

eXeno: eliminación sostenible de microcontaminantes de efluentes de EDAR municipales con reactores biológicos de lecho móvil. Resultados de estudios de laboratorio y piloto

Las plantas de tratamiento de aguas residuales 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.

**ELENA TORRESI, MAGNUS CHRISTENSSON
Y BRANDY NUSSBAUM, VEOLIA WATER
TECHNOLOGIES, LUND (SUECIA)**

**KAI TANG Y HENRIK R. ANDERSEN,
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE DINAMARCA, LYNGBY
(DINAMARCA)**

**CHRISTINA SUND, KRÜGER A / S, SØBORG
(DINAMARCA)**

**KAREN SHAW, VEOLIA WATER TECHNOLOGIES,
NSW (AUSTRALIA)**

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., 2006). Si bien normalmente se suelen encontrar en concentraciones de 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 (por ejemplo, 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. 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 (M. Escolà Casas et al., 2015; Falås 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:

- I. 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.
- II. La baja concentración de microcontaminantes en las aguas residuales de los efluentes que no favorecen el crecimiento de biomasa.
- III. 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 and 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

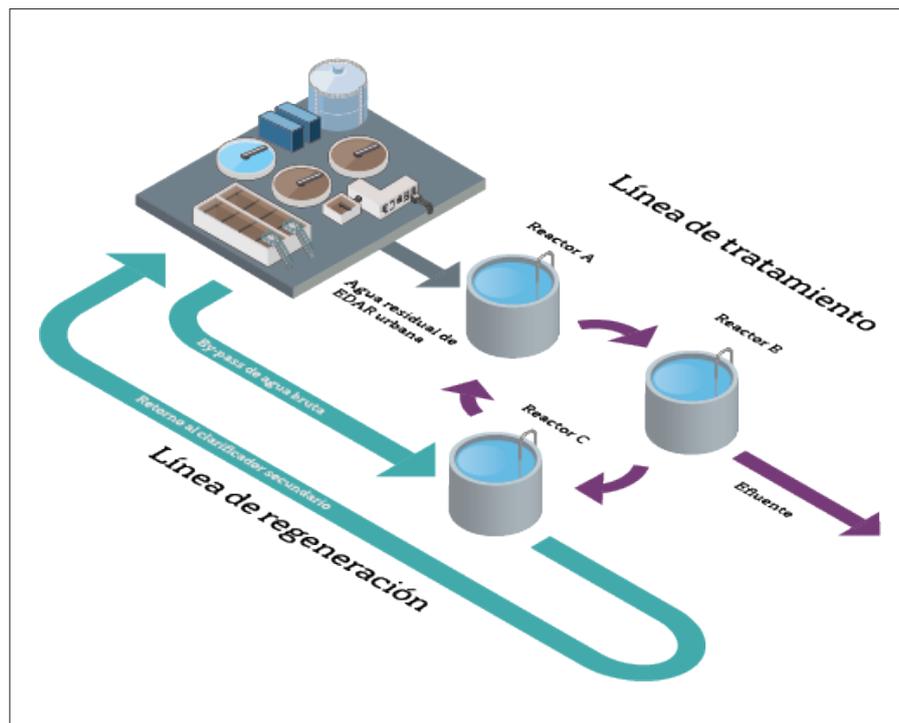


Figura 1. Depuración con eXeno de aguas residuales de efluentes municipales.

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 la biopelícula 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.

Material y métodos

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 1). La fase de regeneración se aplicó cada 24 horas. El HRT de cada reactor se ajustó a 0,5 o 2 horas, para lograr un HRT total de 1 o 4 horas y probar el impacto del HRT. Los métodos de este experimento se resumen en Tang et al. (2017).

Estudio piloto

La nueva configuración del MBBR (eXeno) se probó en un estudio piloto con MBBR (3 m³) para tratar las aguas residuales municipales de la EDAR de Assens (Dinamarca) en el marco del proyecto HEPWAT (ref. HEPWAT). Se utilizó eXeno con los 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). Para este estudio se utilizó una cantidad igual de soportes Z200 y Z400, lo que indica que en el MBBR había presente una biopelícula

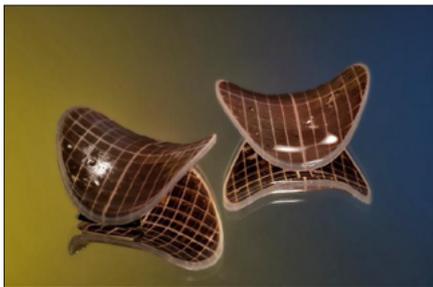


Figura 2. Portadores Z AnoxK.

de 200 y 400 μm , 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 [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 μg de 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 de la salida de los reactores de acuerdo con el HRT.

Resultados y discusión

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 (Falås et al., 2012; M. E. 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 $\text{HRT} = 1 \text{ h}$ y $\text{HRT} = 4 \text{ h}$, 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 venlafaxina, mientras que, para los compuestos restantes, se obtuvieron tasas de eliminación similares a las obtenidas mediante CAS.

Estudio piloto

Más de 30 productos farmacéuticos y otros microcontaminantes se estudiaron en tres estudios piloto diferentes de eXeno. Las pruebas de degradación indicaron la eliminación de las sustancias entre un 20 y un 100% con tasas de reacción mucho más altas en comparación con otros sistemas biológicos de lodos activados.

Los productos farmacéuticos conocidos por ser altamente recalcitrantes como el iohexol, un agente de contraste común para rayos X y generalmente no biodegradable por lodos activados, se redujo hasta en un 70%. El diclofenaco, un fármaco antiinflamatorio que despierta un gran interés por sus efectos tóxicos para el medio ambiente, puede eliminarse en eXeno hasta en un 40% (figura 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 la fase de regeneración,

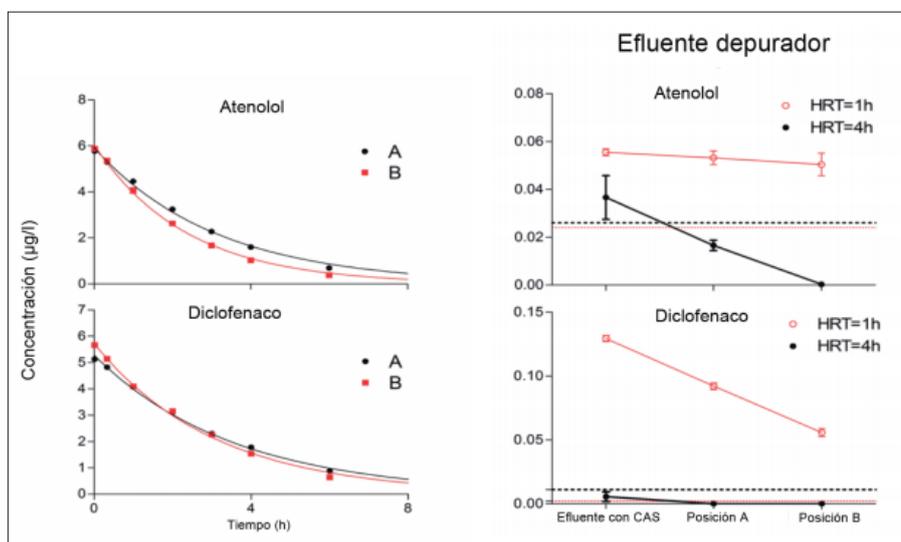


Figura 3. Resultados del estudio de laboratorio (Tang et al., 2017).

3 - 4
noviembre 2021

Pabellón 7

IFEMA Madrid

NUEVAS
FECHAS

cosmética forum

FORO DE PROVEEDORES DE LA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN
DE COSMÉTICOS, PERFUMERÍA, HIGIENE Y BELLEZA

cosmética pack

Es el área de exposición vinculada al congreso de **COSMÉTICA FORUM**. Es el evento enfocado a que estén presentes las empresas que ofrecen diseño de packaging, fabricación por contrato, materias primas, maquinaria y todos los servicios para la industria cosmética.

PATROCINA

**Gear
Translations**
move forward

Dr. **GOYA** análisis

grupo **VIRTUS**

COLABORA

Beauty Cluster
BARCELONA



SEQC
SOCIEDAD ESPAÑOLA DE
QUÍMICOS COSMÉTICOS

stanpa
Asociación Nacional
de Perfumería y Cosmética

REVISTAS OFICIALES

FI Farmespaña
Industrial

life **sciences lab**
Tendencias de Investigación, Análisis, Diagnóstico y Control de Laboratorio

INDUSTRIA
COSMÉTICA

☎ 91 630 85 91 / 672 050 625

✉ info@farmaforum.es

🌐 cosmeticaforum.es

estimulan el crecimiento de la biopelícula y, en particular, el de las bacterias que actúan en la degradación de compuestos 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:

- I. Unos menores costes operativos (asociados a la producción y regeneración de carbono activado y la generación de O_3 , respectivamente).
- II. 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, (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 (figura 5) en comparación con el uso únicamente de ozonización para el tratamiento terciario de microcontaminantes

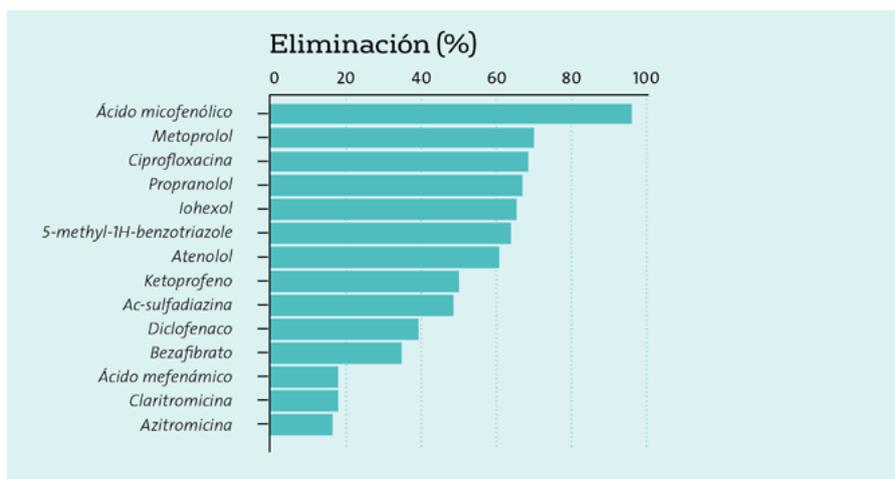


Figura 4. Indicadores compuestos y su máxima eliminación esperada con eXeno.

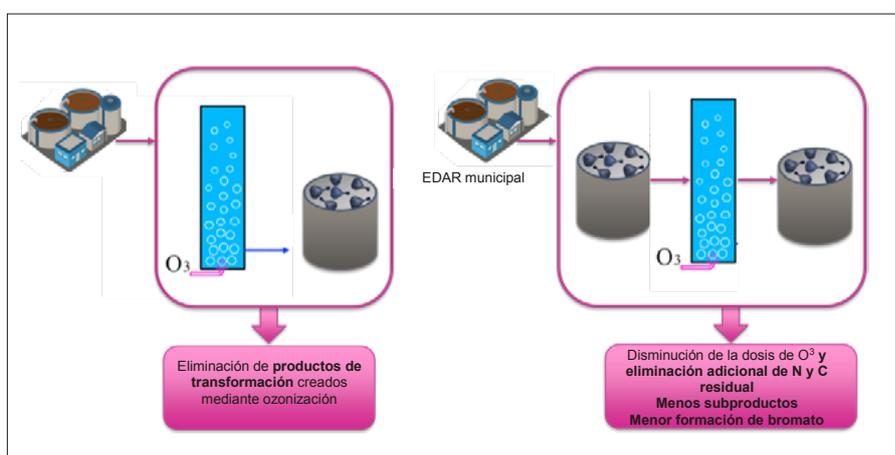


Figura 5. depuración de aguas residuales de efluentes municipales.

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

Referencias

1. M. O. et al. (2016) 'Occurrence and removal of organic micropollutants: An overview of the watch list of EU Decision 2015/495', *Water Research*, 94, pp. 257–279.
2. Benner, J. et al. (2013) 'Is biological treatment a viable alternative for micropollutant removal in drinking water treatment processes?', *Water research*. Elsevier Ltd, 47(16), pp. 5955–76. doi: 10.1016/j.watres.2013.07.015.
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*, 39(1), pp. 97–106. doi: 10.1016/j.watres.2004.08.036.
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*. Elsevier B.V., 530–531, pp. 383–392. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.099.
5. Escolà Casas, M. and 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*, 506–507, pp. 315–22. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.10.113.
6. Escolà Casas, M. E. et al. (2015) 'Biodegradation of pharmaceuticals in hospital wastewater by staged Moving Bed Biofilm Reactors (MBBR)', *Water Research*, 83, pp. 293–302. doi: 10.1016/j.watres.2015.06.042.
7. Falås, P. et al. (2012) 'Suspended biofilm carrier and activated sludge removal of acidic pharmaceuticals.', *Water research*, 46(4), pp. 1167–75. doi: 10.1016/j.watres.2011.12.003.
8. Falås, 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*, 20(6), pp. 3592–606. doi: 10.1007/s11356-013-1605-1.
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*, 10(4), p. 941. doi: 10.2307/2641009.
12. Reemtsma, T. et al. (2006) 'Polar Pollutants Entry into the Water Cycle by Municipal Wastewater: A European Perspective', *Environmental Science & Technology*. American Chemical Society, 40(17), pp. 5451–5458. doi: 10.1021/es060908a.
13. Solisio, C., Lodi, A. and Borghi, M. Del (2001) 'Treatment of effluent containing micropollutants by means of activated carbon', *Waste Management*, 21(1), pp. 33–40. doi: 10.1016/S0956-053X(00)00069-6.
14. Stoquart, C. et al. (2016) 'Micropollutant Removal Potential by Aged Powdered Activated Carbon', *Journal of Environmental Engineering*. 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*, 89(2), pp. 164–71. doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.05.094.
16. Tang, K. et al. (2017) 'Removal of pharmaceuticals in conventionally treated wastewater by a polishing moving bed biofilm reactor (MBBR) with intermittent feeding', *Bioresour. Technol.* Elsevier Ltd, 236, pp. 77–86. doi: 10.1016/j.biortech.2017.03.159.
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.