

Tecnologías de depuración y reutilización: nuevos enfoques

Technologies of Wastewater Treatment and Reuse: New Approaches

Arturo Trapote-Jaume

Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante. Alicante, España. atj@ua.es

Resumen — En este artículo se revisan las principales tecnologías actuales de depuración de aguas residuales urbanas y de regeneración de aguas depuradas para su reutilización, así como una aproximación a las tendencias en estos campos. La tipología de tratamientos y tecnologías aplicables abarca una amplia gama de combinaciones de procesos aerobios y anaerobios, de biomasa fija y suspendida, sistemas intensivos y extensivos, centralizados y descentralizados, etc. Además de optimizar la eficiencia de los procesos de tratamiento, las tendencias en I+D+i se están orientando, en buena medida, a la eliminación de los denominados contaminantes emergentes y al desarrollo de tecnologías de regeneración para la reutilización, entre las que cabe destacar los procesos de membrana. En todo caso, los futuros desarrollos tecnológicos deberían priorizar el uso eficiente y sostenible de la energía y de los recursos naturales, en general, y del agua, en particular.

Abstract — *This paper examines the principal current technologies of urban wastewater treatment and reclamation for reuse, and delineates the trends in these fields. The type of treatments and technologies cover a wide range of combinations of aerobic and anaerobic processes, fixed and suspended biomass, intensive and extensive systems, centralized and decentralized systems, etc. In addition to optimizing the efficiency of treatment processes, trends in I+D+i are largely focused on the elimination of the so-called emerging contaminants and the development of technologies of reclamation for reuse, which include membrane processes. In any case, future technological developments should prioritize the efficient and sustainable use of energy and natural resources in general and of water in particular.*

Palabras clave: agua, tecnologías de depuración, reutilización

Keywords: water, wastewater treatment, reused water

Información Artículo: Recibido: 19 marzo 2016

Revisado: 12 septiembre 2016

Aceptado: 25 octubre 2016

© Universidad de Jaén / Seminario Permanente Agua, Territorio y Medio Ambiente (CSIC)

INTRODUCCIÓN

La preservación del medio ambiente, en especial del hídrico, es hoy en día no solo objeto de una fuerte demanda social sino un mandato legal y la base de un desarrollo sostenible. La degradación del medio ambiente hídrico, a causa de la contaminación urbana, industrial y agrícola, supone un factor limitante del desarrollo económico, pues afecta de forma negativa a sus usos potenciales, desde el abastecimiento público hasta cualquier actividad recreativa, llegando incluso a afectar y modificar los ecosistemas.

El art. 93 del Texto Refundido de la Ley de Aguas define contaminación como “la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores, con la salud humana, o con los ecosistemas acuáticos o terrestres directamente asociados a los acuáticos; causen daños a los bienes; y deterioren o dificulten el disfrute y los usos del medio ambiente”.

Consecuentemente, un curso fluvial se considera contaminado cuando la composición o el estado de sus aguas ha sido directa o indirectamente modificado por la actividad antrópica, en una medida tal que se reducen las posibilidades de utilización para todas o algunas de las finalidades a que podía destinarse en su estado natural.

Una de las principales causas de la contaminación de los medios hídricos —junto con los vertidos industriales o de origen agropecuario y la contaminación difusa procedente de escorrentías, aguas de tormentas, transporte por vía atmosférica, etc.— son las aguas residuales urbanas no tratadas o solo parcialmente, esto es, las aguas recogidas en las aglomeraciones urbanas procedentes de los vertidos de la actividad humana doméstica (aguas residuales domésticas) o la mezcla de estas con las procedentes de actividades comerciales, industriales y agrarias integradas en el núcleo urbano, así como las aguas de lluvia.

En la tabla 1 se recoge la composición típica de un agua residual urbana, con tres grados posibles de contaminación (fuerte, media y débil). Generalmente, concentraciones elevadas de los parámetros corresponden a consumos de agua bajos y viceversa.

Es importante destacar que la escorrentía que genera la lluvia sobre las superficies urbanas (escorrentía urbana) se considera también agua residual, por cuanto moviliza las cargas contaminantes acumuladas en dichas superficies durante los periodos de tiempo seco (periodos entre precipitaciones), que son arrastradas y vertidas en los cauces fluviales, pudiendo afectar gravemente a los ecosistemas de los medios receptores. En la tabla 2 se recoge la composición típica de un agua de escorrentía urbana, referida a los parámetros más significativos, y sus respectivos valores.

Consecuentemente, y en contra de lo que hasta hace pocos años venía siendo habitual, hoy en día ya no se considera una práctica sostenible el vertido directo a los medios hídricos de las aguas de escorrentía, sobre todo a raíz de la Directiva 2000/60/CE, conocida como Directiva Marco del Agua (DMA). La DMA establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas y constituye el referente de las actuaciones en política de

Tabla 1. Composición típica de un agua residual urbana según el nivel de concentración de los parámetros contaminantes

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN (mg/l)		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos Totales (ST)	1.200	700	350
Fijos	600	350	175
Volátiles	600	350	175
Sólidos en Suspensión (SS)	350	200	100
(SS sedimentables+SS coloidales) Fijos (SSF)	75	50	30
Volátiles (SSV)	275	150	70
SS sedimentables (SSs)	20	10	5
SS coloidales (SSc)	330	190	95
Sólidos Disueltos (SD)	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO ₅)	400	220	110
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	1.000	500	250
Carbono Orgánico Total (COT)	290	160	80
Nitrógeno total (NT)	85	40	20
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)	85	40	20
Nitrógeno Orgánico (N-NO)	35	15	8
Nitrógeno Amónico (N-NH ₃)	50	25	12
Nitritos (NO ₂ ⁻)	0	0	0
Nitratos (NO ₃ ⁻)	0	0	0
Fósforo total (PT)	15	8	4
Fósforo Orgánico (PO)	5	3	1
Fósforo Inorgánico (PI)	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO ₃)	200	100	50
Grasas	150	100	50

Fuente: Metcalf & Eddy, 2000.

Tabla 2. Parámetros de contaminación de la escorrentía urbana

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN (mg/l)	
	Rango	Valor medio
DBO ₅	9-38	20
DQO	60-200	105
SS	100-450	195
N total	1,2-6,0	2,7
P total	0,1-1,7	0,5
Coliformes Fecales, CF (N.º/100 ml)	10 ⁴ -10 ⁶	10 ⁵

Fuente: Temprado et al., 1996.

aguas en la Unión Europea. Esta directiva incluye disposiciones para la protección de las aguas continentales (superficiales y subterráneas), las aguas de transición y las aguas costeras.

Todos estos motivos hacen imprescindible depurar las aguas residuales previamente a su vertido en los medios receptores.

Se entiende por depuración, o tratamiento de las aguas residuales, el “conjunto de operaciones encaminadas a eliminar o reducir los agentes contaminantes presentes en el agua residual”. En el equilibrio propio de la naturaleza, la depuración se

realiza en los cursos de agua, mediante los mecanismos de autodepuración. Sin embargo, en la actualidad, para mantener el ciclo natural y posibilitar la recuperación de la capacidad de autodepuración de los ríos, se hace necesario emplear sistemas de tratamiento de las aguas residuales.

El tratamiento de las aguas residuales en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) o, simplemente, depuradora, consiste en acelerar o intensificar los procesos de autodepuración de los medios receptores, forzándolos en un tiempo y espacio mínimos, con la finalidad de producir un efluente que pueda ser descargado sin causar serios impactos al medio ambiente.

Una EDAR está constituida por un conjunto de infraestructuras, mecanismos e instalaciones que llevan a cabo el tratamiento de las aguas residuales mediante la aplicación de operaciones de tipo físico, químico y biológico que permiten adecuar su calidad a la normativa de vertidos, de manera que los efluentes depurados que se vierten no alteren sustancialmente la calidad de las masas de aguas receptoras (imagen 1).

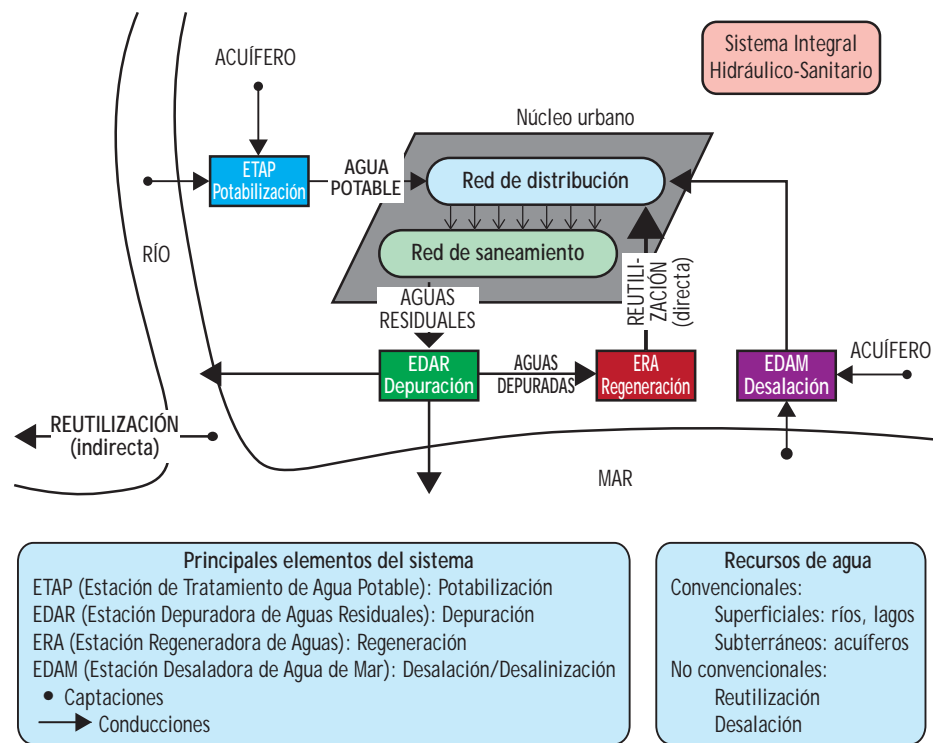
Avanzando en el nivel de tratamiento de las aguas residuales, los efluentes depurados pueden regenerarse, sometiéndose a tratamientos complementarios para adecuar su calidad a la normativa de reutilización. Estos tratamientos se llevan a cabo en Estaciones Regeneradoras de Aguas (ERA), esto es, un conjunto de instalaciones donde las aguas residuales depuradas se someten a

Imagen 1. Vista aérea de la EDAR "Rincón de León" (Alicante)



Fuente: Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana (EPSAR).

Figura 1. Esquema del Sistema Integral Hidráulico-Sanitario



Fuente: Elaboración propia.

los procesos de tratamiento adicional que puedan ser necesarios para adecuar su calidad al uso previsto (reutilización).

Las aguas residuales generadas en los núcleos urbanos han sido tradicionalmente reutilizadas en puntos situados aguas abajo para otras demandas de agua, mediante el vertido de estos efluentes a los cursos fluviales y su dilución en el caudal circulante. Esta es la denominada reutilización indirecta del agua. La reutilización directa o planificada del agua tiene un origen más reciente y supone el aprovechamiento directo de efluentes, con un determinado nivel de tratamiento previo, sin la existencia de un vertido o una dilución en un curso de agua.

Tanto la depuración como la reutilización —junto con la potabilización del agua y, en su caso, la desalación— son componentes intrínsecos del ciclo del agua. La figura 1 muestra el esquema del ciclo hídrico urbano, que podríamos denominar "Sistema Integral Hidráulico-Sanitario".

El esquema de la figura 1 representa de forma implícita una gestión conjunta de los recursos hídricos convencionales (aguas superficiales y subterráneas) y no convencionales (reutilización y desalación), de manera que, idealmente, el balance hídrico quede compensado dentro de una determinada unidad hidrológica.

En relación con todo lo anterior, el Gobierno acaba de concluir el segundo ciclo de la planificación hidrológica (2016-2021) —el primer ciclo abarcaba el sexenio 2009-2015— con la aprobación, a propuesta del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), de los planes hidrológicos de cuenca de las doce demarcaciones hidrográficas competencia del Estado y de cuatro planes hidrológicos de competencia autonómica,

correspondientes estos últimos a demarcaciones hidrográficas intracomunitarias.

La aprobación de los planes hidrológicos del segundo ciclo representa un impulso a una política del agua destinada a alcanzar un equilibrio entre la consecución de los objetivos ambientales y los objetivos de atención a las demandas. Asimismo, se da cumplimiento a la DMA y se recuperan los retrasos acumulados en materia de agua en los últimos años, con lo que nuestro país puede iniciar el tercer ciclo de planificación hidrológica junto a los demás miembros de la Unión Europea.

En los doce planes de competencia estatal se incluyen más de diez mil medidas a ejecutar, con una inversión prevista de 15.000 M€, a los que hay que añadir otros 2.500 M€ para los cuatro planes intracomunitarios, lo que hace una suma total de 17.500 M€. De este montante, aproximadamente el 65% corresponde a medidas destinadas a cumplir los objetivos ambientales y de protección frente a inundaciones establecidos en la normativa europea, y el 35% restante a las medidas previstas para la satisfacción de las demandas y otros usos sectoriales relacionados con el agua. En relación con los objetivos ambientales, se incrementan los caudales ecológicos y se mejora la calidad de las aguas mediante actuaciones de saneamiento y depuración.

MARCO NORMATIVO DE LA DEPURACIÓN Y DE LA REUTILIZACIÓN

El referente normativo de la depuración de las aguas residuales es la Directiva 91/271/CEE (D271) —parcialmente modificada por la Directiva 98/15/CE—, que contiene estipulaciones relativas a la recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas y el tratamiento y vertido de las aguas residuales procedentes de determinados sectores industriales. La D271 establece unos requisitos mínimos para el vertido de dichas aguas y unos diferentes plazos para cumplirlos, según el tamaño de la población en habitantes equivalentes (un habitante equivalente, h-e, es la unidad de contaminación que representa la carga orgánica biodegradable con una Demanda Bioquímica de Oxígeno de cinco días (DBO₅) de 60 gramos de oxígeno por día), que el vertido afecte a aguas continentales o marinas, y que vierta a zonas sensibles o menos sensibles (tablas 3 y 4).

Los parámetros de control de los efluentes depurados se refieren a la materia orgánica —medida como DBO₅ o como DQO (Demanda Química de Oxígeno)—, a los sólidos en suspensión (SS) y, en el caso de vertidos a zonas sensibles eutróficas, a los princi-

Tabla 3. Requisitos exigidos a los vertidos de aguas residuales urbanas depuradas (Directiva 91/271/CEE)

Parámetro	Concentración (media diaria máx.)	Porcentaje mínimo de reducción (%)
DBO ₅ (a 20 °C sin nitrificación)	25 mg/l O ₂	70-90
DQO	125 mg/l O ₂	75
SS totales	35 mg/l (>10.000 h-e) 60 mg/l (2.000-10.000 h-e)	90 (>10.000 h-e) 70 (2.000-10.000 h-e)

Fuente: Directiva 91/271/CEE.

Tabla 4. Requisitos exigidos a los vertidos de aguas residuales urbanas depuradas para zonas sensibles (Directiva 91/271/CEE)

Parámetro	Concentración (media diaria máxima)	Porcentaje mínimo de reducción (%)
P total	2 mg/l (10.000-100.000 h-e) 1 mg/l (>100.000 h-e)	80
N total	15 mg/l (10.000-100.000 h-e) 10 mg/l (>100.000 h-e)	70-80

Fuente: Directiva 91/271/CEE.

pales nutrientes potencialmente eutrofizantes, esto es, el nitrógeno (N) y el fósforo (P).

En cuanto a la reutilización, la norma de referencia en España es el real decreto 1620/2007 (RD de reutilización), que establece los mecanismos legales que permiten disponer del agua residual depurada como recurso alternativo, impulsando, a su vez, planes de reutilización y de uso más eficiente del recurso hídrico. La norma determina los requisitos necesarios para llevar a cabo la actividad de utilización de aguas regeneradas (aguas residuales depuradas que, en su caso, han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan), los procedimientos para obtener la concesión exigida en la ley, incluyendo disposiciones relativas a los usos admitidos y los criterios de calidad mínimos obligatorios exigibles para la utilización de las aguas regeneradas según los usos.

De acuerdo con el RD de reutilización, el agua regenerada podrá utilizarse para los siguientes usos:

- 1) Urbanos:
 - Residencial (riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios).
 - Servicios (riego de zonas verdes urbanas -parques, campos deportivos y similares-, baldeo de calles, sistemas contra incendios y lavado industrial de vehículos).
- 2) Agrícolas:
 - Riego de cultivos de consumo en fresco en contacto directo con el agua regenerada.
 - Riego de cultivos que no se consumen en fresco (con tratamiento industrial posterior), riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne. Acuicultura.
 - Riegos de cultivos leñosos, flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo con el agua regenerada, riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes, cereales y semillas oleaginosas.
- 3) Industriales:
 - Aguas de proceso y limpieza. Otros usos industriales.
 - Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.
- 4) Recreativos:
 - Riego de campos de golf.
 - Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales sin acceso público.

- 5) Ambientales:
 Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.
 Recarga de acuíferos por inyección directa.
 Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público. Silvicultura.
 Otros usos (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares).

El real decreto de reutilización establece seis tipos de calidad del agua (A, B, C, D, E y F) según sus características bacteriológicas, puesto que el condicionante de los tratamientos de regeneración es el nivel de desinfección. En la tabla 5 se recogen estos tipos de calidad y los valores paramétricos máximos admisibles correspondientes.

Al mismo tiempo, el real decreto de reutilización prohíbe expresamente la reutilización de las aguas depuradas para los siguientes usos:

- a) Para el consumo humano, salvo situaciones de declaración de catástrofe en las que la autoridad sanitaria especificará los niveles de calidad exigidos a dichas aguas y los usos.
- b) Para los usos propios de la industria alimentaria, tal y como se determina en el artículo 2.1 b) del real decreto 140/2003, de 7 de febrero por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, salvo lo dispuesto en el anexo I.A.3.calidad 3.1c para el uso de aguas de proceso y limpieza en la industria alimentaria.

- c) Para uso en instalaciones hospitalarias y otros usos similares.
- d) Para el cultivo de moluscos filtradores en acuicultura.
- e) Para el uso recreativo como agua de baño.
- f) Para el uso en torres de refrigeración y condensadores evaporativos, excepto lo previsto para uso industrial en el anexo I.A.3.calidad 3.2.
- g) Para el uso en fuentes y láminas ornamentales en espacios públicos o interiores de edificios públicos.
- h) Para cualquier otro uso que la autoridad sanitaria o ambiental considere un riesgo para la salud de las personas o un perjuicio para el medio ambiente, cualquiera que sea el momento en el que se aprecie dicho riesgo o perjuicio.

TECNOLOGÍAS DE DEPURACIÓN Y DE REGENERACIÓN

El tratamiento de las aguas residuales en una EDAR y, en su caso, de las aguas depuradas en una ERA para su regeneración y posterior reutilización, se organiza en líneas, formadas por una serie de fases o etapas sucesivas. Cada una de estas fases se compone de diferentes procesos y de tecnologías específicas que se seleccionan en función de las características de los afluentes, del grado o nivel de tratamiento deseado y de la calidad requerida a los efluentes, teniendo en cuenta las circunstancias propias del emplazamiento de la EDAR-ERA (demográficas, geográficas, urbanísticas, usos del agua, etc.)

La figura 2 muestra el diagrama de flujo de las fases del tratamiento que componen las líneas de agua y de fango (líneas habituales de proceso) de una EDAR convencional (biológica) y de una ERA. Además, en una EDAR con digestión anaerobia de fangos puede existir una tercera línea, denominada línea de gas. Mediante el proceso de digestión anaerobia se genera biogás, formado mayoritariamente por metano (70%), con el que se produce electricidad por cogeneración, para cubrir, al menos en parte, las necesidades energéticas de la planta depuradora.

A continuación, se describen sucintamente los objetivos, las operaciones y las tecnologías utilizadas en cada una de estas fases.

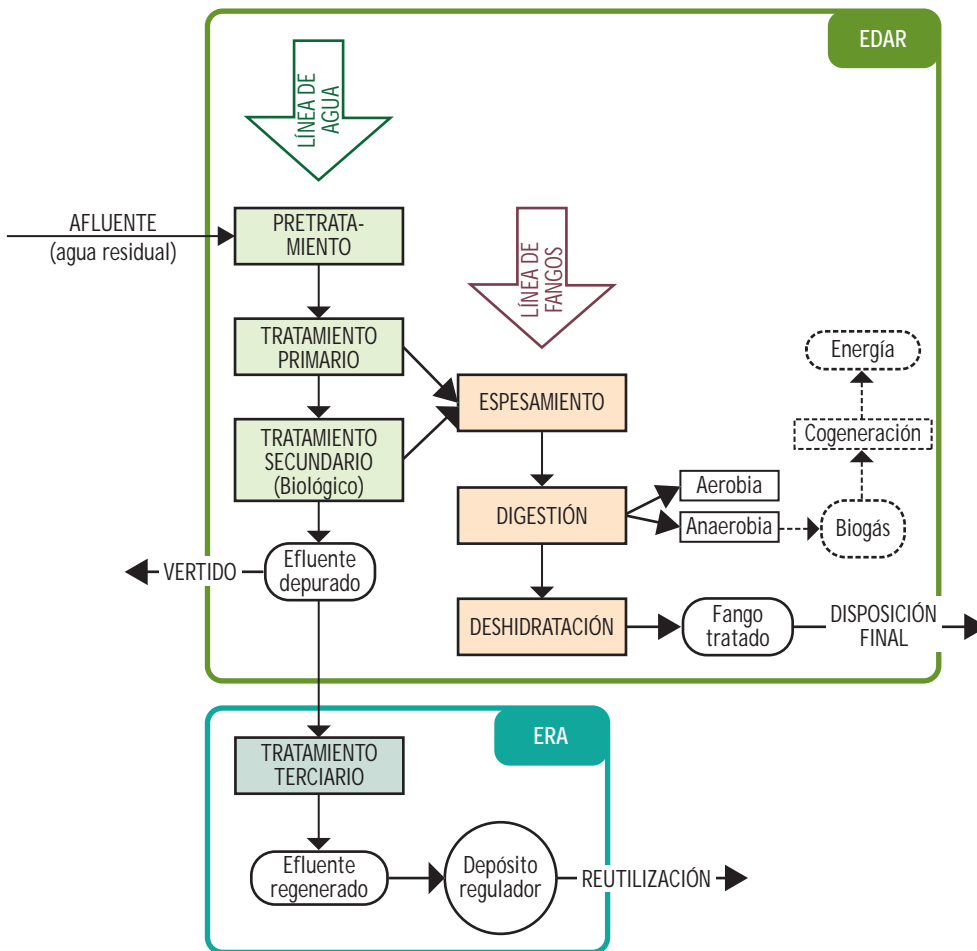
El pretratamiento tiene como objetivo separar del agua residual las materias groseras, que por su naturaleza o tamaño podrían causar problemas de operación y/o

Tabla 5. Tipos de calidad del efluente regenerado según los límites bacteriológicos del real decreto de reutilización

Usos	Tipo de calidad	<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	Nematodos intestinales	<i>Legionella spp.</i> (UFC/100 ml)
Torres de refrigeración y condensadores evaporativos	A	Ausencia	Ausencia	Ausencia
Residenciales			< 1 huevo/10 l	< 100
Recarga de acuíferos por inyección directa			No se fija límite	No se fija límite
Servicios urbanos	B	< 100-200	< 1 huevo/10 l	< 100
Riego agrícola sin restricciones				
Riego de campos de golf	C	< 1.000	< 1 huevo/10 l	No se fija límite
Riego de cultivos que no se consumen en fresco (con tratamiento industrial posterior), riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne. Acuicultura				
Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno			No se fija límite	No se fija límite
Riegos de cultivos leñosos, viveros y cultivos industriales	D	< 10.000	< 1 huevo/10 l	< 100
Masas de agua sin acceso público				
Riego de bosques y zonas verdes no accesibles al público	E	No se fija límite	No se fija límite	No se fija límite
Ambientales: mantenimiento humedales, caudales mínimos	F	La calidad se estudiará caso por caso		

Fuente: Guía para la Aplicación del real decreto 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas.

Figura 2. Diagrama de flujo de las fases de tratamiento de una EDAR-ERA



Fuente: elaboración propia.

mantenimiento en las instalaciones (maquinaria, conducciones, etc.) y unidades de depuración posteriores. Tales son los casos de los grandes sólidos, materias flotantes de gran tamaño, gravas, arenas y sólidos de pequeño tamaño, aceites, grasas y flotantes de pequeño tamaño. Las operaciones y técnicas que comprende el pretratamiento son: el desbaste —mediante rejillas y/o tamices—, el desarenado y el desengrasado.

El tratamiento primario tiene como objetivo separar del agua residual los SS sedimentables por gravedad. La operación más frecuente es la decantación o sedimentación primaria, que se realiza en decantadores primarios.

Finalmente, en el tratamiento secundario se elimina la mayor parte de la materia orgánica (disuelta y coloidal) y de los SS no sedimentables. En la depuración de las aguas residuales urbanas se utilizan principalmente procesos de tipo biológico, motivo por el cual a este tratamiento se le suele denominar también como tratamiento biológico. Los sistemas de tratamiento pueden ser de biomasa suspendida y de biomasa fija. Entre los primeros, el sistema típico es el de fangos activados y entre los segundos, el de lechos bacterianos.

Estas tipologías de procesos se encuadran dentro de las denominadas “tecnologías duras o intensivas”, por contraposición

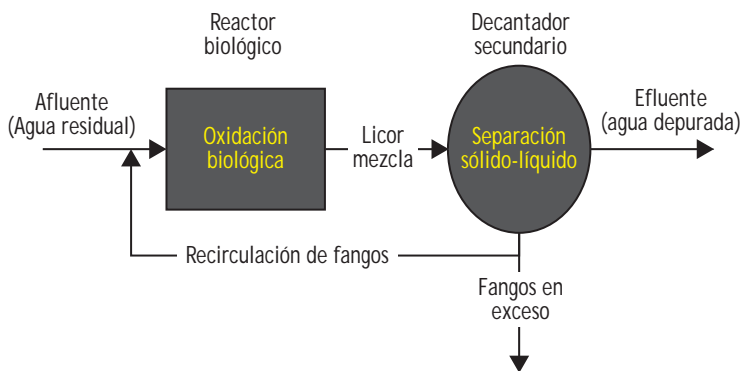
a las conocidas como “tecnologías blandas, naturales o extensivas” (lagunajes, humedales artificiales, filtros verdes, etc.). Las primeras, a diferencia de las segundas, tienen un mayor consumo energético y requieren menos espacio para su implantación. Generalmente, las tecnologías intensivas pueden dar servicio a núcleos urbanos de cualquier tamaño (en términos de h-e), gracias, sobre todo, a la gran diversidad de variantes disponibles que le confieren una enorme versatilidad, quedando las extensivas circunscritas a pequeñas poblaciones.

El sistema intensivo de depuración más ampliamente difundido a nivel mundial es el de fangos activados, que cuenta con numerosas variantes según el modo de funcionamiento (distintos procesos considerados como convencionales, aireación prolongada, canales de oxidación, reactor discontinuo secuencial o SBR, etc.). En su configuración básica, el proceso de fangos activados consta de dos fases o etapas en serie: una de oxidación biológica y otra de separación sólido-líquido (figura 3 e imagen 2).

La primera etapa (oxidación biológica) se realiza en un reactor biológico o biorreactor, agitado y aireado, en donde se provoca el desarrollo de un cultivo microbiano formado por gran número de microorganismos —principalmente bacterias aerobias, esto es, que precisan de oxígeno disuelto para respirar— los cuales, agrupados en flóculos, (bio)degradan la materia orgánica. La segunda etapa (separación sólido-líquido) tiene lugar en un decantador secundario o clarificador, donde se separan del efluente ya depurado los flóculos biológicos formados en el biorreactor. Una parte de los fangos producidos en el decantador secundario se recircula al reactor biológico para mantener una adecuada concentración de microorganismos en el mismo, mientras que el resto (fangos en exceso) se purga hacia la línea de fangos.

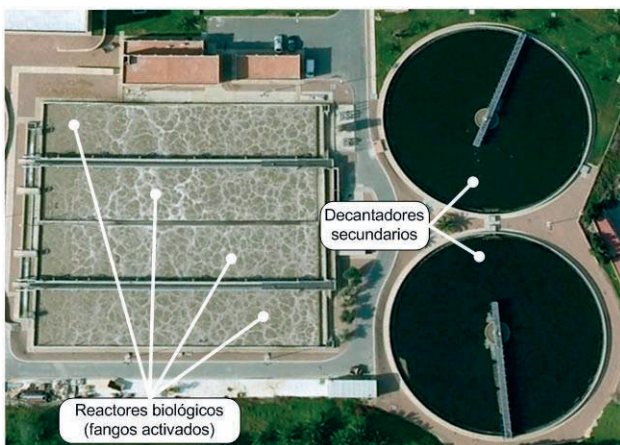
Los fangos son subproductos resultantes de la depuración del agua residual, concretamente, del tratamiento primario (fango primario) y del secundario (fango secundario, biológico, o en exceso). Se caracterizan por su extrema liquidez (ocupan mucho vo-

Figura 3. Esquema del tratamiento secundario de fangos activados



Fuente: elaboración propia.

Imagen 2. Tratamiento secundario por fangos activados de una EDAR urbana en servicio (EDAR "Rincón de León", Alicante)



Fuente: elaboración propia sobre imagen de Google Maps.

lumen) y su putrescibilidad (sanitaria y ambientalmente perjudicial), razones por las cuales deben ser adecuadamente tratados antes de su evacuación de la EDAR. El conjunto de procesos que se emplean para tratar los fangos conforma la línea de fangos, que normalmente está integrada por el espesado (en espesadores por gravedad o por flotación), para concentrar los fangos por eliminación de agua y reducir su volumen, mejorando el rendimiento de los procesos posteriores; la estabilización o digestión (en digestores aerobios o anaerobios), para reducir el contenido de la materia volátil a fin de hacer el residuo menos putrescible y más estable; y la deshidratación (en filtros banda, filtros prensa o centrífugas), para eliminar agua del fango y convertirlo en un (bio)sólido fácilmente manejable y transportable.

En la imagen 3 se indican las instalaciones de las líneas de agua (pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario) y de fangos (espesado, digestión y deshidratación) de una EDAR.

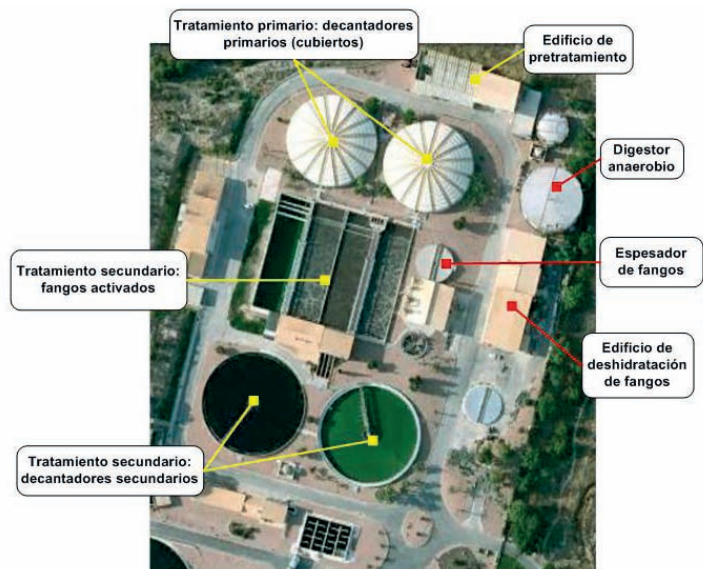
En cuanto al tratamiento terciario, está constituido por los procesos que se aplican a las aguas residuales,

después del tratamiento secundario, para obtener mejores rendimientos en la eliminación de DBO₅ y SS. Uno de sus principales objetivos es el de adaptar la calidad de las aguas residuales a las normas establecidas según el posterior uso del efluente (tratamientos de regeneración para reutilización) o el destino del medio receptor, por lo que también suelen denominarse tratamientos complementarios, de afino o avanzados. Incluye, asimismo, entre sus objetivos, la eliminación de nutrientes (fundamentalmente N y P, para evitar problemas de eutrofización), metales, etc. y la reducción de cargas excepcionales de tipo puntual o estacional.

En el caso concreto del tratamiento terciario de regeneración para reutilización, su objetivo es mejorar la calidad del efluente depurado en la EDAR para cumplir los requisitos de calidad de las aguas regeneradas conforme el real decreto de reutilización. Para ello, es preciso complementar las instalaciones de tratamiento previas con procesos avanzados que reduzcan la carga contaminante residual hasta valores admisibles para el uso al que vaya a destinarse el agua producto y eliminen los microorganismos patógenos para garantizar la adecuada calidad sanitaria del agua. Desde esta perspectiva, el objetivo principal del tratamiento de regeneración es reducir la cantidad de agentes patógenos que hayan sobrevivido a los tratamientos de depuración, así como reducir el nivel de sólidos en suspensión y turbidez, a fin de adaptarse a calidades mínimas exigidas para su uso, conforme el real decreto de reutilización.

Como se ha dicho anteriormente, el tratamiento terciario de regeneración se lleva a cabo en una ERA, que puede implantarse como una ampliación o mejora de la propia EDAR o diseñarse *ex novo* conjuntamente con esta (imagen 4).

Imagen 3. Elementos de la línea de agua (en color amarillo) y de la línea de fangos (en color rojo) de una EDAR (EDAR "Monte Orgegia I", Alicante)



Fuente: elaboración propia sobre imagen de Google Maps.

Imagen 4. Instalaciones del tratamiento terciario de la EDAR-ERA "Alicante Norte" (Alicante)



Fuente: elaboración propia sobre imagen de Google Maps.

Entre los procesos más utilizados en los tratamientos terciarios de regeneración, pueden destacarse los siguientes: físico-químico (coagulación + floculación + decantación lamelar), filtración (sobre lecho granular, filtros de discos, filtros de telas), nitrificación-desnitrificación (para eliminar nitrógeno), ósmosis inversa (en el caso de aguas salinas o salobres) y desinfección (cloración, ozonización, radiación UV). En la imagen 5 se muestran algunas de las tecnologías implicadas en estos procesos: coa-

gulación-floculación-decantación lamelar (físico-químico), discos de telas (filtración) y radiación UV (desinfección).

No obstante, cada caso particular deberá estudiarse individualmente para definir el tratamiento más adecuado, que dependerá tanto de la calidad del efluente depurado como del uso posterior del agua regenerada, de aspectos económicos, de la disponibilidad de espacio, etc.

Para un diseño inicial, pueden considerarse las líneas generales de tratamiento indicadas en la tabla 6, en función de los tipos de calidad del real decreto de reutilización (ver tabla 5).

SISTEMAS AVANZADOS DE TRATAMIENTO

A lo largo de los últimos años, los sistemas más o menos convencionales de biomasa suspendida (fangos activados) y de biomasa fija (lechos bacterianos) han ido evolucionando hacia sistemas más avanzados, que optimizan los rendimientos, el consumo energético y los requerimientos de espacio, como aspectos más significativos.

Es, por ejemplo, el caso de los sistemas de biomasa fija sobre lecho móvil y de los sistemas de biomasa fija sumergida. Entre los primeros, destacan el Biorreactor de Lecho móvil o MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactor*) y el Proceso Integrado de Biopelícula y Fangos Activados o IFAS (*Integrated fixed Film Activated Sludge*); y, entre los segundos, los reactores biológicos de lecho relleno o PBBR (*Packed Bed Biological Reactors*) —también denominados filtros inundados, biofiltros o filtros biológicos inundados, bio-

Imagen 5. Procesos de un tratamiento terciario (EDAR-ERA "Alicante Norte", Alicante): coagulación-floculación-decantación lamelar (izq.), filtración por discos de telas (centro) y desinfección por radiación UV (dcha.)



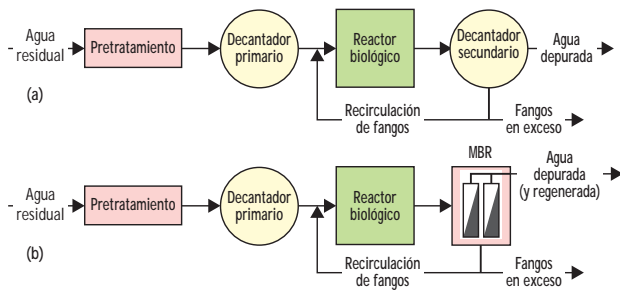
Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Líneas de tratamiento terciario de regeneración (T-1 a T-6) según los tipos de calidad de la Tabla 5 (A, B, C, D y E)

Tratamientos sin desalación				Tratamientos con desalación	
T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6
Físico-químico (coagulación-floculación-decantación)	Físico-químico (coagulación-floculación-decantación)	Filtración	Filtración	Físico-químico (coagulación-floculación-decantación)	Físico-químico (coagulación-floculación-decantación)
Filtración	Filtración	Luz UV		Filtración	Filtración
Ultrafiltración (UF)	Luz UV	Desinfección		Filtración con membrana	Desalación Electrodialisis Reversible EDR
Desinfección	Desinfección			Ósmosis inversa (OI)	Luz UV
				Desinfección	Desinfección
Calidad: A	Calidad: B	Calidad: C, D	Calidad: E	Calidad: todas	Calidad: B, C, D, E

Fuente: elaboración propia (adaptado de *Guía para la Aplicación del RD 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas*).

Figura 4. Diagramas de bloques comparativos entre un sistema de fangos activos convencional (a) y un sistema MBR (b)



Fuente: elaboración propia.

reactores de lecho inundado, biofiltros granulares, etc. – y los reactores biológicos de lecho fluidizado o FBBR (*Fluidized Bed Biological Reactors*).

Sin embargo, los desarrollos más significativos se focalizan en el Biorreactor de Membrana o MBR (*Membrane BioReactor*). El MBR es una modificación del sistema convencional de fangos

de sólidos en suspensión y de microorganismos, que verificaría las exigencias del real decreto de reutilización.

Los MBR son sistemas en los que se integra la degradación biológica de las aguas residuales (biodegradación) con la filtración de membrana (separación sólido-líquido) (figura 4 e imagen 6).

En el diseño *ex novo* de un sistema de depuración y de regeneración, el MBR puede operar simultáneamente como tratamiento secundario y terciario (figura 5), reduciéndose significativamente las necesidades de espacio.

Los MBR pueden adoptar diferentes configuraciones (figura 6): membrana sumergida integrada (a), membrana sumergida no integrada (b) y membrana externa (c), siendo las dos primeras las más empleadas en la actualidad. Los sistemas de membrana externa están prácticamente en desuso.

En los sistemas integrados las membranas están sumergidas y ubicadas dentro del reactor biológico, mientras que en los no integrados las membranas sumergidas se ubican en un tanque separado, lo que facilita su mantenimiento y reparación o sustitución. En los sistemas externos las membranas no están sumergidas y la filtración se realiza en módulos independientes del reactor biológico.

Por otro lado, las EDAR urbanas han estado tradicionalmente diseñadas para eliminar la materia orgánica (DBO₅) y los sólidos en suspensión (SS), prestando, en general, poca atención a los compuestos nitrogenados y fosforados. De hecho, según la Directiva 98/15/CE (ver tabla 4) únicamente sería necesario eliminar estas sustancias en el caso de vertidos a zonas sensibles, por ejemplo, eutróficas (embalses, lagos, rías, etc.). A pesar de ello, en la actualidad, y sobre todo a raíz de la promulgación de la DMA, la mayoría de las EDAR están incorporando también procesos de eliminación de nutrientes, especialmente nitrógeno, por el impacto negativo que este elemento ocasiona en los medios hídricos receptores. Efectivamente, el nitrógeno (N) –junto con el fósforo (P)– es un factor de eutrofización, y su presencia o la de alguno de sus derivados en las aguas residuales es perjudicial para los cauces, debido a que los compuestos del nitrógeno (amoníaco, nitritos, etc.) consumen oxígeno, con la consiguiente reducción

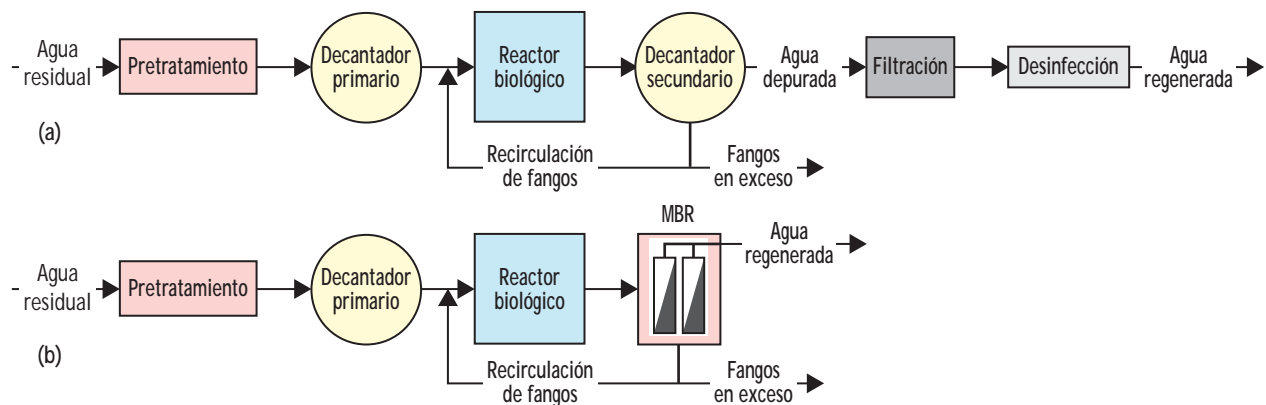
Imagen 6. Instalación de un módulo de MBR (izq.) y MBR en funcionamiento (dcha.)



Fuente: Koch Membranes System.

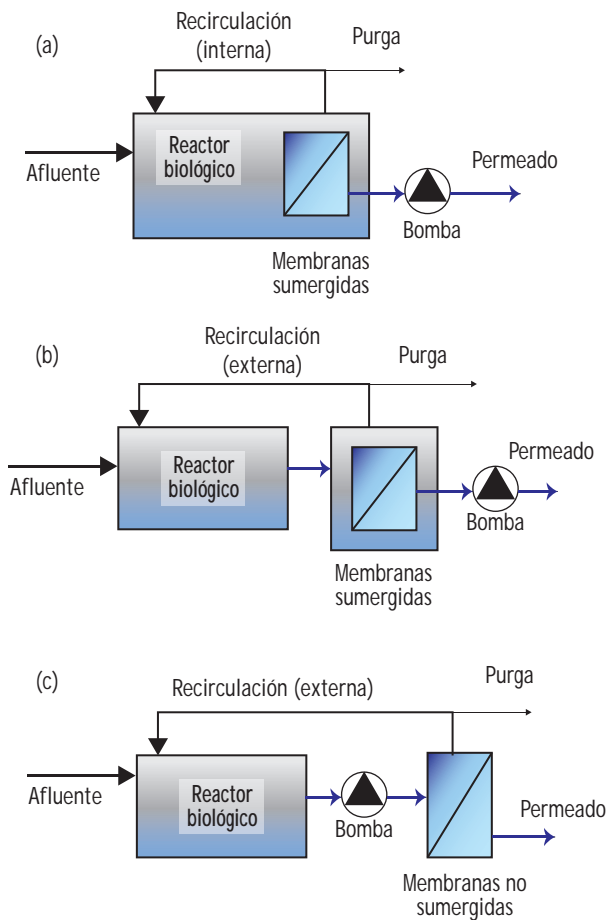
activados, en el que se sustituye el decantador secundario por unidades de membrana de microfiltración (MF, tamaño de poro entre 0,1 y 1 µm) o de ultrafiltración (UF, tamaño de poro entre 0,005 y 0,1 µm), para producir un efluente de alta calidad, libre

Figura 5. Diagramas de bloques comparativos entre un tratamiento biológico convencional con tratamiento terciario de filtración y desinfección (a) y un sistema MBR de tratamiento terciario (b)



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Configuraciones más comunes de los MBR: (a) sistema sumergido integrado, (b) sistema sumergido no integrado, (c) sistema externo



Fuente: CEDEX, 2014.

del oxígeno disuelto en los ríos por debajo de los valores necesarios para la vida piscícola.

Para eliminar los compuestos orgánicos nitrogenados en las EDAR se aplican procesos de nitrificación-desnitrificación. La nitrificación es un proceso biológico mediante el cual el nitrógeno amoniacal del agua residual se oxida a nitrato. El proceso tiene lugar en condiciones aerobias, es decir, en presencia de oxígeno disuelto. La desnitrificación es un proceso por el cual los nitratos y nitritos se reducen a nitrógeno libre. Este proceso tiene lugar en un reactor biológico anóxico (sin oxígeno libre). Normalmente, ambos procesos se realizan de forma conjunta, como nitrificación-desnitrificación.

Uno de los esquemas funcionales más utilizados es el de desnitrificación preconnectada (figura

7). En este proceso conjunto de nitrificación-desnitrificación, el afluente entra en un reactor anóxico, en donde al no haber oxígeno libre las bacterias se ven obligadas a consumir nitrato para poder degradar la materia orgánica. En esta etapa, el nitrato es transformado a nitrógeno gas (desnitrificación) y eliminado del sistema. A continuación, en una segunda etapa, el agua residual es conducida a un reactor aerobio, en donde el amoníaco se convierte primero a nitrito (nitritación) y seguidamente a nitrato (nitratación). Esta segunda etapa, en la que el amoníaco se convierte a nitrato (nitrificación), requiere la presencia de oxígeno libre (proceso aerobio).

Los sistemas MBR también pueden diseñarse para la eliminación biológica de nitrógeno. La figura 8 muestra el diagrama de flujo completo de una EDAR con MBR no integrado y con nitrificación (N)-desnitrificación (DN).

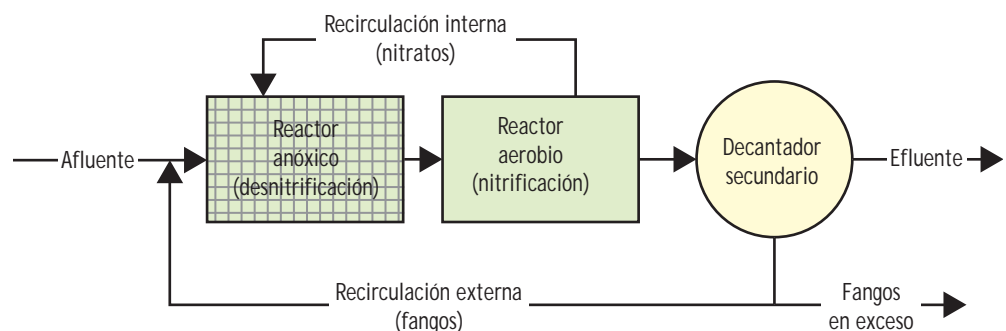
Al margen de los sistemas aerobios, pueden emplearse sistemas anaerobios en la línea de agua, los cuales, por otro lado, van siendo cada vez más utilizados en la línea de fangos, concretamente, en la digestión. Los dos sistemas anaerobios con mayor proyección son el MBR anaerobio o AMBR (*Anaerobic Membrane Biological Reactor*) y el reactor de manto de fangos de flujo ascendente o UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). El AMBR se encuentra aún en fase de desarrollo. Las investigaciones en planta piloto se vienen centrando, principalmente, en configuraciones de membrana externa.

El UASB es el sistema de biomasa fija que más desarrollo y difusión ha tenido en los últimos años, especialmente en Latinoamérica. En España, por el momento, no se aplica en la depuración de aguas residuales urbanas, aunque sí en la de aguas residuales industriales.

La innovación tecnológica del UASB reside en un dispositivo trifásico situado en la parte superior del mismo que permite separar internamente la biomasa, el efluente tratado y el biogás (figura 9).

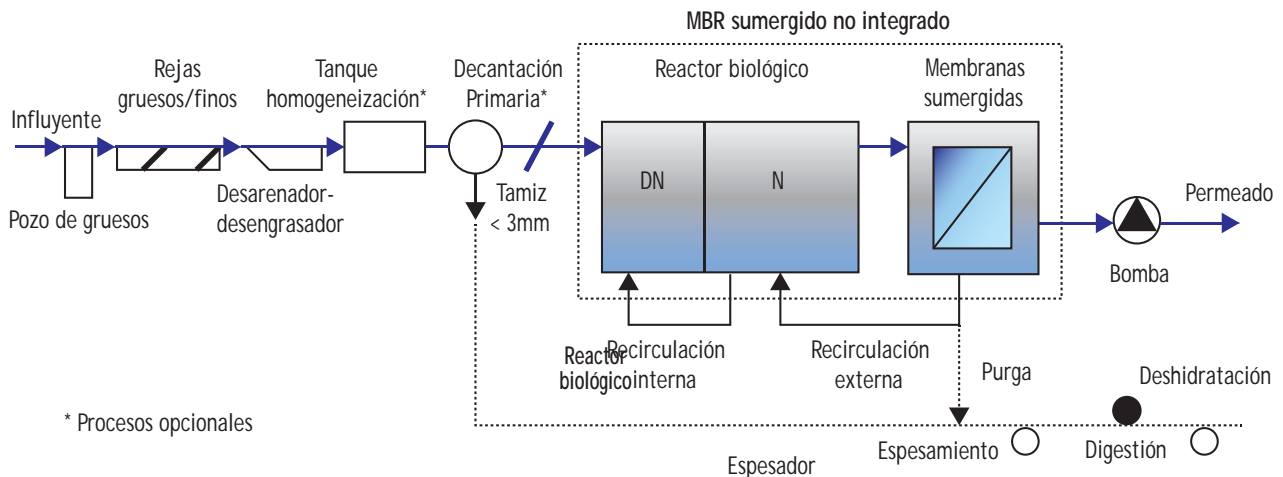
Los UASB tienen unos rendimientos en eliminación de DBO₅ del 60-70% mientras que, por ejemplo, un decantador primario elimina del orden del 30-40%, lo que convierte a estos sistemas en una posible alternativa a los tratamientos primarios habituales para pequeñas poblaciones (fosa séptica, tanque Imhoff, decantador primario).

Figura 7. Proceso conjunto de nitrificación-desnitrificación con desnitrificación preconnectada



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Diagrama de flujo de una EDAR con MBR sumergido no integrado y con nitrificación (N)-desnitrificación (DN)

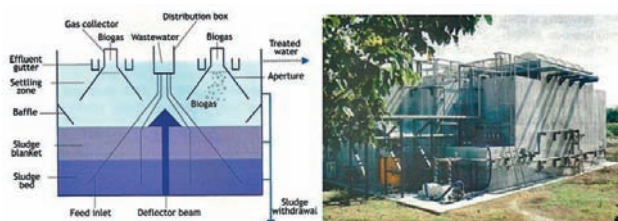


Fuente: CEDEX, 2014.

TENDENCIAS EN I+D+i

Recientemente, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) ha publicado un documento, denominado *Innovación e Investigación en el sector del agua. Líneas Estratégicas (Idi agua)*, en el que se establecen las líneas estratégicas en I+D+i en el ciclo integral del agua. De acuerdo con este documento y en el ámbito de las tecnologías relacionadas con el

Figura 9. Elementos constitutivos de un UASB (izq.) e imagen de un UASB en servicio



Fuente: Henze y Van Loosdrecht (2008).

agua, la I+D+i se centra en la depuración, regeneración y reutilización del agua, así como en el desarrollo de tecnologías que apuesten por la eficiencia hídrica y energética. En el campo concreto de las tecnologías de depuración de las aguas residuales y de la regeneración de los efluentes depurados para su reutilización, gran parte de las actuaciones en I+D+i se orientan hacia los MBR.

Otra importante línea de actuación se refiere a la eliminación de nutrientes. Tal y como se ha expuesto anteriormente, existe un gran número de tecnologías y procesos de nitrificación-desnitrificación, más o menos convencionales, para la línea de agua. Las actuaciones en I+D+i seguirán profundizando en esta cuestión y, aún más, en el tratamiento de las denominadas "corrientes de retorno", que se generan en las EDAR con digestión anaerobia de fangos. Efectivamente, como resultado de la digestión anaerobia, se obtiene un fango con alta concentración de amonio y, en menor medida, de fosfatos. Normalmente, el fango

digerido es deshidratado antes de su disposición final y el líquido drenado se retorna al proceso biológico. La carga de nutrientes de esta corriente de retorno (*sidestream*) es considerable, y puede llegar a incrementar la carga de nitrógeno en el afluente en un 15-25%, con la consiguiente sobrecarga del sistema de nitrificación-desnitrificación de la línea de agua.

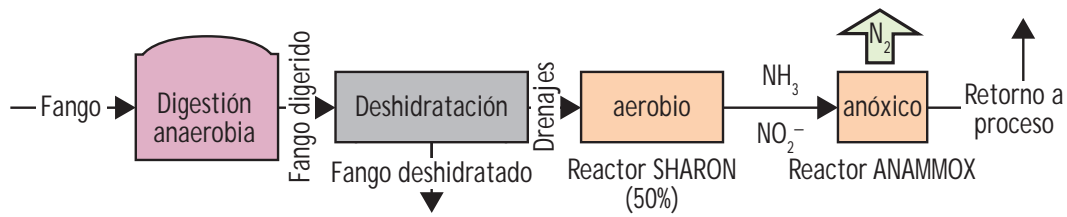
A fin de paliar este problema, se han desarrollado diversos procesos para el tratamiento de estas corrientes de retorno antes de reintroducirlas en la línea de agua, centrados, fundamentalmente, en la eliminación o reducción del amoníaco. Uno de los más novedosos es el proceso combinado SHARON+ANAMMOX. El proceso SHARON (*Single reactor system for High Ammonia Removal Over Nitrite*) es un sistema de nitrificación apropiado para aguas residuales con altas concentraciones de amonio (>0,5 g N/l). Se basa en la nitrificación por microorganismos aerobios y desnitrificación por microorganismos heterótrofos anaerobios, en donde la nitrificación y la desnitrificación se inhiben en un reactor simple con elevadas temperaturas, aireación limitada e intermitente. En este proceso, el 50% del amonio es convertido a nitrito en presencia de oxígeno.

El proceso ANAMMOX (*ANAerobic AMMONium OXidation*) representa una alternativa para el tratamiento de aguas con altas concentraciones de nitrógeno y bajas concentraciones de materia orgánica, debido a que es un proceso autotrófico (no necesita materia orgánica como fuente de carbono) y anóxico (no necesita oxígeno disuelto). Se trata de un proceso biológico mediante el cual ciertas bacterias (autótrofas anaerobias) en condiciones anóxicas oxidan anaeróbicamente el amonio directamente a nitrógeno gas.

El proceso combinado SHARON+ANAMMOX se realiza en dos reactores separados dispuestos en serie (figura 10). En el reactor Sharon (aerobio) se oxida aproximadamente el 50% del amoníaco (NH_3) a nitrito (NO_2^-), y en el reactor Anammox (anóxico) se realiza la desnitrificación a nitrógeno gas (N_2).

Este proceso combinado produce poco fango y requiere menos del 40% de la energía de aireación que un proceso convencio-

Figura 10. Sistema SHARON (50%) + ANAMMOX para el tratamiento de las corrientes de retorno de la línea de fangos



Fuente: elaboración propia.

nal de eliminación de nitrógeno. Asimismo, no necesita materia orgánica para producir nitrógeno en la etapa de desnitrificación.

Una de las líneas propuestas en *IDI agua*, que viene suscitando el interés de las administraciones sanitarias y de la comunidad científica desde hace algún tiempo, es la eliminación de contaminantes emergentes o EC (*Emerging Contaminants*). Los EC se pueden definir como "contaminantes desconocidos o no reconocidos como tales, cuya presencia en el medio ambiente no es necesariamente nueva, pero sí la preocupación por las posibles consecuencias de la misma". La Directiva 2013/39/UE se refiere a los CE como "sustancias prioritarias" e incluyen compuestos tales como pesticidas, productos industriales, hormonas, fármacos y productos de higiene personal.

Los tratamientos convencionales de depuración no se han mostrado muy eficaces ante determinados CE, por lo que están evaluando nuevos sistemas que sean capaces de eliminarlos. En este sentido, las investigaciones realizadas hasta la fecha suelen limitarse a estudios en planta piloto, generalmente a nivel de laboratorio. Así, por ejemplo, se están evaluando procesos combinados anaerobios-aerobios, como el de un UASB seguido de un MBR (imagen 7), con unos primeros resultados satisfactorios.

Por otro lado, además de los procesos anteriores, que se encuadran dentro de los sistemas intensivos, hay que mencionar

Imagen 7. Planta piloto de un sistema combinado UASB+MBR para el estudio de la eliminación de contaminantes emergentes (Laboratorio del Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales de la Universidad de Alicante)



Fuente: elaboración propia.

los sistemas extensivos, entre los que destacan los humedales artificiales (*constructed wetlands*). Se trata de sistemas en los que se llevan a cabo las funciones naturales de los humedales para el tratamiento de las aguas residuales. Estas funciones naturales (eliminación de materia orgánica carbonosa y nitrogenada, sólidos en suspensión, etc.) son realizadas por la vegetación (macrofitas arraigadas o en flotación), el suelo (en el caso de macrofitas arraigadas) y las comunidades microbianas que habitan el humedal.

En función del tipo de circulación del agua, los humedales artificiales pueden ser de flujo horizontal (o de flujo superficial) y de flujo vertical (o de flujo subsuperficial). Generalmente, los humedales de flujo vertical se utilizan como tratamiento secundario y los de flujo horizontal como tratamiento terciario.

Como ventajas añadidas, los humedales artificiales se integran perfectamente en el paisaje y contribuyen a la mejora ambiental del entorno (imagen 8).

Imagen 8: Humedal artificial de macrofitas en flotación (Plaza Ecópolis, Madrid). Ejemplo de integración paisajística



Fuente: Agua Inc (www.aguainc.com).

CONCLUSIONES

Las tecnologías de depuración de aguas residuales y de regeneración de efluentes depurados para reutilización avanzan muy rápidamente. A ello están contribuyendo decisivamente las universidades y los centros de investigación, en muchas ocasiones a través de convenios de colaboración con empresas implicadas en el ciclo integral del agua.

Una parte sustancial de las actuales líneas de trabajo en I+D+i se centra en la eliminación de contaminantes emergentes.

En este sentido, se están evaluando tecnologías que incluyen sistemas anaerobios y de membranas, como los UASB y los MBR, respectivamente. En los próximos años esta tendencia no solo se mantendrá sino que, muy probablemente, se incrementará.

Uno de los temas pendientes es el de la depuración de las pequeñas poblaciones, entendidas como tales, según la D271, las de menos de 2.000 h-e. Sobre esta cuestión, habrá que incidir tanto en las tecnologías como en la tipología y planificación de los sistemas de depuración (centralizados o descentralizados, intensivos o extensivos, etc.).

Ineludiblemente, deberá seguir progresando la I+D+i relacionada con los tratamientos terciarios de regeneración para reutilización, principalmente para usos urbanos, agrícolas (de vital importancia en zonas de pluviometría irregular y escasa, como es el caso del arco mediterráneo peninsular) y, por supuesto, ambientales (recarga de acuíferos y caudales ecológicos).

Las mayores exigencias en la calidad de los vertidos a los cauces, propiciadas por la DMA, obligarán a redoblar esfuerzos en la eliminación de los compuestos nitrogenados en la línea de agua de las EDAR y en las corrientes de retorno, ya mediante procesos convencionales de nitrificación-desnitrificación, ya mediante tecnologías avanzadas tipo Sharon, Anammox, etc.

Una prioridad de las tecnologías, tanto actuales como futuras, es la optimización del consumo energético, con el objetivo, entre otros, de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno, cloro-fluorocarbonos, etc.), principales responsables del calentamiento global y, por ende, del cambio climático. Con este objetivo, los desarrollos tecnológicos deben sustentarse en los principios del uso eficiente y sostenible de los recursos naturales, de la energía y, particularmente, del agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Barceló, D. y Postigo, C. 2015: "Los contaminantes emergentes: Descripción y tratamientos", en *iAgua Magazine*, 4, en <http://www.iagua.es/blogs/damia-barcelo/contaminantes-emergentes-descripcion-y-tratamientos> (Consulta realizada el 28 de diciembre de 2015).
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) 2014: *Guía Técnica para la implantación de biorreactores de membrana*. Madrid, Servicio de Publicaciones del CEDEX.
- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas (en <https://www.boe.es/doue/1991/135/L00040-00052.pdf>).
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas (en <https://www.boe.es/doue/2000/327/L00001-00073.pdf>).
- Directiva 2013/39/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de agosto de 2013, por la que se modifican las Directivas 2000/60/CE y 2008/105/CE en cuanto a las sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas (en <https://www.boe.es/doue/2013/226/L00001-00017.pdf>).
- Henze, M., Van Loosdrecht, M., Ekama, G. A. y Brdjanovic, D. 2008: *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. London, IWA Publishing (en http://ocw.unesco-ihc.org/pluginfile.php/1025/mod_resource/content/1/Introduction%20%281%29.pdf).
- Hernández, A. 1996: *Depuración de Aguas Residuales*. Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Hontoria García, E. 2015: *Preguntas y respuestas para diseñar y predimensionar. Memoria y experiencias en los sistemas de depuración*. Granada, Godel Impresiones Digitales, S.L.
- Melgarejo, J., Prats, D., Molina, A. y Trapote, A. 2015: "A case study of urban wastewater reclamation in Spain: comparison of water quality produced by using alternative processes and related costs", en *Journal of Water Reuse and Desalination*. DOI: 10.2166/wrd.2015.147.
- Metcalf y Eddy, 2000: *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid, McGraw-Hill.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2015: *Líneas estratégicas de innovación e investigación en el sector del agua (IDí agua)*, en http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/Lineas_estrategicas_innovacion_investigacion.aspx (Consulta realizada el 21 de diciembre de 2015).
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010: *Guía para la Aplicación del R. D. 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas*. Madrid, Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, en http://www.mapama.gob.es/es/agua/publicaciones/GUIA_RD_1620_2007__tcm7-178027.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010: *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*. Madrid, Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE, 294, de 8 de diciembre de 2007), en https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2007-21092.
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE núm. 176, de 24 de julio de 2001), en <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-14276>.
- Temprano González, J., Gabriel Cervigni, M., Suárez López, J. y Tejero Monzón, J. I. 1996: "Contaminación en redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia: control en origen", en *Revista de Obras Públicas*, 3352, Madrid, 45-57.
- Trapote Jaume, A. 2013: *Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas*. Alicante, Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Trapote Jaume, A. 2013: *Infraestructuras Hidráulico-Sanitarias II. Saneamiento y drenaje urbano*. Alicante, Publicaciones de la Universidad de Alicante.