

# Oxidación en agua supercrítica de lodos de EDAR: Proyecto LIFE Lo2x

Carbajo J.B.<sup>1</sup>, Claros J.<sup>1</sup>, Casas E.<sup>1</sup>, Capilla V.<sup>1</sup>, Montañes J.<sup>1</sup>, García M.<sup>1</sup>, Coll C.<sup>2</sup>, López F.<sup>3</sup>, di Silvestre R.<sup>3</sup>, Heredia F.<sup>3</sup>, Casal J.<sup>4</sup>, Abelleira-Pereira J.M.<sup>4</sup>, O'Regan J.<sup>4</sup>, García-Vera C.<sup>5</sup>, Muñagorri-Mañueco F.<sup>5</sup>, Álvarez C.<sup>5</sup>, Pascual A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AINIA | [www.ainia.es](http://www.ainia.es) ■ <sup>2</sup>IMECAL | [www.imecal.com](http://www.imecal.com) ■ <sup>3</sup>IVEM | [www.ivem.es](http://www.ivem.es) ■ <sup>4</sup>SCFI | [www.scfi.eu](http://www.scfi.eu) ■ <sup>5</sup>URBASER | [www.urbaser.es](http://www.urbaser.es)



## 1. INTRODUCCIÓN

El alto contenido de contaminantes físicos, químicos y biológicos de los lodos de depuradora, el incremento significativo en su producción en los próximos años y la aplicación mayoritaria de éstos en usos agrícolas entran en conflicto con la futura legislación europea sobre aplicación de lodos en la agricultura, la cuál tiene un carácter fuertemente restrictivo (García et al., 2016). De hecho, el 4º borrador que modificará la Directiva 86/278/CEE, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, a los suelos, sobre la utilización de los lodos con fines agrícolas, establece límites más restrictivos en cuanto a metales pesados (cadmio, mercurio, plomo, cobre, cromo, níquel y zinc), micro-contaminantes orgánicos (e.g.,

bifenilos policlorados, dioxinas y furanos...) y especialmente en patógenos, donde parámetros indicadores basados en *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens* y *Salmonella sp.* deben ser cumplidos para permitir su aplicación en agricultura.

Por otro lado, la reutilización de materias primas que actualmente se eliminan como residuos es uno de los principios clave de las estrategias de los modelos de producción bajo economía circular que persigue la Unión Europea (UE). En este sentido los lodos de depuradora son el principal residuo de una estación de depuración de aguas residuales (EDAR), por lo que las tecnologías que permitan la conversión de este residuo en recurso serán un elemento esencial para el aumento de la eficiencia en el uso de los recursos y el avance hacia una economía más circular.

Por tanto, procesos que produzcan una eficaz y económica reducción del nivel de contaminantes tóxicos y patógenos, unido a la recuperación de energía y nutrientes presentes en los lodos como fertilizantes (i.e., fósforo y nitrógeno) tendrán una considerable demanda en el futuro. Ello está conduciendo a una búsqueda de nuevos y apropiados procesos de tratamiento y/o valorización de lodos, entre los que se encuentra la tecnología de Oxidación en Agua Supercrítica.

## 2. GENERACIÓN Y GESTIÓN DE LODOS DE EDAR EN LA UE

Durante los últimos 25 años, la implementación de la Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas ha obligado a la UE de los 15 a mejorar sus redes de recogida

**Tabla 1. Cantidad de lodo generado en la Unión Europea en el año 2012 a excepción de Italia, cuyos datos son de 2010 (Eurostat, 2016)**

País	Generación (10 <sup>3</sup> t/año)	Porcentaje acumulado	País	Generación (10 <sup>3</sup> t/año)	Porcentaje acumulado
España	2.757	29	Polonia	533	40
Alemania	1.849	48	Rep. Checa	263	60
Reino Unido	1.137	60	Hungría	162	72
Italia	1.102	71	Rumania	85	83
Francia	987	81	Bulgaria	59	87
Países Bajos	346	85	Eslovaquia	59	90
Portugal	339	88	Lituania	45	94
Austria	266	91	Croacia	42	96
Suecia	208	93	Eslovenia	26	97
Bélgica	157	95	Estonia	22	99
Finlandia	141	96	Letonia	20	99
Dinamarca	141	98	Malta	10	99
Grecia	119	99	Chipre	7	100
Irlanda	72	100			
Luxemburgo	8	100			
EU-15	9.629	100	EU-13	1.334	

de aguas residuales e infraestructuras de tratamiento. Como resultado, se incrementó casi un 50% la generación anual de lodos de EDAR, desde 6,5 millones de toneladas (en materia seca) en 1992 hasta 9,6 millones en 2005; año a partir del cual su generación ha sido constante hasta 2012. Por su parte, la generación anual en la UE-13 (nuevos Estados miembros) se estimó en 1,1 y 1,3 millones de toneladas en 2005 y 2012, respectivamente. Es por tanto obvio, que la implementación de la Directiva 91/271/CEE en los nuevos Estados miembros provoque un aumento significativo en la generación de lodos durante los próximos años, excediendo los 13 millones de toneladas en 2020.

Tal y como muestra la Tabla 1, dentro de la eurozona, la generación de lodos es notablemente diferente entre los distintos Estados. Entre los países de la UE-15, la mayor generación se produce en España, Alemania, Reino Unido, Italia y Francia. Estos cinco países contribuyen más de cuatro quintos del total de lodos de depuradora produci-

dos. Con respecto a la UE-13, Polonia es el mayor productor de fangos, generando el 40% de la cantidad total. En este grupo de trece países, Polonia, la República Checa y Hungría contribuyen cerca de tres cuartas partes en la generación de lodos.

La legislación europea exige que los lodos de depuradora hayan sido sometidos a estabilización o tratamiento previo por vía biológica, química o térmica, mediante almacenamiento a largo plazo o por cualquier otro procedimiento apropiado, de manera que se reduzcan significativamente, su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de utilización. Una vez estabilizados, las principales alternativas de gestión son: aplicación directa como fertilizante, compostaje, incineración y evacuación por depósito en suelo. Las principales ventajas e inconvenientes así como los costes asociados a las alternativas de gestión final utilizadas en la UE se muestran en la Figura 1.

Figura 2 representa la distribución de las diferentes alternativas de eliminación de fangos llevadas a cabo en el año 2012 en la UE-15 y UE-13. Como se observa la filosofía de gestión de los lodos de EDAR es muy diferente entre los miembros antiguos y los nuevos. En 7 de los 15 países de la antigua Unión Europea el método que prevalece (>60%) es la aplicación de lodos estabilizados como fertilizante en agricultura. A estos países se les podría añadir



**Figura 1. Resumen de las ventajas, inconvenientes y costes de las diferentes alternativas para la gestión de lodos de EDAR utilizadas mayoritariamente en la Unión Europea. m. s. materia seca**

Suecia y Finlandia si se considera el compostaje previo a su aplicación al suelo. La incineración es ampliamente utilizada en países centro europeos como Austria, Bélgica, Alemania y Países Bajos. Una mayor heterogeneidad en el método empleado se puede observar tanto en Grecia como en Italia.

En los países de la UE-13, la gestión de los lodos no es clara ya que un elevado porcentaje de los fangos no tiene un método definido, como es el caso de Chipre, Polonia, Letonia o Eslovenia. Este hecho, es especialmente preocupante en Polonia, donde para más de la mitad de los fangos se desconoce su gestión; un país que representa el 4% de los lodos generados en toda Europa. La evacuación de los lodos de EDAR en vertedero es también común en Malta, Rumania o Estonia. Por su parte, la incineración, a excepción de Eslovenia, es escasamente aplicable en los nuevos miembros de la Unión.

### 3. COMPLEJIDAD DE LA COMPOSICIÓN DE UN LODO DE EDAR

Los lodos de EDAR son una mezcla heterogénea de microorganismos, compuestos orgánicos e inorgánicos y agua. Su composición es variable y depende del origen y carga contaminante del agua residual afluyente a la depuradora, así como de las características técnicas de los tratamientos llevados a cabo en la línea de agua de la EDAR. El proceso de depuración del agua genera una amplia diversidad de materias suspendidas y disueltas, que al no ser degradadas en la propia línea de agua, se concentran en los lodos (da Silva et al., 2007). Es así como en los lodos de depuradora se pueden encontrar diversidad de contaminantes de carácter físico (e.g., micro-plásticos o nano-partículas), químico (e.g., micro-contaminantes o metales pesados) y biológicos (e.g., patógenos o genes resistentes a antibióticos) (Figura 3). A continuación

se presenta una descripción de los contaminantes más representativos.

#### 3.1. Micro-contaminantes orgánicos

Los micro-contaminantes son compuestos químicos de origen sintético procedentes de fuentes muy variadas que se detectan en bajas concentraciones, del orden de  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Debido a su toxicidad, persistencia y bioacumulación pueden ocasionar efectos adversos en los seres vivos y el medioambiente.

Las propiedades físico-químicas (i.e., solubilidad, volatilidad, polaridad, biodegradabilidad, y estabilidad) de los micro-contaminantes, provocan que no se degraden completamente en las EDAR, concentrándose en los lodos. La Figura 3 muestra concentraciones medias de diferentes clases de micro-contaminantes orgánicos detectadas en los lodos (Clarke y Smith, 2011). Las concentraciones varían desde los  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en el caso de los compuestos químicos perfluorados

(PFCs), hasta los g/kg en los alcanos policlorados (PCAs). Es importante resaltar que las concentraciones de sustancias de origen industrial, como es el caso de los PCAs, son notablemente superiores a las de origen doméstico, e.g. el biocida triclosan (TCS). Por otro lado, los compuestos orgánicos persistentes (COPs), entre los que se encuentran naftalenos policlorados (PCNs), policlorobifenilos (PCBs) o dioxinas y furanos (PCDD/Fs), se han detectado en bajas concentraciones como consecuencia del control en origen (Stockholm Convention, 2015).

La mayor parte de los micro-contaminantes citados son considerados altamente peligrosos, principalmente debido a que la gran mayoría son liposolubles y poco biodegradables. Estas propiedades pueden provocar su bioacumulación dentro de la cadena alimentaria, hecho que causa efectos negativos en animales e incluso en el propio hombre. Sin embargo, entre la totalidad de los grupos de sustancias químicas detectadas, tres tienen una particular importancia: PFCs, PCAs y an-

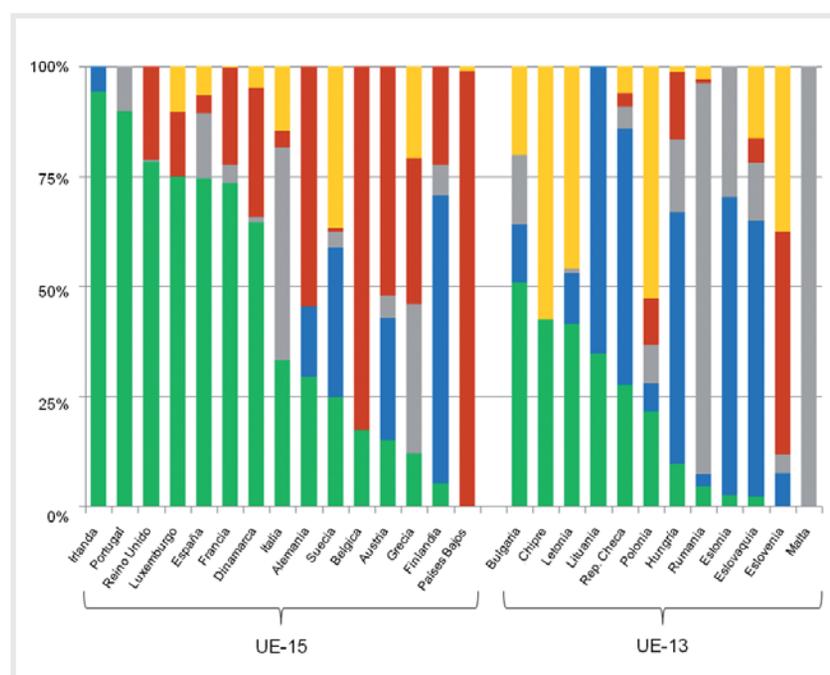


Figura 2. Distribución de los métodos de gestión de los lodos de EDAR por países de la Unión Europea en 2012 (Eurostat, 2016). Verde: Aplicación de los lodos como fertilizantes; Gris: Evacuación de lodos por depósito en el suelo; Azul: Compostaje; Rojo: Incineración de lodos; y Amarillo: Otros. Croacia no aparece en la UE-13 debido a la falta de datos.

tibióticos. Los compuestos químicos perfluorados se constituyen como preocupación ambiental emergente como consecuencia de que se han detectado tanto en sangre humana (Olsen et al., 2003) como en diferentes ecosistemas (Giesy y Kannan, 2001). Estos micro-contaminantes, en comparación con los COPs, se caracterizan por tener una alta solubilidad en agua, por lo que existe una mayor probabilidad de exposición a través de diferentes rutas (Lindim et al., 2017). Por su parte, los PCAs son detectados en concentraciones relativamente altas, concentraciones medias de 1.800 g/kg. La comparativa entre la concentración de este grupo de contaminantes con PCBs y PCDD/Fs muestra que, por ejemplo, la cantidad de PCAs en los lodos es al menos tres órdenes de magnitud mayor que la de los COPs. Finalmente, es importante destacar que la presencia de antibióticos y biocidas en los lodos de EDAR está suponiendo una creciente preocupación debido a que se está relacionando su presencia con la detección e identificación de genes y bacterias multirresistentes (Schwartz et al., 2003; Rizzo et al., 2014).

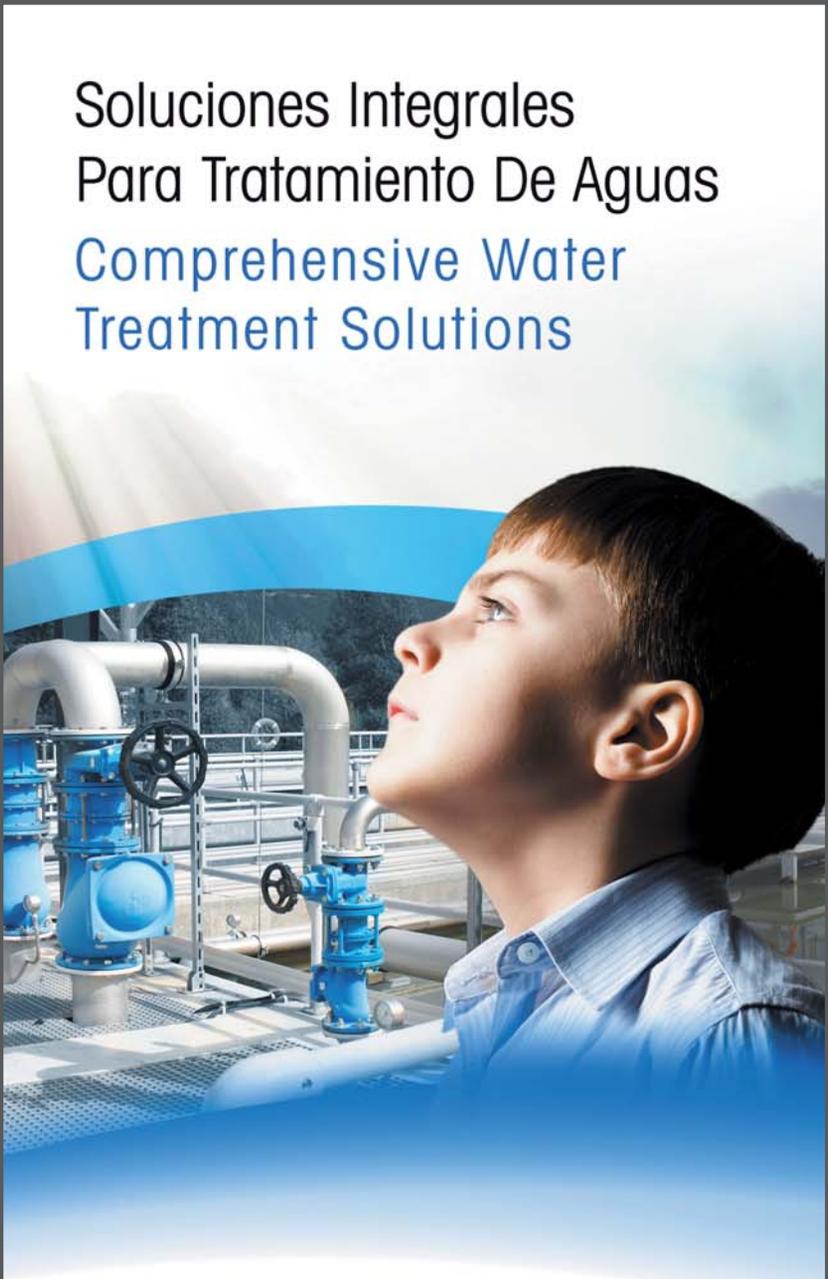
### 3.2. Metales pesados

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos, algunos de ellos considerados como tóxicos para los seres vivos, incluso a bajas concentraciones, debido a su potencial para biomagnificarse a través de la cadena alimentaria y acumularse en los tejidos humanos (Martin y Griswold, 2009).

Generalmente los metales pesados presentes en las aguas residuales provienen de la actividad industrial, y en su paso por las EDAR, tienden a concentrarse en los lodos. Tal y como se puede observar en la Figura 3, las concentraciones de estos contaminantes inorgánicos varían significativamente dependiendo del origen del afluente. La presencia de metales pesados como zinc, cobre, níquel, cadmio, plomo, mer-

# Soluciones Integrales Para Tratamiento De Aguas

## Comprehensive Water Treatment Solutions





Técnicas de  
Desalinización de Aguas, SA

OFICINAS CENTRALES  
Cardenal Marcelo Spinola, 10  
28016 - Madrid (SPAIN)  
Tlf.: (+34) 914 569 500  
E-mail: tedagua@tedagua.com

[www.tedagua.com](http://www.tedagua.com)

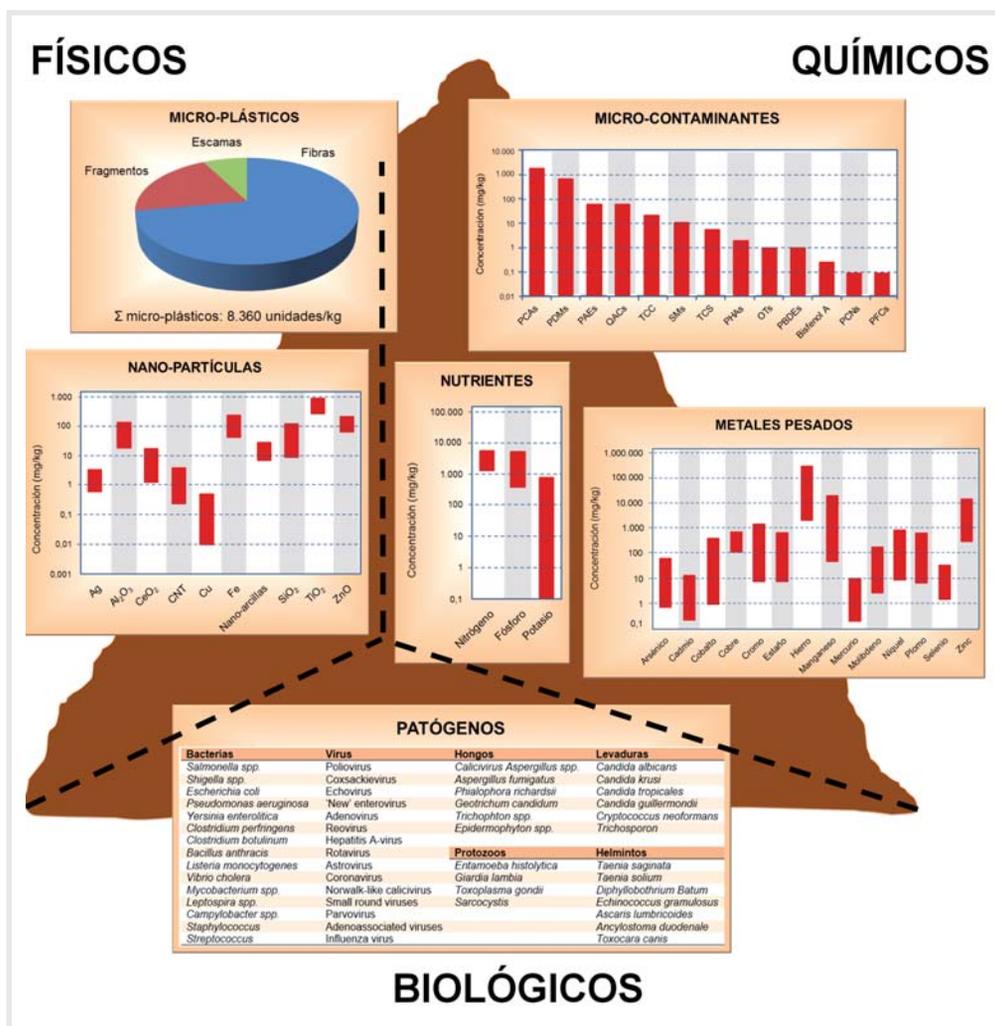


Figura 3. Representación de los principales contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en los lodos de EDAR. Datos obtenidos a partir de Carrington (2001), Clarke y Smith (2011), Keller y Lazarova (2014) y Metcalf y Eddy (2014). (Alcanos policlorados (PCAs), Polidimetilsiloxanos (PDMS), Esteres Italatos ácidos (PAEs), Tensioactivos de amonio cuaternario (QACs), Triclocarbán (TCC), Azmicles sintéticos (SMs), Triclosan (TCS), Medicamentos y Antibióticos (PAHs), Organo-estano (OTs), Esteres de difenilpolibromatos (PBDEs), Naftalenos policlorados (PCNs), Compuestos Perfluorados (PFCs) y Nano-tubos de carbono (CNT).

curio y cromo en los lodos de EDAR dificultan su gestión y limitan su disposición final (Fytilli y Zabanoitou, 2008).

Además de los citados metales pesados, cabe destacar la posible presencia de otros elementos no metálicos (metales), tales como el arsénico, bromo, bismuto, selenio y yodo, los cuales causan efectos perjudiciales de igual o incluso más adversidad (Fytilli y Zabanoitou, 2008).

### 3.3. Nutrientes

Los nutrientes son cualquier elemento

o compuesto químico necesario para la actividad metabólica de los seres vivos. Gran parte de los nutrientes ingeridos en la dieta no son asimilados totalmente por los organismos vivos en sus procesos metabólicos, por lo que terminan siendo parte de las aguas residuales que llegan a las EDAR, y por tanto demandan tratamiento.

Elevadas concentraciones de macronutrientes, principalmente nitrógeno, fósforo e incluso potasio se han detectado en los lodos de EDAR como consecuencia de procesos físico-químicos y biológicos utilizados en la línea de agua para

reducir su contenido. De hecho, Metcalf y Eddy (2014) describieron como frecuentes concentraciones en lodos de 33 y 23 g/kg de nitrógeno y fósforo, respectivamente. Por su parte, el contenido en potasio de los fangos es notablemente inferior al de los otros dos macro-nutrientes, oscilando entre 1 y 4 g/kg.

La presencia de nitrógeno y fósforo en los lodos es especialmente preocupante por los problemas de eutrofización que el lixiviado de estos dos contaminantes puede causar en las masas de agua receptoras. El proceso de eutrofización causa significativos trastornos en el equilibrio de ecosistemas acuáticos así como en la propia calidad del agua (de-Bashan y Bashan, 2004).

### 3.4. Micro-plásticos

Los micro-plásticos son contaminantes sólidos que engloban un grupo heterogéneo de partículas constituido por diferentes polímeros sintéticos, de tamaños entre 5 y 0,3 mm, y diferentes formas (e.i., fibras, escamas y fragmentos) (Magnusson y Norén 2014). Las partículas de micro-plásticos provienen de diferentes fuentes: procesos/productos o a partir del deterioro/abrasión de materiales plásticos o pinturas (Carr et al., 2016). Como consecuencia del incremento en las últimas décadas en el uso de plásticos y de los procesos físico-químicos que tienen lugar en las EDAR, diferentes micro-plásticos se han detectado en los lodos de depuradora en concentraciones entre 1.041 y 24.129 unidades/kg (Duis y Coors, 2016) (Figura 3).

La presencia de estos contaminantes supone una preocupación debido a los potenciales efectos adversos que pueden tener sobre el ser humano y el medio ambiente en general. El tamaño de

los micro-plásticos produce efectos físicos sobre los organismos que los ingieren. Además, debido a su composición pueden liberar compuestos químicos tóxicos y persistentes (e.g., monómeros o aditivos plásticos (Rochman, 2013)), que podrían eventualmente entrar en la cadena trófica al ser ingeridos. Indirectamente, debido a su elevado ratio área-volumen y su composición química, las partículas de micro-plásticos pueden actuar como vectores de contaminación, adsorbiendo y acumulando metales, compuestos persistentes, bioacumulables y tóxicos (e.g., PCBs o PAHs) o patógenos (Wagner et al., 2014).

### 3.5. Nano-partículas

Las nano-partículas son partículas microscópicas con al menos una dimensión menor que 100 nm. El rápido crecimiento del uso de nano-partículas artificiales en múltiples aplicaciones tanto industriales como domésticas está ocasionando su presencia en las aguas residuales (Lazareva y Keller, 2014). Una vez en la EDAR, la mayoría de las nano-partículas son retenidas en los lodos (Limbach et al., 2009; Kiser et al., 2010; Westerhoff et al., 2011). Keller y Lazareva (2014) llevaron a cabo un estudio predictivo de la concentración de nano-materiales presentes en los lodos de depuradora, en el que se mostró que el óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), ampliamente utilizando en la industria cosmética, podría llegar a alcanzar el orden g/kg (Figura 3).

Las nano-partículas se están convirtiendo en contaminantes de creciente inquietud debido a su potencial efecto adverso sobre el medioambiente y el ser humano (Brar et al., 2007). Una de las principales causas del creciente interés en estudiar su efecto está relacionada con la alta relación superficie-volumen, hecho que puede hacer que las partículas sean muy reactivas. Como consecuencia de su tamaño nano-métrico también son capaces de atravesar mem-



**VOGELSANG**  
ENGINEERED TO WORK



Ingeniería de calidad para su planta de tratamiento de aguas

## Vaciado eficiente y automático de estanques de tormentas y digestores

No más problemas con fibras, cuerpos extraños y fangos densos

**Sistema compacto de bomba lobular y RotaCut® de Vogelsang:**

- separa cuerpos extraños
- corta fibras y evita atascos en la bomba
- funcionamiento autónomo gracias al sistema de control

**La solución perfecta para su planta de tratamiento de aguas residuales**

**Contacto: Vogelsang S.L. • [vogelsang.es](http://vogelsang.es)  
[info@vogelsang.es](mailto:info@vogelsang.es) • +34 977 60 67 33**

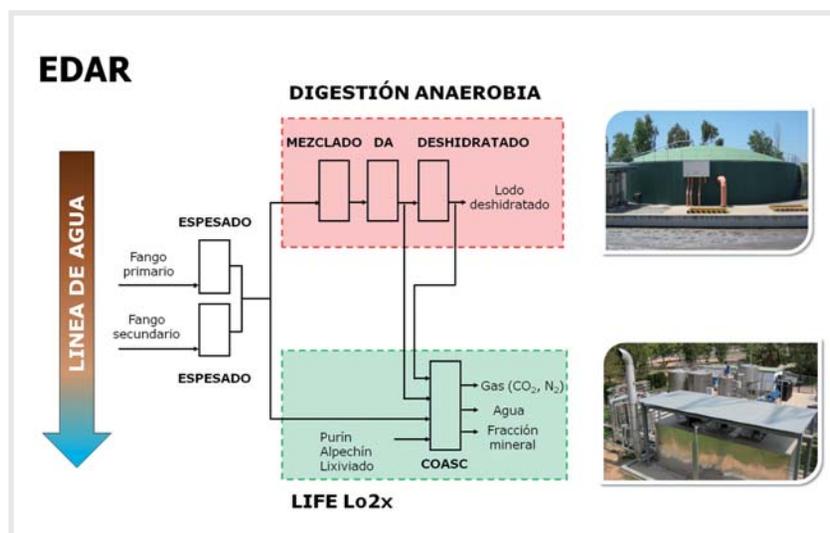


Figura 4. Representación gráfica del modelo actual de tratamiento de lodos de EDAR mediante Digestión Anaerobia (DA) y el propuesto en el proyecto LIFE Lo2x mediante co-oxidación en agua supercrítica (COASC).

branas celulares en organismos. Dentro de las células, las nano-partículas son capaces de generar respuestas tóxicas (Oberdörster et al., 2005). Indirectamente, los nano-materiales sintetizados a partir de metales u óxidos metálicos pueden disolverse progresivamente, dando lugar a un incremento de la concentración del catión altamente tóxico como Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> o Ag<sup>+</sup> (Garner y Keller, 2014). Moore (2006) destacó que las nano-partículas puedan vehiculizar otros contaminantes como consecuencia de sus propiedades superficiales singulares relacionadas con potencial de carga y alta relación área-volumen.

### 3.6. Patógenos

La biota representa el 40% en masa de los lodos de depuradora (Elías-Castells, 2012). Entre toda ella se encuentran aquellos organismos que causan enfermedades, los denominados patógenos, los cuales provienen en su mayoría de la población humana, los animales de compañía y el ganado. La densidad de estos patógenos está fuertemente influenciada por numerosos factores, como el tipo de procesos aplicados en la EDAR, la salud de la pobla-

ción, condiciones meteorológicas, presencia de hospitales y fábricas de procesamiento de carnes (Strauch, 1991). Los principales tipos de patógenos presentes en los lodos de EDAR se presentan en la Figura 3.

El uso excesivo y/o mal uso de los antibióticos, así como su metabolización incompleta, han conducido a la aparición y rápida propagación de bacterias y genes resistentes a los antibióticos (i.e., antibiotic-resistant bacteria (ARB) y antibiotic resistance genes (ARGs)) (Kümmerer, 2009; Verlicchi et al., 2013). ARB y ARGs se han detectado en lodos de depuradora, por lo que éstos representan una importante fuente de este tipo de contaminación biológica (Rodríguez-Mozaz et al., 2015). De hecho, Munir et al. (2011) mostraron que la aplicación en suelos de lodos procedentes de EDAR parece ser la principal fuente de entrada de ARGs y ARB en el medio natural.

## 4. OXIDACIÓN EN AGUA SUPERCRÍTICA.

La oxidación en agua supercrítica (OASC) es un proceso que transcurre llevando un residuo acuoso a condiciones de alta presión y temperatura, haciéndola

reaccionar con un agente oxidante, por ejemplo oxígeno puro o aire comprimido. La clave de este proceso se encuentra en las particulares propiedades del agua supercrítica, que se consiguen cuando se opera en condiciones de presión y temperatura superiores al punto crítico del agua: 221 bar y 374°C, respectivamente. En estas condiciones el agua se comporta como un disolvente no polar debido a las propiedades físico-químicas de alta difusividad, baja densidad y viscosidad, entre otras. Las propiedades del agua supercrítica hacen que la reacción de oxidación pueda producirse en una única fase homogénea, evitándose limitaciones en la transferencia de materia, y reaccionando así de forma rápida y prácticamente completa (Cocero et al., 2002). De esta forma los compuestos orgánicos reaccionan rápidamente (0,1 a 100 s) y son eficientemente oxidados (cerca del 100%), principalmente hasta dióxido de carbono y agua (Svanström et al., 2004; Marrone y Hong, 2009; Portela et al., 2010). Además, el proceso tiene una gran sostenibilidad energética puesto que la reacción de oxidación, altamente exotérmica, genera un calor que se puede utilizar para calentar la corriente a tratar de modo que se alcance las condiciones de reacción.

Estas características hacen atractivo el proceso de oxidación supercrítica para el tratamiento de residuos orgánicos, en particular aquellos acuosos y con elevado contenido de materia orgánica entre los que se encuentran los lodos de EDAR. La aplicación de esta tecnología para la co-oxidación supercrítica (COASC) de lodos de EDAR y otros residuos orgánicos y difícilmente biodegradables está siendo evaluada en el marco del proyecto LIFE Lo2x.

### 4.1. Proyecto LIFE LO2X

El proyecto LIFE Lo2x pretende demostrar los beneficios ambientales y socio-económicos de la aplicación de la

COASC para el tratamiento de lodos de depuradora conjuntamente con otros residuos presentes en el entorno de las EDAR, como pueden ser estiércol y residuos agroalimentarios de elevada carga orgánica, pesticidas, lixiviados de vertederos, entre otros. La Figura 4 muestra un esquema comparativo entre el modelo convencional de tratamiento de los lodos de EDAR mediante digestión anaerobia y el modelo de tratamiento propuesto en el marco del proyecto LIFE Lo2x. Tal y como se puede observar en este último, la COASC permitirá tratar lodos de baja calidad no aptos para fines agrícolas y otros sustratos difícilmente biodegradables. Este esquema de tratamiento puede ser implementado en EDAR existentes y de nueva construcción.

Dentro de los objetivos del proyecto se encuentran el diseño y la construcción de un prototipo a escala demostrativa para el tratamiento de hasta 1 tonelada de materia fresca al día (Figura 5). Este prototipo se instaló en la EDAR de Paterna (Valencia), y actualmente se encuentra operativo en fase experimental. Dentro de los objetivos de esta fase del proyecto se encuentran el determinar las condiciones de operación del proceso que permitan obtener la máxima oxidación de la materia orgánica con su consiguiente valorización mediante su aprovechamiento en forma de energía, así como la recuperación de otros recursos disponibles en el efluente tras el proceso COASC.

Mediante la aplicación de esta tecnología está previsto conseguir la mineralización total de la materia orgánica. Los resultados experimentales preliminares obtenidos en el marco del proyecto LIFE Lo2x indican rendimientos de eliminación de materia orgánica desde el 97%

hasta >99% tras su aplicación sobre lodos de la EDAR de Paterna. Similares resultados de eliminación de carga orgánica se han obtenido en la co-oxidación de lodos de esta depuradora con residuos procedentes del sector agroalimentario: estiércol vacuno y porcino (5-30 g DQO/L); alpechines procedentes de la industria de la aceituna (90-140 g DQO/L); así como caldos de drencher de la industria citrícola con elevadas concentraciones de pesticidas, principalmente imazalil (0,4-2 g/L). Está prevista su aplicación sobre lixiviados de vertederos y otros residuos complejos de difícil gestión.

La Figura 6 muestra la apariencia del lodo de EDAR antes y después del tratamiento de oxidación en agua supercrítica; además se compara, a efectos visuales, la apariencia del efluente del proceso de OASC con una muestra de agua potable descalcificada. Tal y como se puede observar en esta figura, del efluente del proceso se pueden obtener fracciones soluble y sólida fácilmente

separables, por ejemplo mediante un proceso de decantación.

Como recursos aprovechables tras el proceso de OASC se encuentran el nitrógeno y el fósforo. En la fracción soluble se concentra el nitrógeno en su forma amoniacal, mientras que en la fracción sólida se encuentra el fósforo. El nitrógeno puede llegar a ser recuperado mediante procesos de desorción de amoníaco, favorecido por la elevada temperatura de esta corriente y otras corrientes residuales aprovechables energéticamente en el propio proceso; intercambio iónico; e incluso cristalización y precipitación de estruvita. En el caso del fósforo, esta tecnología resulta especialmente atractiva dado que este elemento se encuentra en la fracción sólida en forma de óxido de fósforo ( $P_2O_5$ ), y por tanto puede recuperarse para ser valorizado como fertilizante. Finalmente, el calor producido por la reacción exotérmica de oxidación y, en casos particulares, de otros aportes de energía añadidos al proceso puede ser utilizado para pre-



Figura 5. Planta proyecto LIFE Lo2x de co-oxidación en agua supercrítica situada en la EDAR de Paterna (Valencia)



Figura 6. Muestras del experimento llevado en la planta LIFE Lo2x (EDAR de Paterna). Izquierda: Lodo EDAR a tratar; Centro: Efluente; y Derecha: Agua potable descalcificada

lentar el lodo a tratar o para llevar a cabo, a partir de la generación de vapor de agua, una cogeneración.

LIFE Lo2x es un proyecto co-financiado al 50% por la Comisión Europea en el marco del programa LIFE+ (ref. LIFE12 ENV/ES/000477), con presupuesto total de 2.948.698 €. AINIA, como centro tecnológico avalado por sus más de 25 años de experiencia en fluidos supercríticos y tecnologías ambientales, es el coordinador del consorcio encargado de su desarrollo. Dicho consorcio sigue un modelo colaborativo internacional de trabajo entre España e Irlanda. Entre las organizaciones que lo constituyen encontramos a IMECAL, especialista en la construcción de maquinaria, equipamientos e instalaciones metal-mecánicas; IVEM, experta en explotación y mantenimiento de EDAR; URBASER, especialista en la prestación de servicios medioambientales; y SCFI, compañía irlandesa de alta tecnología especialista en la oxidación en agua supercrítica.

#### AGRADECIMIENTOS:

Los autores agradecen a la Comisión Europea la co-financiación del

proyecto LIFE Lo2x (ref. LIFE 12 ENV/ES/000477) así como a la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas (EPSAR) de la Comunidad Valenciana su colaboración en el proyecto.

#### REFERENCIAS:

- Brar et al., 2010. *Waste Manage* 30, 504–520.
- Carrington, 2001. Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction – Final Report. Study Contract No B4-3040/2001/322179/MAR/A2 for the EC.
- Carr et al., 2016. *Water Res* 91, 174–182.
- Clarke and Smith, 2011. *Environ Intern* 37, 226–247.
- da Silva et al., 2007. Main contaminants in sludge. En: Andreoli et al. (Eds) *Sludge Treatment and Disposal*. IWA Publishing, London.
- de-Bashan y Bashan, 2004. *Water Res* 38, 4222–4246.
- Duis y Coors, 2016. *Environ Sci Eur* 28, 2.
- Elias-Castells, 2012. *Vías de Tratamiento y Valorización de Fangos de Depuradora: Reciclaje de Residuos Industriales*. Diaz de Santos, Madrid.
- Eurostat, 2016. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater.
- Fytli y Zabanoitou, 2008. *Renew Sust Energy Rev* 12, 116–140.
- Garner y Keller, 2014. *J Nanopart Res* 16, 2503.
- García et al., 2016. *Revista ambient@* 115, 2016-06-01.

Giesy y Kannan, 2001. *Environ Sci Technol* 35, 1339–1342.

Keller y Lazareva, 2014. *Environ Sci Tech Lett* 1, 65–70.

Kiser et al., 2009. *Environ Sci Technol* 43, 6757–6763.

Kümmerer, 2009. *Chemosphere* 75, 435–441.

Lazareva y Keller, 2014. *Sust Chem Eng* 2, 1656–1665.

Limbach et al., 2008. *Environ Sci Technol* 42, 5828–5833.

Lindim et al., 2017. *Water Res* 103, 124–132.

Magnussen y Norén, 2014. Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant. IVL Swedish Environmental, Estocolmo.

Marrone y Hong, 2009. *J Supercrit Fluids* 51, 83–103.

Martin y Griswold, 2009. Human health effects of heavy metals. *Environmental Science and Technology Briefs for Citizens*, Center for Hazardous Substance Research.

Metcalf y Eddy, 2014. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 15th Ed. McGraw Hill, New York.

Moore, 2006. *Environ Intern* 32, 967–976.

Munir et al., 2011. *Water Res* 45, 681–693.

Oberdörster et al., 2005. *Environ Health Perspect* 113, 823–839.

Olsen et al., 2003. *Environ Health Perspect* 111, 1892–901.

Portela et al., 2010. *Ges Res Ind June*, 1–3.

Rochman, 2013. *Environ Sci Technol* 47, 2439–2440.

Rodríguez-Mozaz et al., 2015. *Water Res* 69, 234–242.

Rizzo et al., 2013. *Sci Total Environ* 447, 345–360.

Schwartz et al., 2003. *FEMS Microbiol Ecol* 43, 325–335.

Stockholm Convention, 2015. *Stockholm Convention*. Protecting human health and the environment from persistent organic pollutants.

Strauch, 1991. *Stud Environ Sci* 42, 121–136.

Svanström et al., 2004. *Resour Conserv Recycl* 41, 321–338.

Verlicchi et al., 2013. En: Petrovi et al. (Eds) *Analysis, Removal, Effects and Risks of Pharmaceuticals in Water Cycle*. 2nd Ed. Elsevier BV, Amsterdam.

Wagner et al., 2014. *Environ Sci Eur* 26, 12.

Westerhoff et al., 2011. *J Environ Monit* 13, 1195–1203.

Cuando se trata de equipos eficientes para el sector del AGUA  
Nosotros lo tenemos, ¡SEGURO!

Desde los motores síncronos o los de inducción, la electrónica para arranque y variación de velocidad, y los cuadros de fuerza y control, WEG puede suministrar cualquier equipo eléctrico que pueda necesitar, ¡SEGURO!

[www.weg.net/es](http://www.weg.net/es)

