



## El proyecto Brainymem, una estrategia de control para minimizar el impacto ambiental de las depuradoras.

Ana María Álvarez, Teresa de la Torre, Carlos Rodríguez, Jorge Malfeito

ACCIONA Agua

### Resumen

En el tratamiento de aguas residuales se producen emisiones directas a la atmósfera de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O, generados ambos durante los procesos biológicos de eliminación de materia orgánica y nitrógeno (Hofman et al., 2011). Así, las emisiones de N<sub>2</sub>O de las plantas de tratamiento de aguas residuales aportan el 26% de la huella de carbono de todo el ciclo del agua (Kampschreur et al., 2009). Aparte del impacto sobre la atmósfera, las EDAR también conllevan un impacto sobre las aguas receptoras. Existen sustancias recalcitrantes conocidas como contaminantes emergentes que incluyen desde fármacos a productos de higiene personal y nanomateriales, que no son eliminados eficazmente con los procesos de tratamiento convencionales.

El proyecto LIFE-BRAINYMEM (Advanced-control MBR for wastewater reclamation, [www.life-brainymem.com](http://www.life-brainymem.com)), apoyado y financiado por la Comisión Europea como parte del Programa LIFE+, pretende mediante un sistema de control avanzado reducir las emisiones de gases efecto invernadero y la concentración de contaminantes recalcitrantes en el agua residual. Para conseguirlo se han planteado los siguientes objetivos técnicos: reducir el consumo energético asociado a la aireación de la planta (membrana y biológico) mediante un sistema de control experto basado en datos de planta medidos online con sensores novedosos y evaluar la eliminación de contaminantes emergentes mediante la dosificación de aditivos.

La planta de demostración es un biorreactor de membrana de 60 m<sup>3</sup> que trata agua residual urbana real con un módulo de membrana de fibra hueca. El efluente está libre de sólidos y patógenos, con lo que su calidad es óptima para su reutilización. Por el momento, el control ha conseguido reducir en un 20% el consumo energético en un proceso MBR en comparación con la planta trabajando sin control. Además, la eliminación de nutrientes en la planta está siendo satisfactoria y no se ha visto afectada negativamente por la implementación del control experto. En la última etapa del proyecto se prevé mejorar la eliminación de contaminantes emergentes hasta en un 50% mediante la dosificación controlada de ciertos aditivos que mejoran la eficacia del tratamiento.

Palabras clave: Depuración, biorreactores de membrana, reutilización, control.



## Introducción

### Emisión de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales

Debido a la creciente preocupación por el cambio climático en las últimas décadas, cada vez existe una mayor conciencia con respecto a la emisión de gases de efecto invernadero (GHGs). Las actividades antropogénicas como la agricultura, la industria, el vertido de residuos, deforestación y especialmente el consumo de combustibles fósiles han producido un incremento paulatino de los GHGs. Los principales GHGs son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). A pesar de que el más conocido es el  $\text{CO}_2$ , asociado generalmente al consumo de energía eléctrica (emisiones indirectas), los tres gases se producen durante el tratamiento de aguas residuales (Kampschreur et al., 2009). En el caso de concreto de las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$ , éstas suponen un problema considerable puesto que las aguas residuales ocupan el sexto lugar en la contribución de emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  mundiales, llegando a emitir un 3% del  $\text{N}_2\text{O}$  total emitido (Kampschreur et al., 2009). Así, las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  de las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden aportar hasta un 26% de la huella de carbono de todo el ciclo del agua.

Los datos de emisión en plantas a escala real se encuentran en un rango entre 0 y 14,6% de la carga de nitrógeno total (Kampschreur et al., 2009), estimando una concentración de nitrógeno media de 60 mgN/L, las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  pueden llegar a 0,014 kg $\text{N}_2\text{O}$  por  $\text{m}^3$  o el equivalente a 4,130 kg $\text{CO}_2/\text{m}^3$  de agua tratada.

La eliminación de nutrientes en plantas de tratamiento de aguas residuales se lleva a cabo mediante un proceso biológico de nitrificación – denitrificación. En dicho proceso intervienen bacterias heterótrofas y autótrofas que convierten el amonio de entrada ( $\text{NH}_4$ ) en nitrógeno gas ( $\text{N}_2$ ) bajo condiciones de anoxia y aerobias (Kampschreur et al., 2009). El  $\text{N}_2\text{O}$  puede ser producido en ambos procesos, aunque suele estar asociado con la denitrificación principalmente. Es decir, la producción de  $\text{N}_2\text{O}$  se suele asociar a perturbaciones en el proceso de eliminación de amonio. Para minimizar las emisiones de GHGs, es clave por tanto controlar el proceso biológico para que esta producción de  $\text{N}_2\text{O}$  sea la mínima posible. El control desarrollado dentro del proyecto BRAINYMEM ajusta el aire suministrado al proceso biológico para tener controlado en todo momento el proceso de nitrificación y evitar así la emisión descontrolada de gases de efecto invernadero.

### Biorreactores de membranas

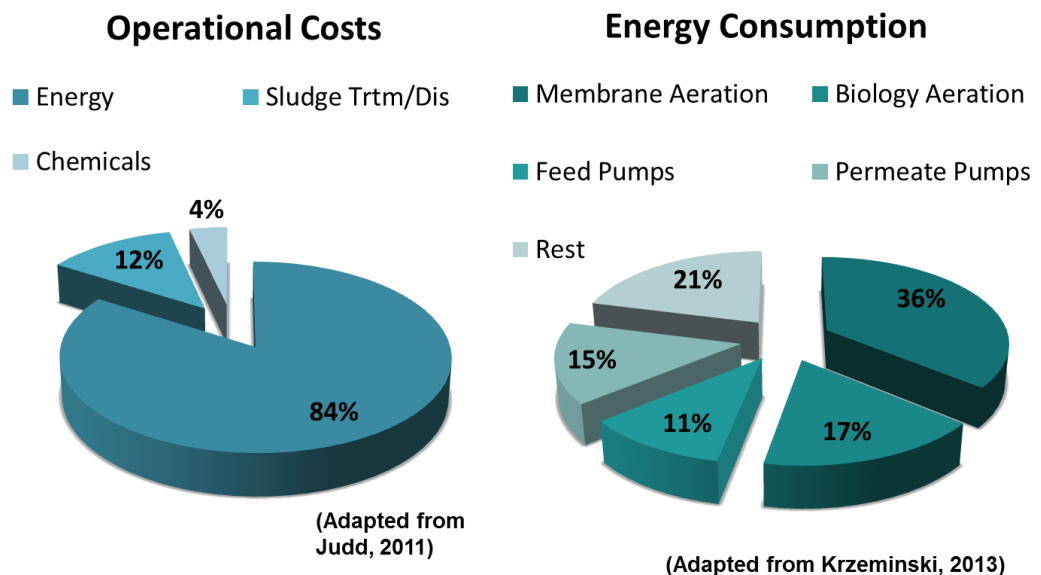
Los biorreactores de membranas (MBR) juegan un papel relevante en el marco de la depuración española debido principalmente a las ventajas que presenta. Un MBR es una



modificación del proceso de fangos activos para el tratamiento de las aguas residuales, donde la separación del fango del agua tratada se realiza por filtración a través de un sistema de membranas, en sustitución de la decantación secundaria. El proceso precisa para su desarrollo un sistema de aireación necesario para la actividad depuradora de las bacterias, para garantizar el buen funcionamiento del sistema y controlar el ensuciamiento ya que evita la acumulación de las sustancias en la superficie de la membrana. La sustitución de la decantación secundaria por las membranas implica menor superficie de implantación. Además, se obtiene una buena calidad de efluente permitiendo cumplir con la legislación de vertido y reutilizar el agua en zonas de escasez hídricas.

Sin embargo, uno de los principales desafíos de los sistemas MBR para depuración de aguas residuales es su elevado coste operacional en comparación con la tecnología convencional de fangos activos (Ferrero et al., 2012). Su coste, aunque cada vez más competitivo, depende tanto de la reducción de los consumos energéticos como del precio de las membranas.

La Figura 1 muestra un desglose de los costes operacionales del proceso MBR; en éste se identifica el consumo energético como principal coste. El principal consumo energético de las EDAR es el asociado a la aireación de los reactores biológicos así como al bombeo y agitación de los lodos activos. En el caso de los bioreactores de membrana se añaden a estos consumos la aireación de la membrana, necesaria para controlar su ensuciamiento. En este sentido, es interesante la optimización del proceso respecto al consumo energético y al control del ensuciamiento.



**Fig. 1.** Desglose de costes en sistemas MBR así como composición del consumo energético en los mismos.

## Presencia de contaminantes emergentes en aguas receptoras



Aparte del impacto sobre la atmósfera, las EDAR también pueden conllevar un impacto sobre las aguas receptoras. Las plantas de tratamiento de aguas residuales están diseñadas generalmente para eliminar materia orgánica, sólidos en suspensión, nitrógeno y fósforo y minimizar así este impacto. Sin embargo, existen sustancias recalcitrantes que no son eliminadas eficazmente con los procesos de tratamiento convencionales.

Estas sustancias, llamadas contaminantes emergentes, incluyen fármacos, herbicidas, disruptores endocrinos, surfactantes, productos de higiene personal y nanomateriales, pudiendo llegar a las aguas receptoras en cantidades relevantes (Matamoros et al., 2013). La naturaleza de estos contaminantes emergentes depende en gran medida de las actividades humanas y por tanto, su aparición no se restringe a ningún área geográfica.

Con el proyecto BRAINYMEM se pretende evaluar la eliminación de los contaminantes emergentes presentes en el agua mediante la dosificación controlada de ciertos aditivos que mejoran la eficacia del tratamiento.

## El proyecto

El proyecto LIFE-BRAINYMEM, apoyado y financiado por la Comisión Europea se encuentra dentro del Programa europeo LIFE+, que es el único instrumento financiero de la Unión Europea dedicado de forma exclusiva al medio ambiente. El objetivo del proyecto es reducir el impacto ambiental de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). Para ello, se ha desarrollado un sistema de control avanzado que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y la concentración de contaminantes recalcitrantes en el agua residual. En cuanto a la mejora de la eliminación de los llamados contaminantes emergentes, se espera una reducción de hasta un 50%. Esta eliminación mejorada se cuantificará no sólo en términos de concentración de contaminantes emergentes sino también en términos de toxicidad y actividad endocrina del efluente, que será medida antes y después del proyecto. Así, el proyecto BRAINYMEM es un proyecto de mejora ambiental de procesos de tratamiento de aguas residuales que ayudará a cumplir las estrategias europeas contra el cambio climático y la Directiva Marco del Agua para la protección de la calidad de las aguas.

El sistema de control avanzado desarrollado permite:

- Regular la aireación de membrana en base a modelado y a datos de planta medidos online.
- Regular la aireación del reactor biológico en función de un algoritmo basado en la combinación de valores proporcionados por sensores novedosos que miden parámetros online en planta.
- Dosificar “flux-enhancers” (mejoradores de flujo) durante eventos de baja permeabilidad. Estos flux-enhancers son sustancias que se adicionan al fango para mejorar su filtrabilidad.

El proyecto se está llevando a cabo en una planta de demostración que se ubica en la EDAR de Almuñécar y sus resultados son extrapolables a cualquier otra EDAR,



favoreciendo así la transferencia de resultados y la replicabilidad del proyecto. La planta de demostración es un biorreactor de membrana de 60 m<sup>3</sup> que trata 5m<sup>3</sup>/h de agua residual urbana con un módulo de membrana de fibra hueca. Al pasar a través de la membrana, el efluente está libre de sólidos y patógenos, con lo que su calidad es óptima para su reutilización.



**Fig. 2.** Vista de la planta de demostración.

## Resultados

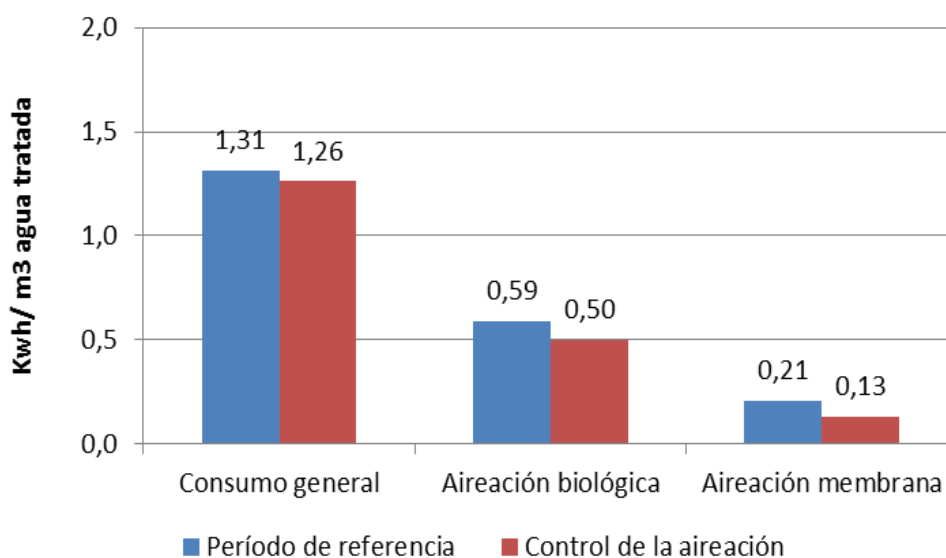
La demostración del sistema de control BRAINYMEM ha sido dividida en tres partes: control de la aireación biológica, aireación de la membrana y control de la dosificación de mejoradores de flujo. Para la implementación del nuevo control, se instalaron novedosos sensores que permiten monitorizar las especies nitrogenadas in situ y se pretende reducir la emisión de GHG a la atmósfera. El periodo anterior a la implementación del sistema de control sirvió como fase de referencia para la evaluación del éxito del proyecto. La planta piloto ha estado trabajando en *open-loop* hasta la implementación del nuevo control lo que ha permitido obtener datos de referencia suficientes para la evaluación del impacto del proyecto.





### Consumo energético

Se presentan los datos correspondientes al consumo energético durante el periodo de referencia y con el sistema de control en activo (Fig. 3). En el periodo de referencia el consumo asociado a la aireación biológica representaba aproximadamente el 50% del total, el resto se correspondía a la aireación de la membrana y a las bombas de recirculación, permeado y alimentación. El consumo energético de la aireación biológico se encontraba en torno al 0,59 kwh/m<sup>3</sup> de permeado, mientras que con el control BRAINYMEM, el consumo se ha reducido a una media de 0,50 kwh/m<sup>3</sup> de agua tratada. Se ha conseguido por tanto reducir el consumo energético asociado al proceso biológico hasta en un 14%. Con el control de la aireación de la membrana se han obtenido resultados muy satisfactorios, obteniéndose una reducción con respecto a la fase de referencia de hasta un 25%.

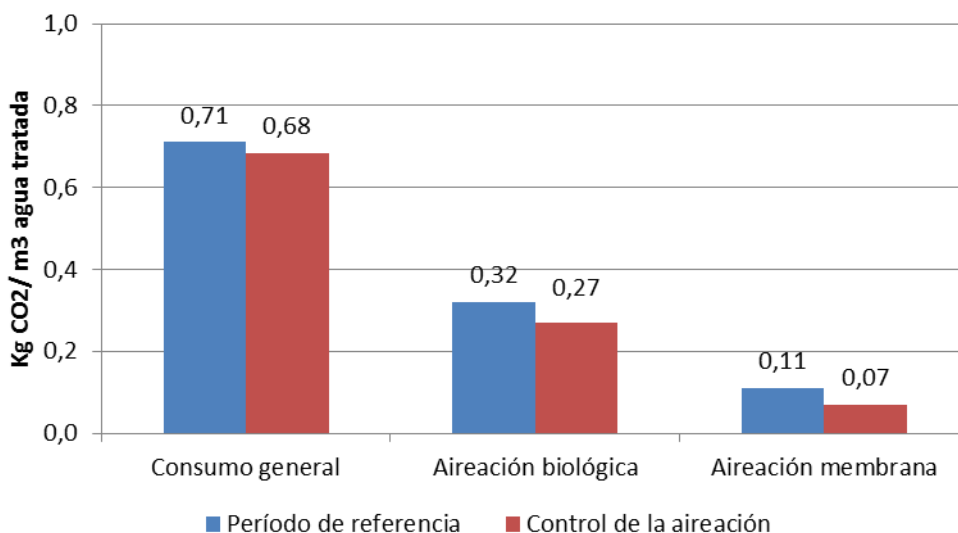


**Fig. 3.** Kwh/m<sup>3</sup> de agua tratada producida en el periodo de referencia y tras la implementación del control.

Los resultados obtenidos hasta la fecha han sido prometedores en términos de reducción de la aireación (del proceso de biológico y de la membrana). Como el CO<sub>2</sub> es considerado como emisión indirecta debido al uso de la electricidad y la aireación tiene un consumo energético asociado alto, disminuyendo la aireación cuando sea posible, se obtendrán un mayor ahorro energético. La figura 4 muestra una comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de agua tratada que corresponde a los distintos procesos: consumo general de la planta piloto, la aireación biológica y la aireación de la membrana. Estos resultados se muestran junto las emisiones correspondientes al período anterior a la implementación del control avanzado. El proceso ha demostrado su capacidad para producir un efluente de calidad con menor consumo de energía. Además, el control de la



membrana no ha tenido un efecto negativo sobre el desempeño de la filtración, verificando así la efectividad del control.



**Fig. 4.** KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de agua tratada producida en el periodo de referencia y tras la implementación del control.

## Eliminación de nutrientes

La modificación de las condiciones de aireación puede tener un efecto negativo sobre la eliminación de nutrientes. Para evaluar la influencia del control sobre la eliminación de nutrientes, se ha estudiado la evolución de distintos parámetros (nitrógeno total, fósforo total, demanda biológica de oxígeno (DQO) y amonio) comparándolo con el periodo previo a la implementación del nuevo control. En la tabla 1 se presentan los resultados de la caracterización del influente y efluente antes y durante el control de la aireación. Los resultados mostraron que el control permite modificar el ratio de aireación manteniendo los valores de los parámetros del efluente por debajo del límite de vertido. Además, se ha podido observar una alta calidad del permeado durante todo el periodo experimental.



**Tabla 1.** Caracterización del influente y efluente de la planta piloto.

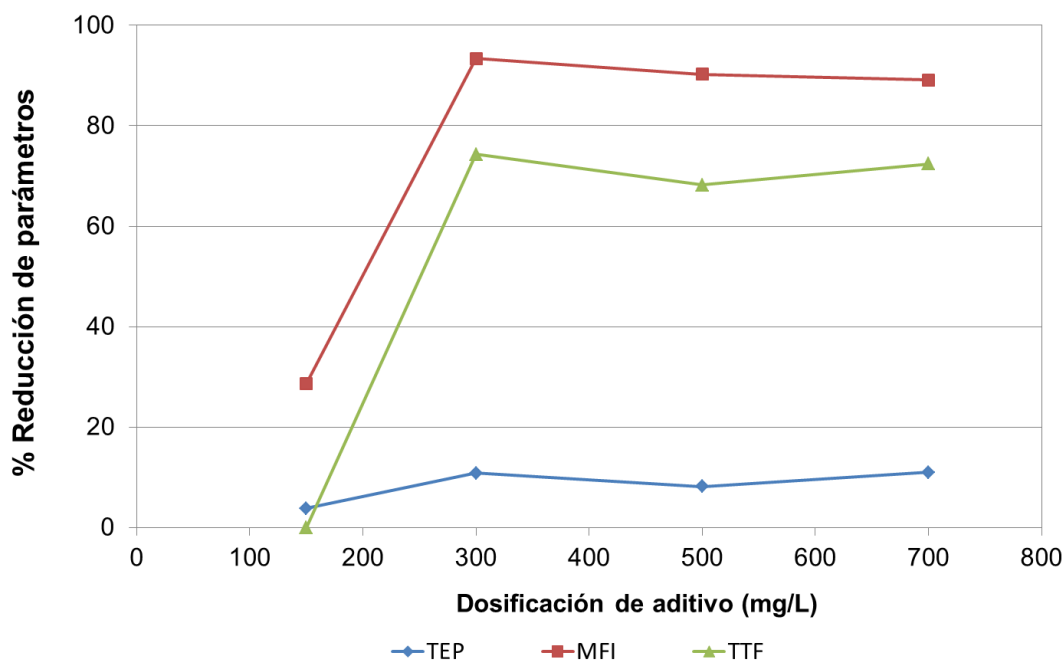
			Aireación constante	Control de la aireación
	Parámetro	Unidad	Promedio	Promedio
Influente	SS	mg/L	1496	811
	DQO	mg O <sub>2</sub> /L	147	112
	NH <sub>4</sub> -N	mg/L	31	29
	Nitrógeno total	mg/L	37	34
	Fósforo total	mg/L	10	13
Efluente	SS	mg/L	0	0
	DQO	mg O <sub>2</sub> /L	15	20
	NH <sub>4</sub> -N	mg/L	0,2	0,8
	Nitrógeno total	mg/L	7	7
	Fósforo total	mg/L	4	5

## Dosificación de aditivos

Por último, con el objetivo de establecer los parámetros de control de la dosificación de mejoradores de flujo, se llevó a cabo una serie de *jar tests* para determinar la concentración óptima. Tras una revisión de la literatura se seleccionaron dos aditivos: MPE50 de Nalco Chemical Company y Magnafloc LT35 comercializado de BASF Chemical Company. Para evaluar su efectividad, se determinaron los siguientes parámetros: *modified fouling index* (MFI), *time to filter* (TTF) y la concentración de sustancias transparentes exopoliméricas (TEP). El ensayo MFI suele ser usado para una primera selección ya que se relaciona con la filtrabilidad del fango, mientras que los TEP son sustancias involucradas en el ensuciamiento de la membrana, por lo que una reducción de ambos parámetros podría conducir a una mejora en el rendimiento de la filtración.

A continuación, se han representado los efectos de la adición de ambos mejoradores de flujo en los distintos parámetros estudiados (Figura 5 y Figura 6). Los resultados han sido expresados en términos de % de reducción en comparación con su respectiva muestra de referencia. Cabe destacar que ninguna de las concentraciones estudiadas tuvo un efecto significativo sobre la medida de pH y conductividad de licor mezcla.



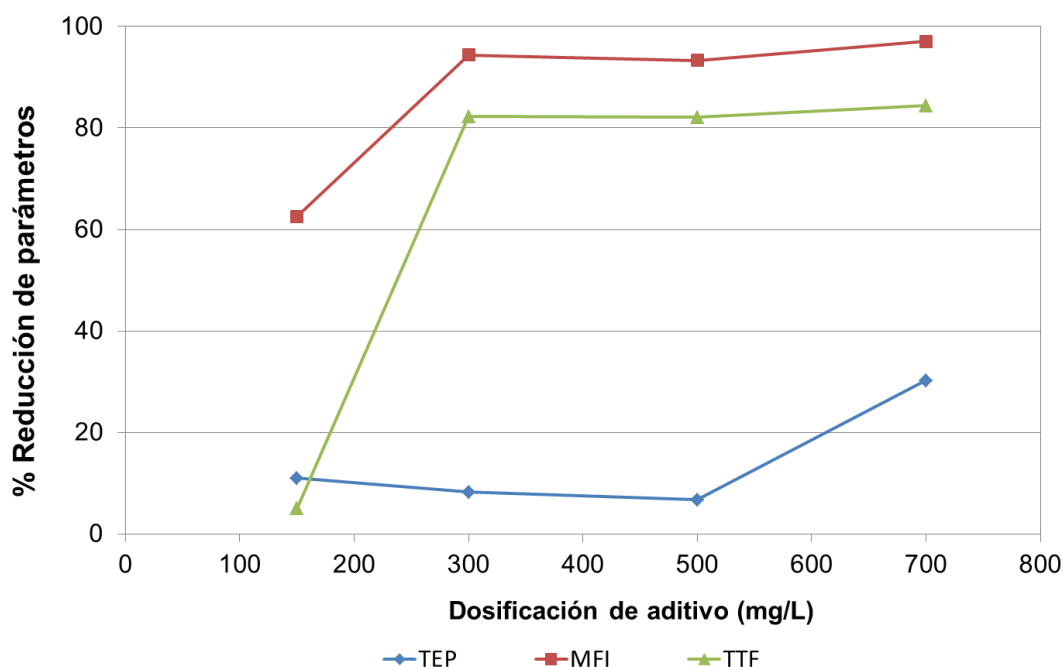


**Fig. 5.** Efectos de las diferentes concentraciones de MPE50 en la reducción del MFI, TTF y concentración de TEP.

Con el uso del MPE50, la concentración de los TEP se redujo ligeramente para todas las concentraciones estudiadas de. El valor de TTF y MFI fue similar para todas concentraciones superiores a 300 mg L<sup>-1</sup>, obteniéndose mejoras por encima del 89% para el MFI y de en torno al 70% para el TTF.

La figura 6 muestra los efectos de las diferentes concentraciones de Magnafloc LT35 en la reducción del MFI, TTF y concentración de TEP. En base a la eliminación de TEP, la dosificación óptima para el Magnafloc LT35 sería la más alta estudiada, 700 mg L<sup>-1</sup>, alcanzándose un 30% de eliminación. La reducción del MFI fue similar para todas las concentraciones estudiadas, sin embargo, a diferencia del producto de Nalco, con la adición del Magnafloc LT35 se ha obtenido una reducción en el MFI por encima del 93%.

Comparando ambos productos, los aditivos estudiados en el laboratorio muestran buenos resultados en la reducción de los parámetros estudiados. Dado que los valores obtenidos fueron próximos entre sí, cabría emplearse una concentración menor que proporcione buenos resultados para abaratar costes. Por tanto, la concentración óptima sería de 300 mg L<sup>-1</sup>.



**Fig 6.** Efectos de las diferentes concentraciones de Magnafloc LT35 en la reducción del MFI, TTF y concentración de TEP.

El efecto sobre los parámetros estudiados podría encontrarse en el mecanismo de acción de estos aditivos. El polímero catiónico incrementa el tamaño de las partículas permitiendo que los agentes contaminantes queden atrapados en los flóculos durante el proceso de floculación, incrementando su tamaño que reduciría el bloqueo de los poros de la membrana mejorando así la filtrabilidad (Iversen, 2010).

Aunque el *Jar Test* es un buen método como primer análisis, estos ensayos tuvieron una duración determinada y no reflejarían las variaciones en las características del licor mezcla debido a la entrada continua de agua por lo que en la actualidad se están llevando a cabo ensayos en la planta piloto para confirmar los resultados obtenidos en el laboratorio.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos a lo largo de estos dos años de experimentación indican que la operación de la planta es altamente satisfactoria en términos de reducción de consumo energético y calidad de permeado. El control ha estado en operación sin fallos significativos durante 12 meses, demostrando la estabilidad del sistema. El control de la



aireación de la membrana ha conseguido una disminución del consumo energético de un 25% en comparación con la fase de referencia sin comprometer la eliminación de nutrientes, manteniendo las características del fango y controlando el ensuciamiento de la membrana. El ahorro global con el sistema de control de la aireación (biológico y de membrana) fue de un 20%. De esta forma, el ahorro energético en el proceso hace esta tecnología una opción más competitiva.

Los ensayos jar test con fango activado de la planta piloto con ambos polímeros catiónicos (MPE50 y Magnafloc LT35), mostraron resultados positivos en todos los parámetros estudiados. La concentración óptima en términos de reducción del ensuciamiento (basado en el MFI, el TTF y la eliminación de TEP) para ambos polímeros fue de 300 mg L<sup>-1</sup>. Queda pendiente la aplicación de estos aditivos a escala de planta piloto para confirmar los resultados de los jar test.

## **Agradecimientos**

El proyecto BRAINYMEM ha sido financiado con ayuda del programa LIFE+ (LIFE13/ENV/ES/000160). Los autores quieren agradecer también la colaboración de Aguas y Servicios de la Costa Tropical.



## Referencias

Kampschreur, M. J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M. S. M., Van Loosdrecht, M. C.M. (2009) Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, 43, 4093-4103.

Judd, S. (2011). *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Elsevier.

Krzeminski, P., van der Graaf, J. H. J. M., & van Lier, J. B. (2013). Specific energy consumption of membrane bioreactor (MBR) for sewage treatment. *Water Science & Technology*, 65(2), 380.

Ferrero, G., Rodriguez Roda, I., Comas, J. (2012) Automatic control systems for submerged membrane bioreactors: A state-of-the-art review. *Water Research*, 46, 3421 – 3433.

Matamoros, V., Salvadó, V. (2013) Evaluation of a coagulation/flocculation-lamellar clarifier and filtration-UV-chlorination reactor for removing emerging contaminants at full-scale wastewater treatment plants in Spain. *Journal of Environmental Management*, 117, 96 – 102.

Iversen, V., (2010) Comprehensive assessment of flux enhancers in membrane bioreactors for wastewater treatment. Tesis doctoral, Universidad técnica de Berlín, Berlín, Alemania.