

POTABILIZACIÓN DE AGUA SUPERFICIAL MEDIANTE MEMBRANAS RESISTENTES AL ENSUCIAMIENTO. PLANTA PILOTO DEL CERRO DE LOS PALOS (TOLEDO)

Autores/Authors: F. Javier García Castillo (Jefe Departamento Tratamiento de Aguas, FACSA, jgarcia@facsa.com), Manuel Ortiz Gómez (Técnico Departamento Tratamiento de Aguas, FACSA, manuelortiz@facsa.com), Carlos Triviño Gallego (Jefe Adjuntía Medio Ambiente, Excmo. Ayuntamiento de Toledo, carlostrivino@toledo.es), Luis García Cuartero (Jefe de producción, TAGUS, lgarciacuartero@tagus-si.com)

Resumen:

Uno de los principales problemas de las aguas superficiales destinadas a abastecimiento es la variabilidad de muchos de sus parámetros durante las distintas estaciones del año, teniendo una influencia significativa la temperatura y los periodos de sequía a los que se ven sometidos. La estación municipal de tratamiento de agua potable del Cerro de los Palos, en Toledo, trata el agua proveniente de dos embalses, Torcón y Guajaraz, en donde durante los últimos años se han incrementado los episodios de proliferaciones biológicas masivas provocando dificultades en el tratamiento de potabilización. Esta planta abastece a la ciudad de Toledo y a otros siete municipios cercanos posibilitando el suministro de agua a más de 100.000 habitantes.

Ante el empeoramiento de la calidad del agua en estos embalses, el presente proyecto tiene como objetivo determinar la tecnología existente más adecuada para mejorar el tratamiento actual. Para ello, se ha diseñado y construido la "Planta piloto Cerro de los Palos", que incorpora etapas de preoxidación, pre y post ozonización, coagulación-floculación, decantación, filtración, adsorción con CAG, ósmosis inversa y remineralización.

La tecnología que está posibilitando las mayores reducciones de materia orgánica es la ósmosis inversa. El diseño de esta etapa ha sido enfocado a la reducción de las altas concentraciones de COT (hasta 15 mg/l en la captación), para lo que se han dispuesto las etapas de pre tratamiento adecuadas y se han seleccionado membranas con características de alta resistencia al ensuciamiento.

Abstract:

One of the main problems of surface water destined to supply is the variability of many of its parameters during the different seasons of the year, having a significant influence the temperature and the periods of drought to which they are subjected. The municipal drinking water treatment plant of Cerro de los Palos, in Toledo, treats water from two reservoirs, Torcón and Guajaraz, where during recent years the episodes of massive biological proliferation have increased, causing difficulties in the treatment. This plant supplies the city of Toledo and seven other nearby municipalities, supplying water to more than 100.000 population.

Because of the worsening of water quality in these reservoirs, the present project aims to determine the most suitable technology to improve the current treatment. For this purpose, the "Cerro de los Palos pilot plant" has been designed and built. It incorporates pre oxidation, pre and post ozonation, coagulation-flocculation, decantation, filtration, adsorption with GAC, reverse osmosis and remineralization stages.

The technology that is enabling the greatest reductions in organic matter is reverse osmosis. The design of this stage has been focused on the reduction of high concentrations of TOC (up to 15 mg/l in reservoirs), so that the appropriate pre-treatment stages have been designed and membranes with characteristics of high fouling resistance have been selected.

1 INTRODUCCIÓN

La estación de tratamiento de agua potable del Cerro de los Palos abastece a la ciudad de Toledo y a otros siete municipios cercanos (Argés, Layos, Cobisa, Nambroca, Burguillos, Polán y Guadamur), posibilitando el suministro de agua a más de 100.000 habitantes.

La planta actual data del año 1971 y sustituye a la antigua planta de 1965, construida cuando los primeros problemas de calidad obligaron a empezar a tratar el agua con un proceso físico químico. La capacidad de la ETAP se duplicó en 1990 hasta los 51.800 m³/día que tiene actualmente.

El agua bruta tratada en la planta procede de dos captaciones de origen superficial, el embalse de Torcón y el de Guajaraz. El embalse de Torcón, situado en el municipio de Navahermosa, tiene una capacidad de 6,8 Hm³ y su cuenca de recogida de agua está formada por varias hectáreas de monte virgen. El embalse de Guajaraz, situado en el municipio de Argés, tiene una capacidad de almacenamiento de 18 Hm³ y su principal aportación de agua es el arroyo Guajaraz, el cual recibe el agua desde otros arroyos cercanos que discurren por municipios de alrededor.

Los periodos de sequía, las propiedades físico químicas variables durante las distintas estaciones y la detección desde el año 2014 de proliferaciones biológicas masivas con frecuencia y magnitud superior a las habitualmente detectadas en los últimos años, dificultan el tratamiento del agua en la planta actual del Cerro de los Palos.

La obsolescencia de la tecnología de la planta es evidente tras los más de 45 años que posee esta instalación. A esta circunstancia hay que añadirle los problemas típicos de las captaciones de origen superficial, tales como contaminación bacteriológica, episodios de turbideces altas por escorrentía de lluvias, etc. Y adicionalmente hay que tener presente que el marco legislativo actual ha cambiado, ya que la normativa sanitaria ha evolucionado estableciendo nuevos parámetros de control para la calidad del agua y haciendo más restrictivos los límites de otras sustancias que ya se controlaban anteriormente.

Tabla 1: Comparación de parámetros entre la legislación vigente de agua destinada a consumo humano y la normativa anterior, ya derogada.

LEGISLACIÓN		RD1138/1990	RD140/2003
PARÁMETRO	MICROCISTINA	-	1 µg/L
	TRIHALOMETANOS	<i>"Otros compuestos organoclorados no incluidos en el grupo de plaguicidas"</i>	100 µg/L 150 µg/L (hasta 2009)
	TURBIDEZ	6 UNF	1 UNF a salida de ETAP 5 UNF en red de distribución
	COT	<i>"sustancias no deseables sin valor guía ni concentración máxima admisible"</i>	Sin cambios anómalos. En 2005, 7 mg/l valor máximo consensuado con CCAA
	Oxidabilidad	<i>"sustancias no deseables con concentración máxima admisible de 5 mg/L O₂"</i>	Valor paramétrico de 5 mg/L O ₂
	pH	Valores guía entre 6,5 y 8,5. Concentración máxima admisible de 9,5	Valor paramétrico entre 6,5 y 9,5 Agua como no apta para el consumo: Valor mínimo: 4,5 y Valor: Máximo: 10,5.
Índice de Langelier	-	<i>"El agua en ningún momento podrá ser ni agresiva ni incrustante. El resultado de calcular el IL debería estar comprendido entre +/- 0,5 "</i>	

Por todo lo anterior, TAGUS, como concesionaria del servicio, y el Ayuntamiento de Toledo, como titular de la instalación, se ven obligados a afrontar el reto de la modernización de la ETAP del Cerro de los Palos, para así dotar a la planta de los nuevos procesos de tratamiento que posibiliten el cumplimiento con garantías de todos los parámetros incluidos en la actual legislación sanitaria.

2 OBJETIVOS

Previamente a la construcción de una o varias etapas nuevas en la planta, resulta necesario realizar un pilotaje completo que determine cuál es la tecnología existente más adecuada para mejorar el tratamiento actual.

El objetivo por tanto de este proyecto de investigación se basa en evaluar el funcionamiento de las diferentes tecnologías de potabilización existentes en el mercado, especialmente aquellas que posibilitan una mayor efectividad en el tratamiento de aguas superficiales con elevado contenido de materia orgánica, reflejado en gran medida a través del Carbón Orgánico Total (COT), cuyo incremento en los últimos años es indicativo de los episodios de proliferaciones biológicas acontecidos en los embalses. Para dar la máxima validez a los resultados obtenidos, toda la experimentación se está llevando a cabo en una instalación real, situada junto a la entrada de agua bruta de la actual ETAP del Cerro de los Palos, en Toledo.

Concretamente, el objetivo de la ponencia se centra en el estudio del comportamiento de membranas de ósmosis inversa, con propiedades específicas para minimizar su ensuciamiento, ante la filtración de aguas superficiales con concentraciones de materia orgánica elevadas.

3 PROCEDIMIENTO

Con el fin de dar cumplimiento a estos requerimientos, el proyecto se ha dividido en dos etapas. La primera de ellas ha consistido en el diseño y construcción de la “Planta piloto del Cerro de los Palos”. Y la segunda corresponde a la realización de los diferentes ensayos programados.

3.1 Diseño de la planta

La planta piloto incorpora las siguientes etapas de tratamiento:



Figura 1: Etapas del proceso de la planta piloto.



Figura 2: Detalles de la planta piloto.

El suministro de agua bruta a la planta piloto se realiza mediante una bomba sumergible de 5 m³/h de caudal instalada en el canal de agua de aporte a la ETAP.

Se describe a continuación cada una de las etapas de la planta:

3.1.1 Pre oxidación

La planta dispone de ozonización, inyección de dióxido de cloro y de hipoclorito sódico, y está preparada para adicionar otros oxidantes si fuera necesario (cloraminas, permanganato potásico, peróxido de hidrógeno)

Para la ozonización se ha instalado un tanque de acero inoxidable con presión de trabajo máxima 10 bar, que proporciona el tiempo de contacto necesario del reactivo con el agua. La admisión de ozono se realiza a través de un inyector venturi situado a la entrada del tanque y para su regulación y control se dispone de un rotámetro de PVC. Al disponer de un generador de ozono en la planta actual, se ha dispuesto una derivación de ¼" de acero inoxidable desde la acometida de la planta industrial hasta la planta piloto.

3.1.2 Dosificación de carbón activo en polvo

Junto a los depósitos de dióxido de cloro e hipoclorito sódico se ha instalado un depósito de preparación de lechada de carbón activo en polvo, de 230 litros de capacidad y equipado con electroagitador.

La inyección de la lechada de carbón activo se realiza en una cámara de mezcla independiente con posibilidad de variar su volumen a través de un juego de válvulas dispuesto a tal efecto. Para facilitar el contacto del carbón con el agua, ésta se ha equipado con un agitador de baja velocidad.

3.1.3 Coagulación-Floculación

Anexos al resto de depósitos de reactivos, se han dispuesto también otros dos depósitos de 230 litros destinados al almacenamiento de coagulante y de floculante, equipado este último con electroagitador para posibilitar el uso de floculantes sólidos.

Tras la cámara de mezcla del carbón activo en polvo, se encuentran las cámaras de coagulación-floculación, equipadas con sus correspondientes electroagitadores y con posibilidad de modificar su volumen según las necesidades del proceso.

3.1.4 Decantación

El decantador se ha realizado con polipropileno y su estructura perimetral se ha reforzado con perfiles de acero. Se ha equipado con un bloque de lamelas de PVC de dimensiones 1.000 mm x 1.000 mm x 1.000 mm.

Las purgas del decantador están automatizadas y el sistema de control permite modificar su temporización en función de los requerimientos del proceso. Del mismo modo existe un circuito de recirculación de los fangos, compuesto por una bomba helicoidal equipada con variador de frecuencia y un caudalímetro que realizan el lazo de control necesario para ajustar el porcentaje de recirculación deseado. Esta recirculación se puede realizar tanto a la entrada del propio decantador como a la entrada de las cámaras de mezcla.

3.1.5 Filtración

Posteriormente al decantador se encuentran dos filtros cilíndricos de lecho abierto fabricados en acero inoxidable, con placa de crepinas en el fondo y una altura de lecho útil de 80 cm.

El filtro nº 1 tiene un lecho de arena silíceo de granulometría 0,4 – 0,8 mm y el filtro nº 2 tiene un lecho de vidrio filtrante.

La regulación del caudal en cada filtro se realiza con un lazo de control entre un caudalímetro electromagnético situado a la salida del agua filtrada y una electroválvula con ajuste de posición remoto.

El agua filtrada se almacena en un depósito de 700 litros desde donde es rebombada al circuito de postratamiento mediante una bomba con caudal 5 m³/h equipada con variador de frecuencia. La salida de

este bombeo dispone de un transductor de presión y un caudalímetro para poder ajustar su funcionamiento a los requerimientos del proceso.

3.1.6 Microfiltración

La etapa de microfiltración está compuesta por cuatro carcassas transparentes de 20" en paralelo, provistas de cartuchos filtrantes de diferentes tamaños de paso.

3.1.7 Postozonización

Del mismo modo que para la ozonización previa, se ha instalado un tanque de acero inoxidable con presión de trabajo máxima 10 bar, admisión de ozono con un inyector venturi, y regulación y control con rotámetro de PVC.

3.1.8 Adsorción Con Carbón Activo Granular

A la salida de la postozonización se han instalado dos filtros de carbón activo granular, con botella de poliéster reforzado con fibra de vidrio y válvula de lavado automático. Cada filtro contiene 80 Kg. de carbón. Se han utilizado carbones de diferentes características.

El funcionamiento de los filtros permite trabajar a un caudal constante determinado mediante consigna, y su regulación se realiza a través de un lazo de control entre una caudalímetro instalado a la salida de cada filtro y una electroválvula con ajuste de posición remoto.

3.1.9 Ósmosis Inversa

La etapa de ósmosis inversa está instalada en paralelo a los filtros de carbón activo. Está dimensionada para producir un caudal de permeado de 800 l/h y está compuesta básicamente por:

1. Prefiltro de cartucho de 5 micras
2. Bomba de alta presión de 2 CV de potencia
3. Circuito de recirculación que posibilita un rendimiento hidráulico del 70%
4. Sensor de conductividad en la salida del agua de permeado
5. Caudalímetros y rotámetros de control de agua permeada, agua concentrada y agua de recirculación.



Figura 3 Detalles de la etapa de ósmosis

Está equipada con 4 uds. de membranas con tratamiento de su superficie especialmente diseñado para aumentar su hidrofilia a través de la modificación de su carga eléctrica, así como de su rugosidad.

Todo esto permite disminuir la adherencia de la contaminación y extender su vida útil. Además, al disponer también de un espaciador más amplio, se proporciona una mejor resistencia a la suciedad, facilitando su limpieza y alargando el tiempo entre lavados.

Posteriormente a la puesta en marcha de esta etapa, se ha ejecutado un circuito de limpieza adicional para así poder evaluar con mayor exactitud la resistencia debida al ensuciamiento químico reversible. Por otro lado, para analizar el comportamiento entre las distintas posiciones que ocupan las membranas, se han insertado grifos toma muestras a la salida de cada membrana, así como manómetros en el circuito individual de rechazo de cada una de ellas.

3.1.10 Desinfección Final

La etapa de desinfección final consiste en diferentes inyecciones de reactivo en tubería a la entrada de un mezclador estático. Se dispone de inyecciones de hipoclorito sódico y dióxido de cloro, a través de los depósitos y bombas de dosificación descritas en la etapa de preoxidación.

3.1.11 Instrumentación

Para verificar la calidad del agua en continuo se ha equipado a la planta piloto con sondas de pH y conductividad, junto con un sensor espectrofotométrico con el que se mide, entre otros, parámetros en continuo como: COT, DOC, turbidez, nitratos, UV254, UV436, etc. y cuyo principal objetivo es cuantificar las absorbancias en las regiones ultravioleta y visible del espectro electromagnético para correlacionarlas con los compuestos orgánicos que contribuyen a la presencia de COT en el agua.

El analizador dispone de 3 entradas posibles de agua, de manera que se puede medir tanto el agua bruta, como el agua de salida, así como un tercer origen desde cualquier punto intermedio del proceso.

3.2 Metodología de trabajo. Ensayos

El proyecto de los ensayos de investigación se divide temporalmente en dos fases. La primera comenzó en septiembre de 2016 y finalizó en octubre de 2017. La segunda fase ha comenzado en abril de 2018 y tendrá una duración de un año.

Durante la primera fase se llevaron a cabo más de cincuenta ensayos, mientras que en la actualidad se están definiendo los de la segunda fase, centrándose estos últimos en la filtración con membranas.

Tabla 2: Ensayos de la primera fase del proyecto.

BLOQUE	ENSAYO		BLOQUE	ENSAYO	
1	PIL-TAG-101	Reproducción de ETAP TAGUS a caudal bajo, 15.000 m ³ /día -Q INVIERNO. (Caudal piloto = 1,44 m ³ /h)	4	PIL-TAG-401	Dosificación de floculante
	PIL-TAG-102	Reproducción de ETAP TAGUS a caudal bajo, 36.000 m ³ /día -Q VERANO. (Caudal piloto = 3,2 m ³ /h)		PIL-TAG-402	Dosificación de dióxido de cloro
	PIL-TAG-103	Reproducción de ETAP TAGUS a caudal bajo, 52.000 m ³ /día -Q MÁXIMO. (Caudal piloto = 4,4 m ³ /h)		PIL-TAG-403	Dosificación de cloraminas
2	PIL-TAG-201	Dosificaciones crecientes de ozono en cabecera		PIL-TAG-404	Combinación de preoxidantes
	PIL-TAG-202	Dosificación de CAP para la eliminación de TOC		PIL-TAG-405	Remineralización
	PIL-TAG-203	Dosificación de CAP para la eliminación de THM formados en preoxidación		PIL-TAG-406	Dosificación de Peróxido de Hidrogeno
	PIL-TAG-204	Dosificación creciente de PAX para comprobar la eliminación de TOC en la decantación		PIL-TAG-407	Reacción de Peroxono
	PIL-TAG-205	Influencia de los tiempos de retención del decantador para la eliminación del TOC		PIL-TAG-408	Dosificación de dióxido de cloro o como desinfectante
	PIL-TAG-206	Influencia de la velocidad de filtración para la eliminación de la turbidez		PIL-TAG-409	Dosificación de hipoclorito sódico como desinfectante
	PIL-TAG-207	Ensuciamiento prematuro de los filtros con dosificaciones altas de PAX		PIL-TAG-410	Uso de otros coagulantes en laboratorio para comprobar la reducción de TOC
PIL-TAG-208	Fugas de aluminio con dosificaciones de PAX altas	5	PIL-TAG-501	Influencia de las cámaras de mezcla en la decantación	
PIL-TAG-209	Eliminación de THM a la salida del decantador		PIL-TAG-502	Comparación filtración arena - vidrio	
3	PIL-TAG-301		Reducción de TOC utilizando distintos tipos de CAP	PIL-TAG-503	Adsorción con CAG
	PIL-TAG-302		Variación del tiempo de contacto del PAX para la mejora de la NTU y de la eliminación de TOC	PIL-TAG-504	Microfiltración
	PIL-TAG-303		Recirculación fangos en cabecera	PIL-TAG-505	Membranas
	PIL-TAG-304		Postozonización para la eliminación de 2 MIB y Geosmina	PIL-TAG-506	Adsorción con CAG para la eliminación de 2-MIB
	PIL-TAG-305		Postozonización a dosis crecientes para la eliminación de TOC y actuación del ozono como desinfectante	PIL-TAG-507	Usar un coagulante férrico para la mejora del factor "SDI" en entrada a membranas
				PIL-TAG-508	Posible formación de THM después de filtros CAG al añadir una dosis de Hipoclorito
				PIL-TAG-509	Comparación filtración arena - filtralite

El ensayo PIL-TAG-505 Membranas, se estableció inicialmente para pilotar varios tipos de membranas. Distintos fabricantes consultados, ante los bajos pesos moleculares de la materia orgánica presente en el agua de Toledo, señalaron a las membranas de ósmosis inversa como las únicas capaces de posibilitar una retención significativa de COT. En función de los resultados obtenidos en el ensayo con membranas de ósmosis inversa, se estudiará el pilotaje de membranas de nanofiltración.

La metodología para llevar a cabo cada uno de los ensayos es siempre la misma:

1. Definición del propio ensayo, teniendo en cuenta la problemática de la ETAP actual.
2. Actuaciones previas en laboratorio, como por ejemplo la realización de *jartests* o similares.
3. Ajuste hidráulico de cada una de las fases en la planta piloto para adecuarlas a las condiciones establecidas en el ensayo.
4. Mediciones de los diferentes parámetros establecidos en el ensayo.
5. Redacción de informe de resultados y conclusiones del ensayo

4 RESULTADOS

Los principales resultados obtenidos en el ensayo PIL-TAG-505, Filtración con membranas de ósmosis inversa, han sido los siguientes:

4.1 Alta reducción de COT

Las membranas han ofrecido un rendimiento constante en cuanto a la reducción de COT se refiere, independientemente de las variaciones de temperatura y de los cambios en la concentración del contaminante en el agua. La eliminación media de COT ha sido del 95%.

Las etapas de pre tratamiento permiten que el COT de entrada a las membranas oscile entre valores de 4 mg/l y 8 mg/l. La elevada reducción de COT garantiza que a la salida de la ósmosis inversa éste se mantenga siempre por debajo de 1 mg/l, muy por debajo del valor de 6 mg/l establecido en el RD 140/2003.

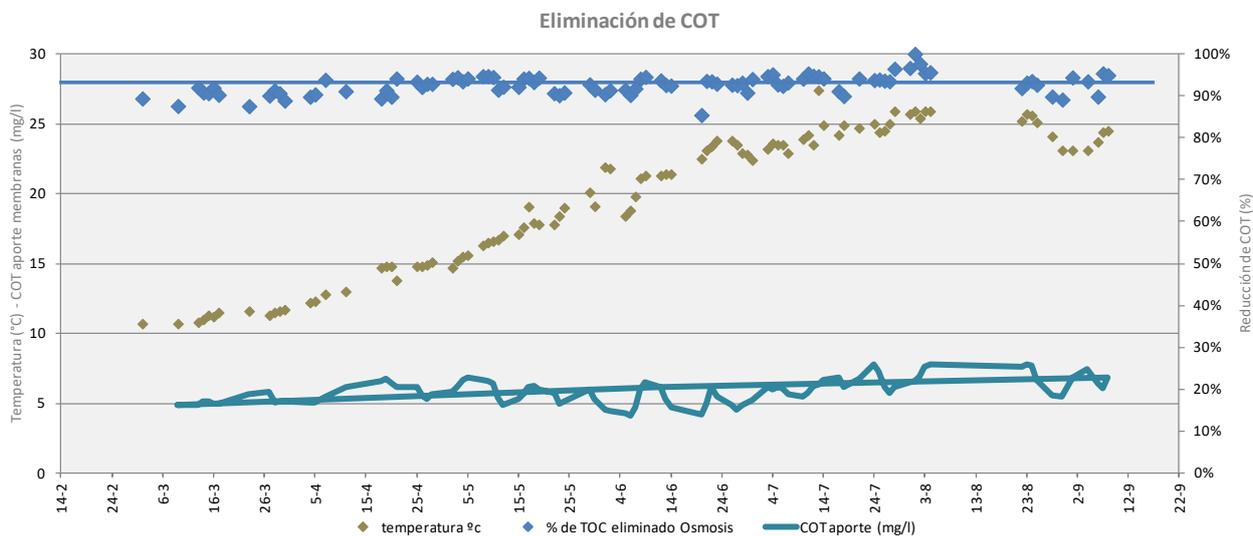


Figura 4 Detalles de la etapa de ósmosis

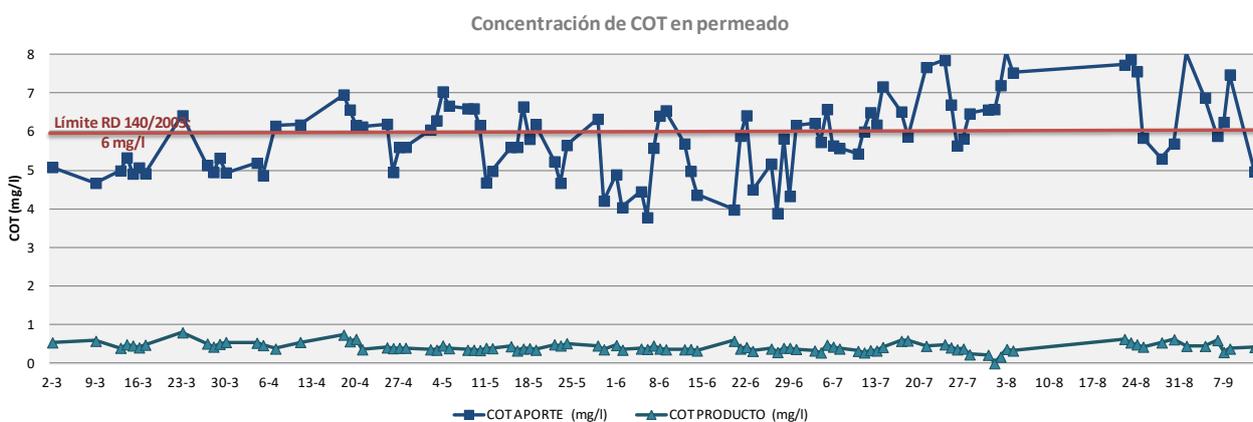


Figura 5 Detalles de la etapa de ósmosis

4.2 COT depositado sobre la superficie de la membrana

Uno de los parámetros más importantes a determinar en el ensayo PIL-TAG-505, filtración con membranas de ósmosis inversa, es la cantidad de materia orgánica que es eliminada en el rechazo en comparación con la depositada sobre la superficie de la membrana. A partir de los volúmenes totalizados y de los valores diarios de concentración de COT, se ha realizado un balance de masas para calcular la materia orgánica que provoca el ensuciamiento de la membrana.

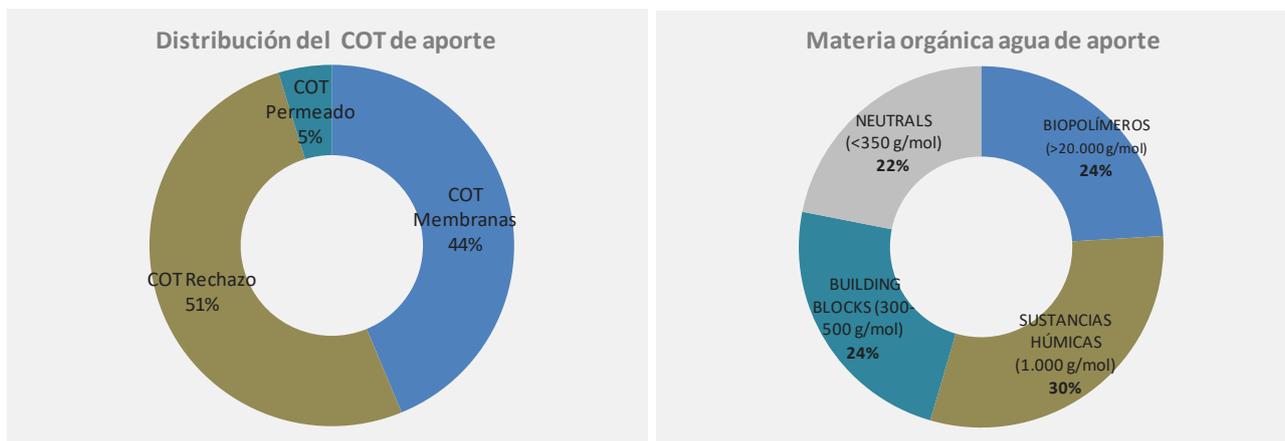


Figura 6 Distribución del COT

Las características específicas de las membranas ensayadas han posibilitado que el 44% del COT del agua de aporte se acumule en las membranas mientras que el 51% restante se concentre en el rechazo. Esta relación se ha mantenido de forma prácticamente constante desde el comienzo del ensayo. Se ha calculado que el COT total depositado sobre la superficie de las cuatro membranas ha sido 5.133 g.

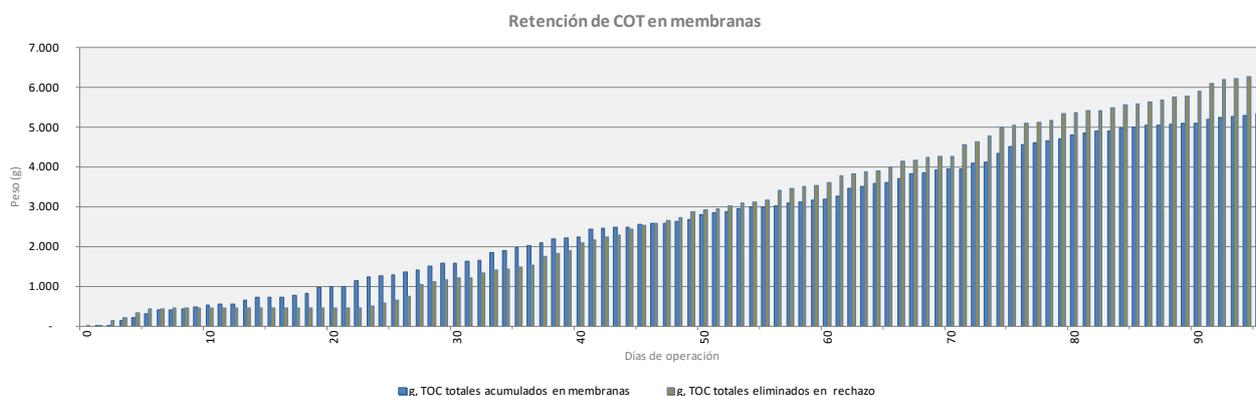


Figura 7 Retención acumulada el COT en las membranas

Al finalizar el ensayo y para verificar este valor, se han pesado de forma individual cada una de las membranas de la planta. Teniendo en cuenta que el peso inicial de las membranas nuevas fue de 2.850 g, se han obtenido los siguientes incrementos.



Figura 8 Pesaje de las membranas

La membrana situada en la posición nº1 es la que más ha aumentado su peso. Este resultado era esperado atendiendo a los tipos de ensuciamiento que se producen en mayor medida en la posición primera de un tubo de presión: particular y coloidal, y ensuciamiento orgánico.

El incremento de peso total debido al ensuciamiento medido a través del pesaje de las membranas es de 8.600 g, en comparación a los 5.133 g calculados a través del balance de masas.

A través de ensayos mediante cromatografía líquida de detección de carbón orgánico, se han diferenciado las distintas sustancias que componen el COT del agua de aporte a las membranas, en función de sus pesos moleculares. Se muestran en la figura 6.

4.3 Evolución del diferencial de presión

Debido a que el mecanismo de ensuciamiento en este ensayo es mayoritariamente por retención de partículas de mayor tamaño que el poro de la membrana, éste crea una capa o torta (cake) que a su vez actúa de filtro para las partículas que llegan posteriormente. Al operar la planta con modo de funcionamiento de *flujo constante*, la pérdida de permeabilidad ocasionada por este ensuciamiento tiene como consecuencia un aumento de la presión diferencial de las membranas.

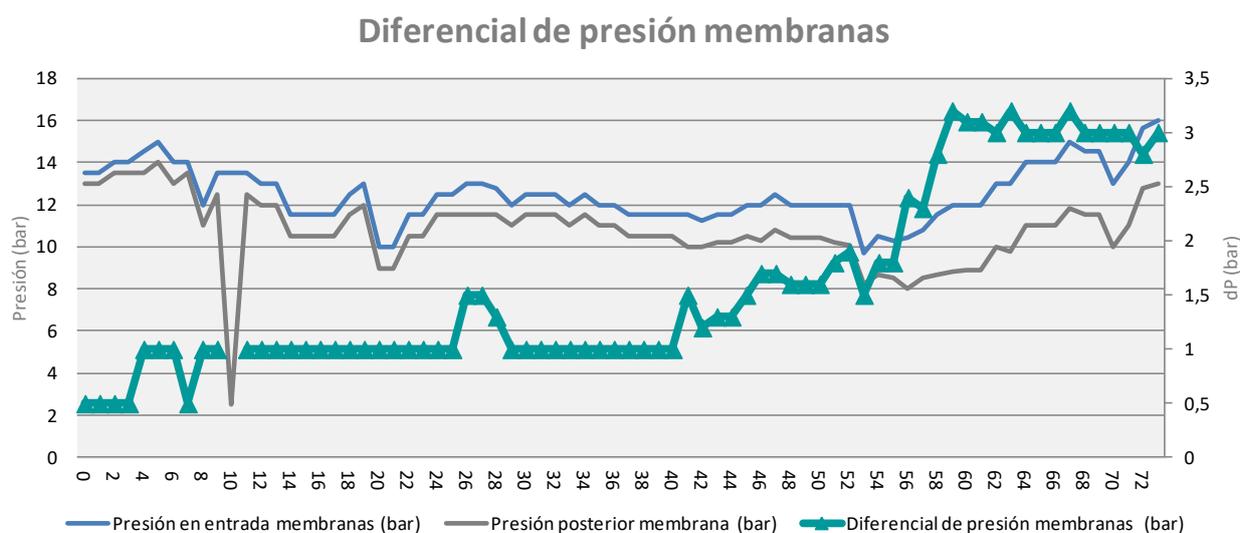


Figura 9 Evolución del diferencial de presión.

Para diferenciar entre los fenómenos normales de presión de alimentación, cambios de en la composición del agua de aporte, oscilaciones de temperatura, etc. y cambios debidos al ensuciamiento, se ha realizado una normalización del caudal de permeado. A través de ésta se observa que el ensuciamiento orgánico provoca una clara disminución del caudal a partir de los 110 días de operación.

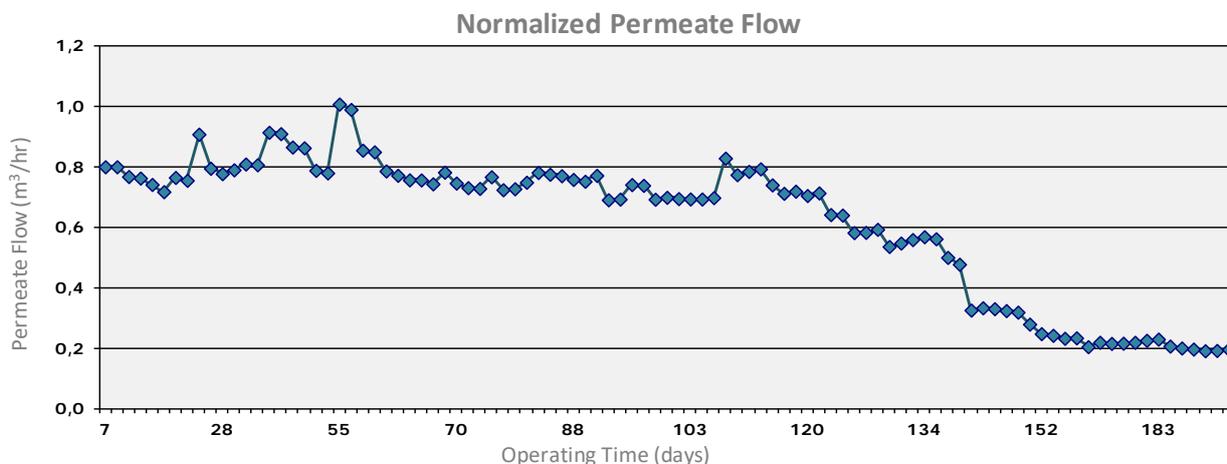


Figura 10 Caudal de permeado normalizado

Teniendo en cuenta la cantidad de COT depositada en la superficie de las membranas en el día 110 de operación, así como la superficie activa de la misma, se establece que a partir de 123 g COT/m², es necesario realizar una limpieza química de las membranas.

Durante la primera fase del ensayo no ha sido posible llevar a cabo ninguna limpieza de las membranas para cuantificar la resistencia química reversible. Actualmente ya se ha instalado un circuito de limpieza con el que limpiarlas cuando se alcance la desviación establecida en cada uno de los parámetros de operación.

5 CONCLUSIONES

Tal y como se muestra en los resultados anteriores, la filtración mediante membranas de ósmosis inversa es un método efectivo para reducir los elevados niveles de COT que posee el agua de los embalses de Toledo.

La baja concentración de COT obtenida en el permeado (<1 mg/l), posibilita obtener un agua de calidad tratando únicamente con las membranas aproximadamente un 25% del caudal de la planta, lo que favorece en gran medida la viabilidad técnica y económica de su implantación.

La cantidad de materia orgánica que se deposita sobre la superficie de las membranas sin ser eliminada en la corriente de rechazo, es muy elevada. El mayor peso de la membrana situada en la posición nº 1, confirma que el ensuciamiento mayoritario producido es de tipo orgánico y coloidal.

Es necesario realizar una limpieza química de las membranas para determinar la parte reversible del ensuciamiento producido, y así establecer las consignas de limpieza que optimicen la explotación de esta etapa. Esta determinación se está realizando actualmente dentro de la segunda fase de ensayos.