18			11,56		
Percentil 90	7,83	4,5	4,27	11,68	4,47	4,36
2,3,3	5,06	4,56	4,5	4,59	4,66	3,46
	7,04	4,58	4,22	9,04	3,68	3,2
	6,7	4,43	3,48	6,16	3,87	2,99
	13,1	4,38	3,98	15,2	3,78	3,09
	7,5	4,31	4,04	10,63	3,77	3,02
	7,04	4,31	3,83	9,38	3,95	2,93
	7,07	4,44	4,39	8,48	4,18	3,98
	7,18	4,38		11,56	4,03	
		4,32			3,98	
	4,29					
Percentil 90	10,6	4,53	4,51	13,56	4,37	3,71
1,3,4	5,06	4,49	3,36	4,59	3,45	2,08
	7,04	4,26	3,36	9,04	2,7	1,73
	6,7	4,24	3,24	6,16	2,52	1,7
	7,5	3,92	3,24	10,63	2,41	1,65
	7,04	4,1	3,55	9,38	2,27	1,67
	7,07	4,02	2,88	8,48	2,46	1,69
	7,18	3,37	2,43	11,56	1,95	1,63
Percentil 90	7,83	4,51	3,64	11,68	3,13	1,93

ENSAYO	SDI RAW	SDI F1	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) RAW	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F1	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
2,3,5	12,5	3,52	1,28	4,23	0,84	1,28
	7,08	2,03	2,67	4,54	0,74	0,34
	12,09	1,77	2,85	5,62	0,58	0,67
	11,73	1,34	3,46	4,95	0,5	0,68
	13,04	1,88	2,35	4,8	0,54	0,71
	11,98		2,63	7,52		0,66
			2,79			0,48
Percentil 90	14,18	3,17	3,43	6,81	0,82	1,03
2,3,6	12,5	3,45	3,74	4,23	0,99	2,98
	7,08	3,31	4,29	4,54	1,02	2,99
	12,09	3	4,22	5,62	0,85	2,89
	11,73	2,44	4,11	4,95	1,01	1,92
	13,04		4,08	4,8		1,4
	11,98			7,52		1,46
	Percentil 90	14,18	3,62	4,36	6,81	1,07
2,3,7	13,64	4,65	2,03	8,76	1,45	0,39
	13,64	4,28	2,14	6,52	1,03	0,4
	11,38	5,33	1,83	8,08	2,66	0,39
	13,74			2,58		
	10,7			4,31		
Percentil 90	14,49	5,44	2,2	9,36	2,8	0,4
2,3,9	13,65	4,31	3,57	31,77	3,66	3,26
	6,92	4,97	4,24	7,65	4,22	3,54
	13,31	4,8	4,04	18,37	3,21	4,16
	4,76	4,88	4,15	8,44	3,51	4,71
	6,99			8,99		
Percentil 90	14,35	5,12	4,38	28,27	4,19	4,75

**ANEJO IV: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 4 PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN DESALADORA**

ENSAYO	SDI RAW	SDI F1	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) RAW	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F1	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
1,4,2	6,51	2,47	2,67	8,24	0,59	0,65
	7,08	3,14	1,55	7,27	0,58	0,65
	6,96	1,92	1,67	4,91	0,65	0,65
	6,84	2,13	1,5	5,88	0,8	0,62
	7,25	2,21	2,34		0,67	0,6
		2,3	2,15		0,63	0,58
		3,2			0,57	0,65
		3,09			0,56	0,59
					0,64	
					0,54	
Percentil 90	7,28	3,21	2,59	8,46	0,72	0,66
3,4,3	14,9	2,12	0,71	35,51	0,62	0,47
	15,05	1,51	0,36	35,97	0,46	0,35
	14,12	1,81	0,5	39,9	0,38	0,34
		0,74	0,89	30,95	0,38	0,61
		1,26	1,42	24,14	0,46	0,44
		1,65		24,7	0,47	0,47
		0,57		33,59	0,41	0,47
				15,74	0,38	
				23,96	0,35	
Percentil 90	15,33	2,1	1,3	39,28	0,54	0,57
2,4,4	12,8	2,49	2,25	20,26	1,12	0,84
	7,5	2,8	2,82	5,26	1,02	0,73
	12,72	2,44	3,03	14,94	1,35	1,19
	13,95		2,66	13,75	0,63	0,59
	11,87		2,34	12,14	1,08	0,61
	6,04		2,47	9,34	1,25	0,52
	6,48		2,46	7,13	0,97	0,55
	12,08		2,78	10,48		0,44
	14,12			31,08		
	13,04			11,94		
	12,4			9,8		
	13,24			7,11		
	Percentil 90	15,09	2,83	2,94	21,78	1,36

ENSAYO	SDI RAW	SDI F1	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) RAW	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F1	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
3,4,5	11,91	1,87	2,04	18,89	0,6	0,33
	13,53	2,04	1,63	17,33	0,52	0,47
	14,71	1,86	2,85	11,47	0,49	0,42
	12,75	2,83	2,73	8,11	0,52	0,45
	11,64	1,45	2,48	7,35	0,54	0,47
	14,27	2,35	1,35	14,37	0,48	0,44
	12,21	2,1	2,12	11,8	0,61	0,43
	10,96		1,72	8,04		0,45
			1,88	3,53		0,38
						0,47
Percentil 90	14,44	2,63	2,74	17,62	0,6	0,49
3,4,6	14,53	3,87	2,48	11,7	0,68	0,44
	14,63	2,92	1,49	9,74	0,73	0,51
	23,68	3,42	0,9	6,4	0,66	0,42
	13,58	3,38	2,01	5,6	0,47	0,34
	12,66	4,73	1,58	7,14	0,36	0,35
	11,42	3,06	2,2	6,02	0,51	0,35
	7,18		3,54	7,29	0,49	0,38
	12,32		1,59	8	0,48	0,39
	7,43		1,68	7,79	0,46	0,38
	13,98			5,64	0,43	0,35
	11,86				0,42	0,35
					0,39	0,35
						0,39
					0,35	
					0,33	
Percentil 90	18,61	4,41	2,91	10	0,66	0,44
2,4,8	13,64		1,66	8,76	0,29	0,31
	13,64		1,55	6,52	0,29	0,31
	11,38		0,52	8,08	0,41	0,26
	13,74		2,03	2,58		0,26
	10,7		1,33	4,31		0,26
			1,29			0,26
Percentil 90	14,49		2,04	9,36	0,42	0,31

**ANEJO V: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 1 PRETRATAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN PLANTA INDUSTRIAL**

ENSAYO	SDI F1	MFI (s/l <sup>2</sup> ) IN	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F1
1,1,0		115 135 95 46 35 166 30 41 19 89	19,4 19,5 25 18,2 17 33,8 27,9 16,9
Percentil 90		141,59	30,04
1,1,1	4,74 4,16 4,18 4,13 3,79 3,99 3,8 3,07 2,96 3,71 3,66	41 19 89 13 11 9 14 128	0,78 14,7 74,33
Percentil 90	4,48	97,39	80
1,1,2	6,32 6,04 4,91 4,7 4,36 4,33 4,32	41 19 89 13 11 9 14 128	33,38
Percentil 90	6,07	97,39	

**ANEJO VI: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 2 PRETRATAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN PLANTA INDUSTRIAL**

ENSAYO	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) IN	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
1,2,0		115 135 95 46 35 166 30 41 19 89	37,4 30,1 14,2
Percentil 90		41	42,44

ENSAYO	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) IN	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
1,2,1	4,45	41	2,27
	3,29	19	2,03
	3,05	89	1,6
	3,22	13	1,57
	2,22	11	0,18
	2,07	9	0,29
	2,21	14	
	2,11	128	
	2		
	2,1		
	1,83		
	1,88		
	1,8		
	1,88		
	2,03		
	1,86		
	1,95		
	1,75		
	1,88		
	1,68		
	1,48		
	1,65		
	1,88		
	1,75		
	1,76		
	1,75		
	1,88		
	1,83		
	1,86		
	2		
	4,1		
	3,71		
	3,61		
	3,31		
	3,35		
	2,53		
	2,29		
	4,21		
	3,49		
	3,51		
Percentil 90	3,5	97,39	2,46

ENSAYO	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) IN	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
1,2,2		41 19 89 13 11 9 14 128	2,25 1,87 1,75
Percentil 90		97,39	2,29
1,2,3		41 19 89 13 11 9 14 128	6,8
Percentil 90		97,39	
1,2,4	5,64 5,09 5,02 3,51 3,37 4,05 4,24 5 5,28		15
Percentil 90	5,62		

---

ENSAYO	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) IN	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
2,2,1	4,68	111	1,05
	3,82	159	0,74
	3,58	74	0,72
	3,6	69	
	3,47	126	
	3,49	101	
	3,45	92	
	3,45	87	
	3,26	259	
	3,26	254	
	3,14	137	
	2,89	225	
	3,18	183	
	2,86		
	2,86		
	4,6		
	4,11		
	4,08		
3,99			
1,41			
Percentil 90	4,37	229,89	1,07

**ANEJO VII: RESULTADOS CONFIGURACIÓN 3 PRETRATAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN PLANTA INDUSTRIAL**

ENSAYO	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) IN	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
1,3,0		115	12,7
		135	12,5
		95	23,7
		46	19,1
		35	23,8
		166	18,1
		30	
		41	
		19	
		89	
Percentil 90		141,59	24,73
1,3,1	3,98	33	1,96
	3,63	23	1,06
	3,15	62	
	3,24	38	
	3,55	61	
	3,01		
	3,29		
	3,32		
	3,2		
	3,26		
	5,45		
	4,22		
	4,34		
	3,99		
	5,73		
	4,8		
4,62			
4,21			
4,41			
4,35			
Percentil 90	4,98	65,68	2,33

ENSAYO	SDI F2	MFI (s/l <sup>2</sup> ) IN	MFI (s/l <sup>2</sup> ) F2
1,3,2	6,43 6,25 6,02 3,8 3,76 3,75 3,68 3,69 3,58		
Percentil 90	6,18		
2,31	3,07 2,98 3,05 3,11 2,97 3,01 2,79 4,97 4,03 3,74 1,89 2,59 2,28 2,39 2,31 2,75 2,79 2,93 2,96	111 159 74 69 126 101 92 87 259 254 137 225 183	0,53 0,79 0,69
Percentil 90	3,86	229,89	0,84