



# Eliminación sostenible de microcontaminantes de efluentes de EDAR municipales con MBBR. Resultados de estudios de laboratorio y piloto

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) convencionales basadas en sistemas de lodos activados (CAS) no pueden eliminar muchos de los microcontaminantes orgánicos, incluida la mayoría de productos farmacéuticos. Los reactores biológicos de lecho móvil (MBBR) han demostrado una mayor eficiencia en la eliminación de varios productos farmacéuticos en comparación con los CAS. En este estudio, se presenta una solución biológica basada en la tecnología MBBR (eXeno de Veolia Water Technologies) como tratamiento terciario para la eliminación de productos farmacéuticos y otros contaminantes. Para asegurar un crecimiento suficiente de biomasa, se alimenta un reactor MBBR de dos etapas de manera alterna con una pequeña fracción de agua residual de alta carga (en carbono y nitrógeno). Las constantes de velocidad de degradación para la eliminación de productos farmacéuticos fueron significativamente más altas en comparación con otros estudios realizados con lodos activados y otros procesos tradicionales de biomasa en suspensión en estudios de laboratorio y piloto.

## Palabras clave

MBBR, productos farmacéuticos, nitrificación terciaria, reciclaje de agua.

## ELIMINATION OF ORGANIC MICROPOLLUTANTS BY MBBR TECHNOLOGY IN AN URBAN WWTP. LABORATORY AND PILOT STUDIES

*Wastewater treatment plants based on conventional activated sludge systems (CAS) cannot eliminate many of the organic micropollutants, including most pharmaceutical products. Moving bed biological reactors (MBBR) have demonstrated greater efficiency in the elimination of various pharmaceutical products compared to CAS. In this study, a biological solution based on MBBR technology (eXeno from Veolia Water Technologies) is presented as a tertiary treatment for the elimination of pharmaceutical products and other pollutants. To ensure sufficient biomass growth, a two-stage MBBR reactor is fed alternately with a small fraction of high load wastewater (carbon and nitrogen). The degradation rate constants for the elimination of pharmaceutical products were significantly higher compared to other studies conducted with activated sludge and other traditional processes of suspended biomass in laboratory and pilot studies.*

## Keywords

MBBR, pharmaceutical products, tertiary nitrification, water recycling.

### Elena Torresi

Veolia Water Technologies Suecia

### Magnus Christensson

Veolia Water Technologies Suecia

### Brandy Nussbaum

Veolia Water Technologies Suecia

### Kai Tang

Universidad Técnica de Dinamarca

### Henrik R. Andersen

Universidad Técnica de Dinamarca

### Christina Sund

Krüger A/S

### Karen Shaw

Veolia Water Technologies  
Australia



## 1. INTRODUCCIÓN

Al adentrarse en una época de escasez de agua, el reciclaje y la reutilización del agua pueden proporcionar enormes beneficios al medio ambiente y a la sociedad, pues se reduce la captación de agua dulce y se utiliza agua recuperada para el riego de jardines, para recargar acuíferos subterráneos o como agua potable (Postel, 2000). Sin embargo, algunos contaminantes cada vez más preocupantes, como los microcontaminantes, pueden comprometer la fiabilidad del agua recuperada, al contaminar los compartimientos acuáticos vitales, como el agua de superficie, el agua subterránea y, finalmente, el agua potable (Barbosa *et al.*, 2016).

En los últimos años, se vienen detectando con frecuencia microcontaminantes, como los productos farmacéuticos, en entornos acuáticos (Reemtsma *et al.*, 2016). Si bien normalmente se suelen encontrar en concentraciones de  $\text{ng L}^{-1}$  a  $\mu\text{g L}^{-1}$  en efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) municipales, se han observado efectos negativos de varios microcontaminantes en organismos acuáticos. La aparición generalizada de microcontaminantes indica que las EDAR convencionales no pueden eliminar adecuadamente estas sustancias.

En los últimos años ya se ha investigado el tratamiento físico terciario de aguas residuales con contenido de microcontaminantes utilizando materiales de adsorción, como la filtración con carbón activado, como método de postratamiento de microcontaminantes (Solisio *et al.*, 2001; Stoquart *et al.*, 2016). Sin embargo, si bien el carbón activado es capaz de eliminar los microcontaminantes solubles de las aguas residuales, requiere la separación y eliminación

posterior de los microcontaminantes del propio carbón.

También se ha observado que la oxidación avanzada con agentes oxidantes, como el ozono o el cloro, resulta adecuada para la eliminación de varios microcontaminantes en el postratamiento de aguas residuales de efluentes (Benner *et al.*, 2013; Knopp *et al.*, 2016). Sin embargo, los altos costes asociados al tratamiento con ozono (Knopp *et al.*, 2016) y la posibilidad de formación de productos de oxidación persistentes con igual o mayor toxicidad que el producto químico principal (Benner *et al.*, 2013), hacen que el tratamiento biológico sea una alternativa muy deseada para la eliminación de microcontaminantes.

Algunos estudios recientes han propuesto sistemas de biopelículas, por ejemplo el MBBR, como alternativa prometedora a los sistemas convencionales de lodos activados (CAS) con respecto a la atenuación de microcontaminantes a través del tratamiento biológico (Escolà Casas *et al.*, 2015; Falas *et al.*, 2016, 2012; Hapeshi *et al.*, 2013; Torresi *et al.*, 2016). El reactor biológico de lecho móvil (MBBR) es una tecnología basada en biopelícula que crece en soportes plásticos específicamente diseñados para este fin, que se mantienen suspendidos en el reactor mediante aireación o mezcla mecánica. Los sistemas MBBR permiten lograr tiempos de retención de biomasa prolongados, creando así condiciones que favorecen el desarrollo y la retención en el sistema de microorganismos de crecimiento lento, como las bacterias nitrificantes (entre otras) responsables de la eliminación de los microcontaminantes.

Los mejores índices de eliminación del MBBR se han relacionado con el mayor tiempo de retención de

sólidos (SRT) en comparación con los sistemas CAS, lo que conlleva el incremento de la nitrificación y los especialistas microbianos capaces de mejorar la eliminación de una serie de microcontaminantes (Clara *et al.*, 2005; Suárez *et al.*, 2012; Torresi *et al.*, 2016).

Sin embargo, la implementación del tratamiento terciario para la eliminación de microcontaminantes mediante sistemas biológicos (ya sea a base de biopelículas o de biomasa suspendida) se ha visto limitada por diferentes factores, tales como:

- El mantenimiento de la cantidad de biomasa microbiana necesaria para la eliminación de los microcontaminantes, debido a los bajos niveles de carbono y nutrientes en las aguas residuales de los efluentes.
- La baja concentración de microcontaminantes en las aguas residuales de los efluentes que no favorecen el crecimiento de biomasa.
- La falta de carbono y nutrientes en las aguas residuales de los efluentes como elementos necesarios para aportar energía a la biodegradación de microcontaminantes (es decir, a través del cometabolismo).

A su vez, esto ha supuesto una baja tasa de eliminación de microcontaminantes o el sobredimensionamiento de los sistemas de tratamiento biológico terciario (Escolà Casas y Bester, 2015) debido a la baja actividad de la biomasa.

Por lo tanto, resulta necesario plantear nuevas estrategias operativas para optimizar el tratamiento biológico terciario, incluyendo el suministro de una fuente de energía, en forma de carbono fácilmente degradable, para ayudar a los microorganismos con capacidad de biodegradación de microcontaminantes.

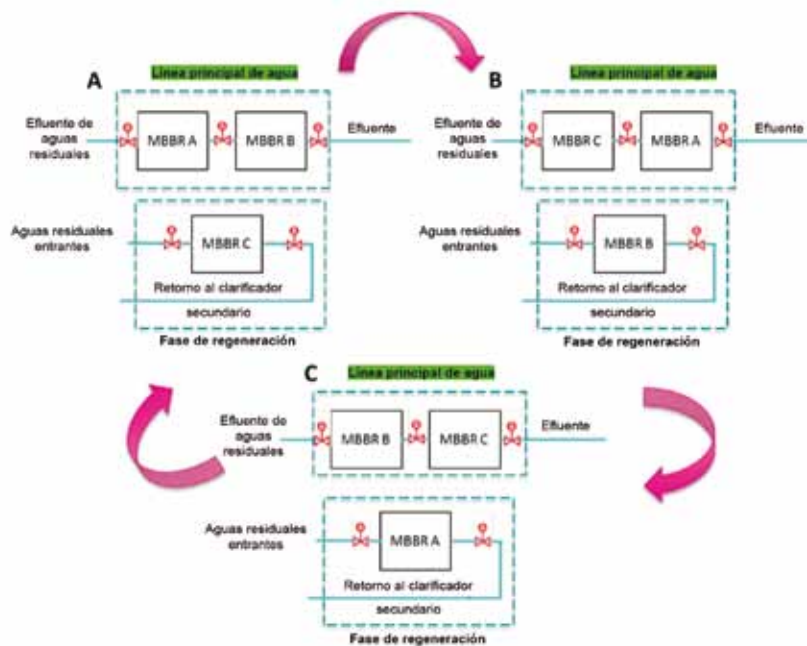
En este artículo, se presenta la tecnología eXeno, basada en la tecnología MBBR, al resumir los resultados del estudio de laboratorio (publicado en Tang *et al.*, 2017) y un estudio piloto realizado en dos EDAR de Dinamarca. Se utilizó eXeno para tratar aguas residuales de los efluentes de una EDAR convencional mediante el uso de MBBR de dos etapas, que alterna de manera intermitente las aguas residuales efluentes y de entrada (ricas en materia orgánica y nutrientes) para mejorar la actividad de las biopelículas y, al mismo tiempo, desarrollar bacterias con la capacidad específica para degradar microcontaminantes. El planteamiento se describe en la patente sueca SE539304 y se muestra en la **Figura 1**.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

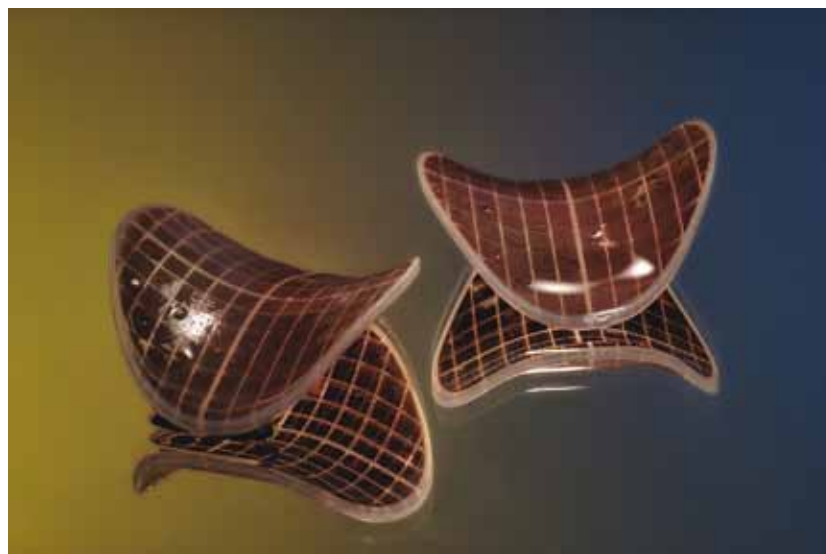
### 2.1. ESTUDIO DE LABORATORIO

La nueva configuración del MBBR se probó en tres reactores de vidrio de 3 L de volumen cada uno, que contenían soporte plástico AnoxK5 (AnoxKaldnes, Lund, Suecia) dentro de la EDAR de Viby en Aarhus (Dinamarca). Los reactores se airearon para aportar oxígeno disuelto (OD) y para mantener el soporte plástico en movimiento. Los reactores A y B (**Figura 1**) (conducto principal) se usaron para depurar aguas residuales efluentes, mientras que el reactor C (en fase de regeneración) se expuso a aguas residuales previamente clarificadas con alta carga de carbono (relación COD/N > 3) para estimular el crecimiento de la biopelícula. A intervalos fijos, se modificó la alimentación del sistema MBBR y el reactor C se utilizó como primer reactor de tratamiento (A), sin dejar de rotar el reactor B (**Figura 1b**). La fase de regeneración se aplicó cada 24 horas. El HRT de cada reactor se ajustó a

**FIGURA 1.** Depuración con eXeno de aguas residuales de efluentes municipales.



**FIGURA 2.** Soportes Z AnoxK.



0,5 o 2 horas, para lograr un HRT total de 1 o 4 horas para probar el impacto del HRT. Los métodos de este experimento se resumen en Tang *et al.* (2017).

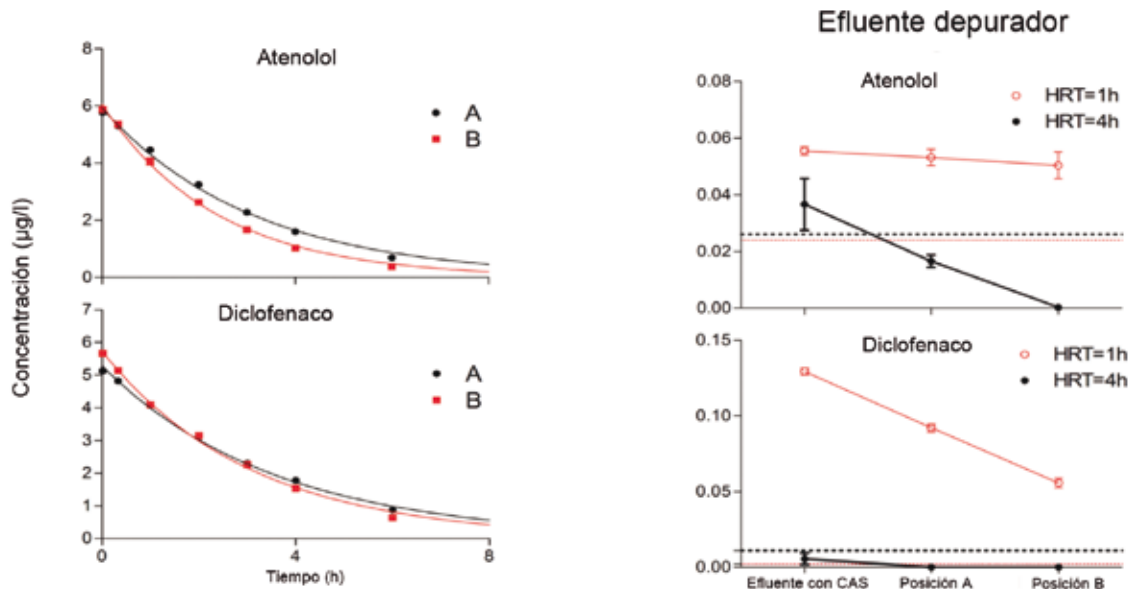
### 2.2. ESTUDIO PILOTO

La nueva configuración del MBBR (eXeno) se probó en un estudio piloto con MBBR (3 m<sup>3</sup>) para tratar

las aguas residuales municipales de la EDAR de Assens (Dinamarca) en el marco del proyecto HEPWAT. Se utilizó eXeno con los innovadores soportes Z de AnoxK (AnoxKaldnes, Lund, Suecia) (**Figura 2**), en los que el espesor de la biopelícula se puede controlar aumentando la actividad para eliminar varios microcontaminantes (Torresi *et al.*, 2016).



FIGURA 3. Resultados del estudio de laboratorio (Tang *et al.*, 2017).



Para este estudio, se utilizó una cantidad igual de soportes Z200 y Z400, lo que indica que en el MBBR había presente una biopelícula de 200 y 400  $\mu\text{m}$ , respectivamente. El funcionamiento del estudio piloto se describe en la **Figura 1** y es similar al descrito anteriormente para el estudio de laboratorio. En este caso, el caudal alterno con eXeno (para la fase de regeneración) derivó de un agua residual con una baja relación de COD/N (entre 1 y 3). Con ello, se favoreció el crecimiento de bacterias nitrificantes en la biopelícula. El HRT del conducto principal se mantuvo en 2 horas. La fase de regeneración se aplicó cada 12 horas.

En ambos experimentos, se midieron los parámetros de aguas residuales convencionales (es decir, pH, OD, carbono orgánico disuelto o COD y amonio) de acuerdo con los métodos estándar. La biomasa adherida a los portadores donde se midió según Tang *et al.*, 2017. Cuando ambos sistemas alcanzaron un rendimiento estable en términos de eliminación de COD y nitrógeno, se realizaron experimentos por lotes de

24 horas para evaluar el potencial de biodegradación, añadiendo 20 productos farmacéuticos de referencia con una concentración inicial de 3 a 20  $\mu\text{g}$  de  $\text{L}^{-1}$ . Los soportes del estudio de laboratorio y el estudio piloto se llevaron a laboratorio para realizar pruebas por lotes, utilizando las aguas residuales reales de cada estudio y la misma cantidad de soportes. Para determinar la eliminación real de productos farmacéuticos en el estudio de laboratorio, se tomaron muestras (con concentraciones habituales) de la entrada y la salida de los reactores de acuerdo con el HRT.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. ESTUDIO DE LABORATORIO

La eliminación total de COD fue del 6 %, lo que sugiere que el COD en las aguas residuales del efluente estaba formada por compuestos altamente recalcitrantes. En la posición A (primera etapa) y en todo el sistema (compuesto de, al menos, 2 etapas), se eliminó el  $\text{NH}_4\text{-N}$  hasta un 89 % y 99 %, respectivamente, lo que sugiere que eXeno también es

eficaz para el tratamiento terciario del amonio.

Los resultados del experimento por lotes mostraron que la biodegradación de atenolol y diclofenaco, entre otros, se mejoró notablemente mediante la alimentación intermitente de los reactores del MBBR por etapas (**Figura 3**). Las constantes de velocidad de los productos farmacéuticos (normalizados a la concentración de biomasa) fueron significativamente más altas en comparación con otros estudios de lodos activados y biopelículas en suspensión (Falàs *et al.*, 2012; Escolà Casas *et al.*, 2015), especialmente en el caso del diclofenaco, que dieron como resultado una vida media de 2 horas. Además, las tasas de biodegradación del reactor en la posición B fueron generalmente más altas que en el reactor A para varios compuestos. El efecto de aumentar el HRT en la eliminación de productos farmacéuticos fue específico para cada compuesto. También se observó la eliminación de atenolol y diclofenaco en operación continua (con HRT = 1 h y HRT = 4 h, **Figura**

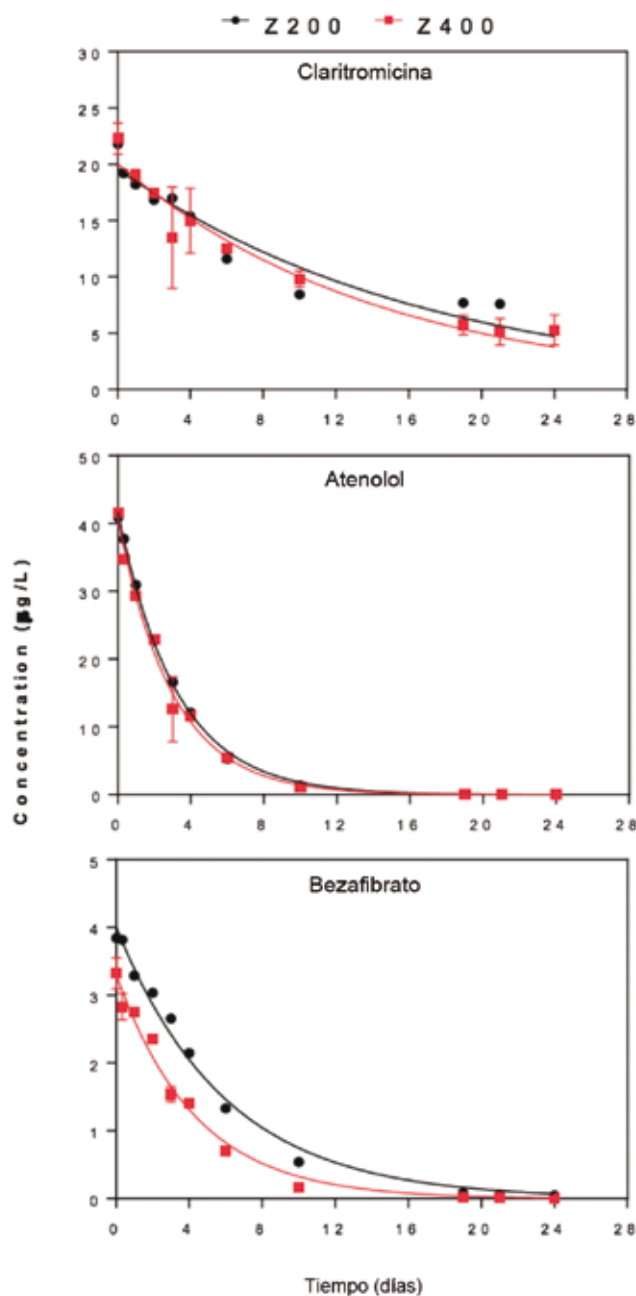
3), con una tasa de eliminación de diclofenaco de, aproximadamente, entre el 50% y 100% a 1 y 4 horas de HRT, respectivamente. En comparación con los resultados obtenidos anteriormente, se lograron mayores tasas de eliminación de ocho compuestos (atenolol, ciprofloxacina, diclofenaco, iopromida, metoprolol, sulfametizol, tramadol y venfalaxina), mientras que para los compuestos restantes se obtuvieron tasas de eliminación similares a las obtenidas mediante CAS.

### 3.2. ESTUDIO PILOTO

Se evaluó por separado la capacidad de eliminación de microcontaminantes para el estudio piloto de eXeno de los soportes Z200 y Z400 con el fin de analizar el impacto del espesor de la biopelícula en la eliminación de microcontaminantes. La eficacia de eliminación de los compuestos de atenolol se confirmó en el MBBR piloto, que presentó una cinética de biodegradación un 20% más rápida en comparación con el estudio de laboratorio. Además, el estudio piloto con eXeno presentó una mayor eficiencia en la eliminación de antibióticos específicos (macrólidos, como claritromicina, azitromicina y eritromicina) (Figura 4), con una cinética superior a la de estudios anteriores (Falàs *et al.*, 2012; Escolà Casas *et al.*, 2015). La cinética de biodegradación estimada de otros compuestos (datos no mostrados) fue comparable al estudio de laboratorio.

Si bien en el caso de compuestos como atenolol y claritromicina no se observaron diferencias importantes entre Z200 y Z400, en el caso del bezafibrato, la utilización de espesores de biopelículas mayores (400 µm) sí influyó positivamente en la eliminación (Figura 4).

FIGURA 4. Resultados del estudio piloto (Tang *et al.*, 2017).



## 4. CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

La estrategia de alimentación alterna que utiliza una fuente de carbono fácilmente degradable a partir de aguas residuales previamente establecidas (alta carga de COD/N como en el estudio de laboratorio o baja carga de COD/N como en el estudio piloto) tuvo un efecto muy

positivo en las tasas de eliminación de varios microcontaminantes en un tratamiento MBBR de dos etapas. Se estima que el carbono y el nitrógeno presentes en las aguas residuales aportadas durante para la fase de regeneración, estimulan el crecimiento de la biopelícula y, en particular, el de las bacterias que actúan en la degradación de com-



FIGURA 5. Depuración de aguas residuales de efluentes municipales con eXenO<sub>3</sub>.



puestos farmacéuticos. Por ello, es posible alcanzar una degradación de entre el 50% y el 80% de sustancias específicas.

Las ventajas del sistema biológico eXeno con respecto a las dos tecnologías principales utilizadas para la depuración de efluentes de aguas residuales (carbón activo y ozono) son:

- Unos menores costes operativos (asociados a la producción y regeneración de carbono activado y la generación de O<sub>3</sub>, respectivamente).
- La reducción de la formación de productos de oxidación con igual o mayor toxicidad que el producto químico original, habituales en las tecnologías de tratamiento avanzadas.

La combinación de eXeno con ozonización, eXenO<sub>3</sub> (Figura 5), ofrece como beneficio la eliminación de los productos de transformación creados mediante ozonización, la eliminación adicional de carbono y nitrógeno de las aguas residuales de los efluentes y, en general, una dosis reducida de ozono para alcanzar el 90% de eliminación en comparación con el uso únicamente de ozo-

nización para el tratamiento terciario de microcontaminantes.

## 5. AGRADECIMIENTOS

El proyecto HEPWAT está financiado por el Ministerio de Medio Ambiente de Dinamarca a través del programa MUDP Lighthouse (<http://www.hepwat.dk/en/project/mudp>).

### Bibliografía

- [1] Barbosa, M.O. *et al.* (2016). Occurrence and removal of organic micropollutants: an overview of the watch list of EU Decision 2015/495. *Water Research*, núm. 94, págs. 257-279.
- [2] Benner, J. *et al.* (2013). Is biological treatment a viable alternative for micropollutant removal in drinking water treatment processes?. *Water Research*, núm. 47(16), págs. 5.955-5.976.
- [3] Clara, M. *et al.* (2005). The solids retention time-a suitable design parameter to evaluate the capacity of wastewater treatment plants to remove micropollutants. *Water Research*, núm. 39, págs. 97-106.
- [4] Escolà Casas, M. *et al.* (2015). Biodegradation of pharmaceuticals in hospital wastewater by a hybrid biofilm and activated sludge system (Hybas). *Science of The Total Environment*, núm. 530-531, págs. 383-392.
- [5] Escolà Casas, M.; Bester, K. (2015). Can those organic micro-pollutants that are recalcitrant in activated sludge treatment be removed from wastewater by biofilm reactors (slow sand filters)?. *The Science of The Total Environment*, núm. 506-507, págs. 315-322.
- [6] Escolà Casas, M.E.; *et al.* (2015). Biodegradation of pharmaceuticals in hospital wastewater by staged moving bed biofilm reactors (MBBR). *Water Research*, núm. 83, págs. 293-302.
- [7] Falàs, P.; *et al.* (2012). Suspended biofilm carrier and activated sludge removal of acidic pharmaceuticals. *Water Research*, núm. 46(4), págs. 1.167-1.175.

[8] Falàs, P.; *et al.* (2016). Tracing the limits of organic micropollutant removal in biological wastewater treatment. *Water Research*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.watres.2016.03.009.

[9] Hapeshi, E.; *et al.* (2013). Investigating the fate of iodinated X-ray contrast media iohexol and diatrizoate during microbial degradation in an MBBR system treating urban wastewater. *Environmental Science and Pollution Research International*, núm. 20(6), págs. 3.592-3.606.

[10] Knopp, G.; *et al.* (2016). Elimination of micropollutants and transformation products from a wastewater treatment plant effluent through pilot scale ozonation followed by various activated carbon and biological filters. *Water Research*. doi: 10.1016/j.watres.2016.04.069.

[11] Postel, S.L. (2000). Entering an era of water scarcity: The challenges ahead. *Ecological Applications*, núm. 10(4), pág. 941.

[12] Reemtsma, T.; *et al.* (2006). Polar pollutants entry into the water cycle by municipal wastewater: An european perspective. *Environmental Science & Technology of American Chemical Society*, núm. 40(17), págs. 5.451-5.458.

[13] Solisio, C.; Lodi, A.; Borghi, M. (2001). Treatment of effluent containing micropollutants by means of activated carbon. *Waste Management*, núm. 21(1), págs. 33-40.

[14] Stoquart, C.; *et al.* (2016). Micropollutant removal potential by aged powdered activated carbon. *Journal of Environmental Engineering of American Society of Civil Engineers*, p. 4016058. doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001125.

[15] Suárez, S. *et al.* (2012). Mass balance of pharmaceutical and personal care products in a pilot-scale single-sludge system: influence of T, SRT and recirculation ratio. *Chemosphere*, núm. 89(2), págs. 164-171.

[16] Tang, K.; *et al.* (2017). Removal of pharmaceuticals in conventionally treated wastewater by a polishing moving bed biofilm reactor (MBBR) with intermittent feeding. *Bioresource Technology*, núm. 236, págs. 77-86.

[17] Torresi, E.; *et al.* (2016). Biofilm thickness influences biodiversity in nitrifying MBBRs. Implications on micropollutant removal. *Environmental Science & Technology*, p. acs.est.6b02007. doi: 10.1021/acs.est.6b02007.