

Tendencias actuales en las tecnologías de tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas

YASMINA FERRER MEDINA (*), ENRIQUE ORTEGA DE MIGUEL (**) y JUAN JOSÉ SALAS RODRÍGUEZ (***)

RESUMEN España cuenta con un gran número de pequeñas poblaciones, como pone de manifiesto el hecho de que de los 8.111 municipios existentes el 72% presenta una población inferior a los 2.000 habitantes, elevándose a 3.800 (47%) los municipios menores de 500 habitantes.

En la forma de abordar el tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas, cabe distinguir tres etapas diferenciadas a lo largo del tiempo. En un primer momento (previo a la década de los 80), las tecnologías de depuración que se aplicaban a las pequeñas aglomeraciones eran mera reproducción, a menor escala, de las que se aplicaban en las grandes urbes, con un amplio predominio de la tecnología de aireación prolongada. Por sus elevados requisitos energéticos y técnicos, un elevado número de estas instalaciones fueron quedando fuera de servicio.

En la década de los 80 hacen su aparición las tecnologías extensivas. Diseños inadecuados, deficiencias constructivas, tamaños de población excesivamente grandes, etc., provocaron que no se alcanzasen los resultados esperados, lo que se tradujo en un rechazo generalizado de este tipo de tecnologías.

En la actualidad, se comienza a tomar conciencia de que la depuración en pequeñas aglomeraciones requiere otro enfoque más exigente, tanto desde el plano técnico como desde la gestión, que dé respuesta a las causas que provocaron los anteriores fracasos, planteándose todo un abanico de posibles tecnologías (intensivas, extensivas y mixtas), todas ellas válidas en función de las características concretas de la aglomeración, cuyas aguas residuales se vayan a tratar, y de las exigencias de vertido.

En este documento se pasa revista a las tendencias actuales en el campo del tratamiento de las aguas residuales de las pequeñas aglomeraciones urbanas, haciendo repaso tanto a las tecnologías de depuración ya consolidadas como a las tecnologías emergentes y a las que se encuentran aún en fase de experimentación y desarrollo.

CURRENT TRENDS IN WASTEWATER TREATMENT IN SMALL AGGLOMERATIONS

ABSTRACT Spain has a great number of small agglomerations. In fact from the 8.111 existing municipalities, 72% have less than 2.000 inhabitants and 47% of them (3.800) have less than 500 inhabitants.

Concerning wastewater treatment in small agglomerations three periods can be distinguished. Before the 80th, wastewater treatment plants were merely small reproductions of those applied in bigger agglomerations, and Extended Aeration was basically the only process. Due to their high energy and technical requirements, many of these small plants were left out of service.

Extensive technologies appeared in Spain during the 80th. Results were not as good as expected mainly due to design and construction failures, which resulted in a general rejection of these technologies.

Nowadays, we are just starting to be aware that wastewater treatment in small agglomerations, need a new approach, more demanding concerning technical and management issues, to give an answer to the origin of previous mistakes. This new approach offers a wide range of possible technologies (extensive, intensive and mixed), each of them could be a good option depending on the specific characteristics of the agglomeration, and the discharge requirements.

This paper reviews current trends concerning urban wastewater treatment in small agglomerations, including consolidated technologies, emerging technologies and technologies which are still in development or in an experimental phase.

Palabras clave: Depuración de aguas residuales, Pequeñas aglomeraciones urbanas, Tecnologías extensivas, Tecnologías intensivas.

Keywords: Urban wastewater treatment, Small agglomerations, Extensive technologies, Intensive technologies.

(*) Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX). Paseo Bajo de la Virgen del Puerto, 3. 28005 Madrid. E-mail: yasminda.ferrer@cedex.es

(**) Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).

(***) Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA).

1. INTRODUCCIÓN

España cuenta con un gran número de pequeñas poblaciones, como pone de manifiesto el hecho de que de los 8.111 municipios existentes el 72% presenta una población inferior a los 2.000 habitantes, elevándose a 3.800 (47%) los municipios menores de 500 habitantes.

Desde el 1 de Enero de 2006, las aglomeraciones urbanas menores de 2.000 habitantes equivalentes, que vierten a aguas continentales o estuarios y que cuentan con red de saneamiento, están obligadas a someter a sus aguas residuales a un tratamiento adecuado [Real Decreto Ley 11/1995].

El primer Plan Nacional de Saneamiento y Depuración (1995-2005) dio prioridad a las medianas y grandes aglomeraciones. Posteriormente, el Plan Nacional de Calidad de las Aguas (2007-2015) aborda la depuración de pequeñas aglomeraciones, especialmente las ubicadas en espacios protegidos. También, las Comunidades Autónomas han comenzado a incluir la depuración de las pequeñas aglomeraciones en sus planes de saneamiento.

En España, en el tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas cabe distinguir tres etapas diferenciadas:

En un primer momento (previo a la década de los 80), las tecnologías de depuración que se aplicaban a las pequeñas aglomeraciones eran mera reproducción, a menor escala, de las que se aplicaban en las grandes urbes, predominando la implantación de instalaciones basadas en la tecnología de aireación prolongada, que se disponían enterradas en las aplicaciones de menor tamaño. Carencias técnicas y económicas, para hacer frente a la correcta explotación y mantenimiento de este tipo de instalaciones, provocaron que un gran número de ellas quedasen fuera de servicio, o no cumplieren con las expectativas previstas [Massa, 1988].

Como opción alternativa, en la década de los 80 se asiste a un "boom" de las inicialmente denominadas "tecnologías de bajo coste" o "tecnologías blandas" y que en la actualidad se conocen como tecnologías extensivas. Encuadradas en este tipo de tecnologías, las que alcanzaron un mayor grado de implantación a nivel nacional fueron los Lagunajes y los Filtros de Turba, y en menor medida, los Filtros Verdes. En la mayoría de los casos, estas instalaciones tampoco resultaron ser una opción válida.

En el caso de los Lagunajes, a finales de los años 80 España contaba con unas 100 instalaciones en operación y construcción [MOPT, 1991], destacando el desarrollo que alcanzó en la Región de Murcia, en la que en el periodo 1984-1990 se pusieron en operación 11 depuradoras mediante lagunaje, todas ellas con una capacidad de tratamiento superior a los 20.000 habitantes equivalentes, ascendiendo la capacidad total a 473.500 habitantes equivalentes y la superficie ocupada a unas 169 hectáreas [Belchí, 1990].

El incremento de la carga contaminante industrial (principalmente de la industria conservera), mucho mayor que el previsto en los proyectos, junto a deficiencias en el diseño (3,6 m²/habitante equivalente, de media), fueron las principales causas del mal funcionamiento de esta tecnología de tratamiento.

Andalucía es la comunidad donde los Filtros de Turba han alcanzado un mayor grado de implantación, motivado en gran parte por la proximidad de las turberas de Padul (Granada), contando en la actualidad con un centenar de instalaciones, con una capacidad total de tratamiento de unos 200.000 habitantes equivalentes [Salas, 2008].

En este caso, los motivos de su fracaso hay que buscarlos en las elevadas cargas hidráulicas y orgánicas recomendadas para el diseño de los filtros (20-40 l/m².h y 0,25-0,30 kg



FIGURA 1. Filtros de Turba en estado de abandono.

DBO₅/m².d, respectivamente), y en la indefinición de las características fisicoquímicas de las turbas a emplear como sustrato filtrante.

Como se observa, la causa principal del fracaso inicial de la implantación de tecnologías extensivas en España radicó en diseños deficientes, que provocaron que las instalaciones operasen con cargas muy superiores a las recomendables. A ello también contribuyó el hecho de aplicar estas tecnologías a tamaños de población muy superiores a los recomendables, y en ocasiones con importantes aportaciones de origen industrial. Como consecuencia de estos fracasos muchas instalaciones de Lagunaje y de Filtros de Turba han sido abandonadas, o demolidas.

Otros factores genéricos que han contribuido al fracaso, en general, de la depuración en las pequeñas aglomeraciones, han sido: la ausencia de unos límites de vertido claros, los altos costes por habitante de implantación y explotación, la falta de recursos económicos y técnicos de los pequeños municipios, las dificultades a la hora de la caracterización de los vertidos y la extrema variabilidad espacial y temporal de los mismos.

En la actualidad, y tras lo aprendido de las dos etapas anteriores, se comienza a tomar conciencia de que la depuración en pequeñas aglomeraciones requiere otro enfoque más exigente, tanto desde el plano técnico como desde la gestión, que dé solución a las causas que provocaron los anteriores fracasos, planteándose todo un abanico de posibles tecnologías (intensivas, extensivas y mixtas), todas ellas válidas, en función de las características concretas de la aglomeración, cuyas aguas residuales se vayan a tratar, y de las exigencias de vertido.

La importancia del tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas se pone de manifiesto en el elevado número de aglomeraciones menores de 2.000 habitantes equivalentes que aún no disponen de un tratamiento adecuado de sus efluentes. En el año 2008 se estimó que la carga contaminante que aún no disponía de tratamiento adecuado, en este rango de población, se situaba entre 3 y 4 millones de habitantes equivalentes, repartidos en más de 6.000 aglomeraciones, muchas de ellas menores de 500 habitantes equivalentes [CEDEX-CENTA, 2009].

A continuación se hace un repaso de las diferentes tecnologías que se están empleando actualmente para la depuración de aguas residuales urbanas en pequeñas aglomeraciones. Algunas de estas tecnologías son muy conocidas y se emplean desde hace tiempo en España, otras son relativamente nuevas en este rango de población, pero debido a su idoneidad para

ser aplicadas en pequeñas aglomeraciones, se están empleando cada vez más, encontrándose en plena fase de expansión. Por último, también se mencionan algunas tecnologías que aun se encuentran en fase de experimentación y desarrollo.

Para su exposición, en el presente artículo las tecnologías se han clasificado en extensivas e intensivas, atendiendo fundamentalmente a los requerimientos de superficie de cada una de ellas ($>1 \text{ m}^2/\text{habitante}$ equivalente y $<1 \text{ m}^2/\text{habitante}$ equivalente, respectivamente).

2. TENDENCIAS EN EL EMPLEO DE TECNOLOGÍAS EXTENSIVAS

La situación actual de las tecnologías extensivas, que podemos considerar como clásicas, (Lagunaje, Filtros de Turba y Filtros Verdes), es la siguiente:

2.1. LAGUNAJE

En la actualidad su aplicación se encuentra en franca regresión, debido a los bajos rendimientos que se alcanzan y a la variabilidad temporal en la calidad de los efluentes tratados. Ambos factores tienen su origen en la elevada presencia, en estos efluentes, de biomasa algal. No obstante, sí se emplean en la actualidad algunas de las etapas integrantes del sistema de Lagunaje; caso del empleo de las lagunas anaerobias en cabecera de los tratamientos (para simplificar y abaratar la gestión de los fangos en exceso), y del uso de lagunas de maduración en cola de tratamientos (para homogeneizar la calidad final de los vertidos y como etapa de desinfección natural).

Recientemente, el hecho de que la biomasa algal producida en sistemas de lagunaje, que hasta hace poco era un subproducto indeseable, comience a ser considerada como un sustrato con valor energético [Chisti, 2007; Proyecto ALL-GAS], está haciendo que se comiencen a instalar nuevos lagunajes, que potencian, mediante diseños diferentes, el desarrollo de esta biomasa, lo que puede considerarse como una “nueva oportunidad” para esta tecnología.

2.2. FILTROS DE TURBA

Los bajos rendimientos alcanzados son la principal causa del actual declive de esta tecnología de tratamiento. No obstante, se ha comprobado que operando con cargas similares a las que se emplean en los humedales de flujo vertical y en los filtros intermitentes de arena (cargas inferiores a $20 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2\cdot\text{d}$), los rendimientos que se alcanzan con los Filtros de Turba se incrementan notablemente. En concreto, operando con cargas de $17 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2\cdot\text{d}$, se consiguen rendimientos de 91%, 97% y 87% en eliminación de materia en suspensión, DBO_5 y DQO , respectivamente, y la práctica

nitrificación de las formas nitrogenadas presentes [Salas, 2008]. Adicionalmente, bajo este régimen de carga no es preciso proceder a la periódica retirada de la costra, que se formaba cada dos semanas de operación cuando se operaba con cargas orgánicas elevadas.

Igualmente, se ha comprobado la factibilidad del empleo de los filtros de turba ya existentes (en lugar de proceder a su demolición), tanto como tratamiento previo, como en sustitución de la etapa decantación secundaria (cuando no se precise la recirculación de fangos al reactor, caso de los lechos bacterianos y de los CBR) y como eras de secado de fangos [Salas, 2008].

2.3. FILTROS VERDES

En la actualidad, y tras la aprobación del Real Decreto 1620/2007, de Reutilización de las Aguas Depuradas, se ha llegado al consenso generalizado de que los Filtros Verdes no pueden concebirse como una tecnología aplicable al tratamiento de aguas residuales brutas, sino como algunos de los usos que se contemplan en el citado Real Decreto, y que exigen que las aguas reciban un tratamiento previo antes de su aplicación al suelo [Ortega *et al.*, 2010].

La aplicación de aguas residuales al suelo, tras tan sólo una etapa de decantación previa (fosa séptica/tanque Imhoff), queda restringida al tratamientos de las aguas residuales generadas en viviendas individuales.

Entre las tecnologías extensivas que en la actualidad experimentan un mayor grado de implantación a nivel nacional destacan los Humedales Artificiales y las Macrofitas en Flotación, que se tratan con mayor detalle a continuación.

2.4. HUMEDALES ARTIFICIALES

Son sistemas de depuración en los que se reproducen los procesos de eliminación de contaminantes que tienen lugar en las zonas húmedas naturales. La depuración de las aguas residuales tiene lugar al hacerlas circular a través de estas zonas húmedas artificiales, en las que tienen lugar, de forma simultánea, procesos físicos, químicos y biológicos.

Los Humedales Artificiales se clasifican en dos tipologías, en función del modelo de circulación del agua: superficial o subterránea. En los Humedales Artificiales de Flujo Superficial, o Flujo Libre, (Surface Flow Wetlands, SFW, o Free Water Surface Wetlands, FWS), el agua a tratar circula por encima del sustrato, mientras que en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (Subsurface Flow Wetlands, SSFW, o Vegetated Submerged Beds, VSB), el agua recorre el humedal de forma subterránea, a través de los espacios intersticiales del lecho filtrante. Según la dirección en la que circulan las aguas a través del sustrato, los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial se clasifican en Horizontales y Verticales.

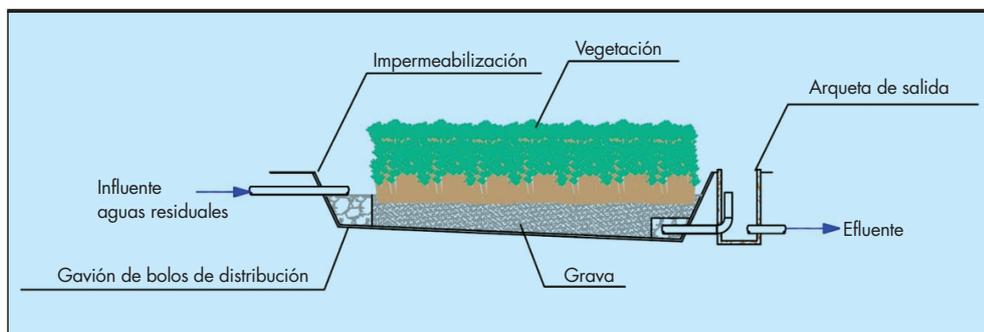


FIGURA 2. Esquemas de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal.

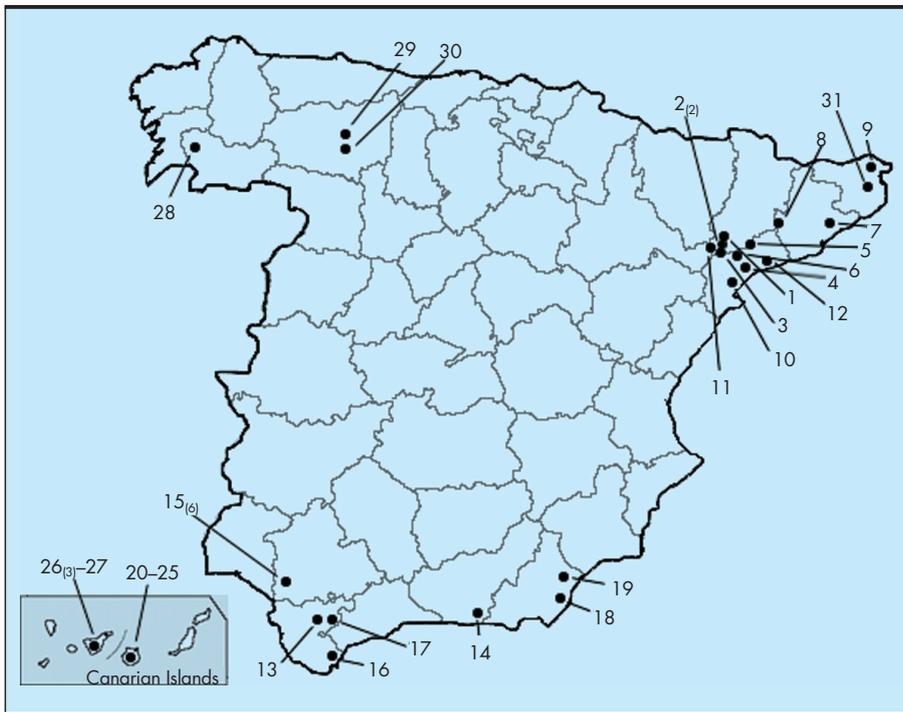


FIGURA 3. Distribución geográfica de los humedales artificiales de flujo Subsuperficial.

[1] Corbins. [2] Almatret. [3] Alfés. [4] Àrnes. [5] Verdú. [6] La Fatarella. [7] Gualba. [8] St. Martí de Sesgueioles. [9] Vilajuïga. [10] Mas Roig. [11] Pobla de Massalua. [12] Vilaplana. [13] La Muela (Algodonales). [14] Albondón. [15] Carrión de los Céspedes. [16] Algeciras. [17] Cortés de la Frontera. [18] Mojácar. [19] Los Gallardos. [20] Vallesco. [21] Las Palmas de Gran Canaria. [22] Villa de Santa Brígida. [23] Agüimes. [24] Valsequillo. [25] Santa Lucía. [26] Buena Vista del Norte. [27] El Rosario. [28] Beariz. [29] Bustillo de Cea. [30] Cubillas de los Oteros [31] Cervià de Ter.

En la actualidad, los Humedales Artificiales se aplican para el tratamiento de las aguas residuales (tanto urbanas, como industriales), en sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), en deshidratación de fangos y para la restauración y creación de ecosistemas acuáticos.

La tecnología de humedales artificiales de flujo subsuperficial puede considerarse como una tecnología relativamente reciente en España, en comparación con otros países europeos, en las que las instalaciones se cuentan por centenares. Un inventario llevado a cabo en el año 2007 [Puigagut *et al.*, 2007], puso de manifiesto que más del 80% de la treintena de humedales existentes, se habían construido en los últimos cinco años, predominando entre ellos los de flujo horizontal.

Este mismo inventario indicaba que las cargas orgánicas aplicadas a los Humedales de Flujo Horizontal oscilaban entre 0,8 y 23 g DBO₅.m².d⁻¹, y en el caso de los de Flujo Vertical entre 22,8 y 29,8 g DBO₅.m².d⁻¹. En lo relativo a los rendimientos, la eliminación de DBO₅ oscilaba entre el 80 y el 95% para ambas modalidades. En el caso de la eliminación de nutrientes, esta no era muy elevada para ambos tipos de humedales, presentando valores medios de eliminación del 52%, 40%, y 43% para N-orgánico, N-amoniacal y P-total, respectivamente.

En el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Horizontal se han detectado, con frecuencia, problemas de colmatación del sustrato filtrante en zonas aledañas a su alimentación [Pedescoll, 2101; García *et al.*, 2007]. Este hecho, unido a los menores requisitos de superficie y mejores rendimientos que presentan los Humedales de Flujo Vertical, está haciendo que paulatinamente se vayan implantado estos últimos con una mayor frecuencia [Brix *et al.*, 2005].

Los Humedales Artificiales de Flujo Superficial se emplean, básicamente, como tratamiento de afino. Como ejemplo emblemático de este tipo de uso cabe destacar la instala-

ción de Empuriabrava (Girona), puesta en servicio en 1998 y que consta de tres humedales de flujo superficial dispuestos en paralelo, que se alimentan con los efluentes de la EDAR del municipio. La superficie unitaria de estos humedales se eleva a unos 8.000 m², con una profundidad media de la lámina de agua de 40 cm [Sala *et al.*, 2001].

Tras su paso por los humedales, las aguas fluyen a una zona inundable adyacente (Laguna Europa), de unos 44.000 m² de extensión, en las que el nivel de las aguas se reduce a 15-20 cm. A la salida de esta laguna, el agua se bombea al Parc dels Aiguamolls, a través de una tubería de 2,4 km, contando esta tubería con salida hacia la Laguna del Cortalet y con otras tomas destinadas al mantenimiento de los prados húmedos de la zona.



FIGURA 4. Humedales Artificiales de Empuriabrava (Girona). Fuente: Sistema d'Aiguamolls Construits d'Empuriabrava.

Parámetro	Efluente EDAR	Efluente humedales
pH	7,7	7,5
Conductividad (µS/cm)	4.400	3.900
Oxígeno disuelto (% saturación)	56	40
Turbidez (UNT)	2,2	2,1
Sólidos en suspensión (mg/l)	9,7	8,3
N _{amoniaco} (mg N/l)	1,4	1,1
N _{nitroso} (mg N/l)	0,20	0,05
N _{nitrico} (mg N/l)	2,6	0,6
NT _{inorgánico} (mg N/l)	4,1	1,7
P _{soluble} (mg P/l)	2,1	2,1
<i>Escherichiacoli</i> (UFC/100 ml)	1,54·10 ²	54

TABLA 1. EDAR y humedales de Empuriabrava (Girona).
Fuente: Consorci Costa Brava (2008).

La Tabla 1 muestra las características medias de los efluentes tratados en la EDAR de Empuriabrava y de las aguas a la salida de los Humedales Artificiales, a lo largo del año 2008, en el que el volumen total de efluentes tratados en los humedales se elevó a 1.017.782 m³, lo que supuso el 97% del total de aguas residuales tratadas en la EDAR de Empuriabrava en ese período [Consorci Costa Brava, 2008].

Como actuaciones más recientes deben mencionarse las actividades llevadas a cabo por el Ministerio de Medio Ambiente, en el marco del programa A.G.U.A., para el desarrollo sostenible de La Albufera de Valencia. Dentro de estas actividades cabe destacar la rehabilitación del Tancat de la Pipa (2009), antigua zona de cultivo de arroz, como Humedales de Flujo Superficial, de 40 hectáreas de superficie, para depurar las aguas procedentes de La Albufera, con las que se alimenta a los humedales.

Otros de los usos de los humedales artificiales es su empleo para la deshidratación de los fangos en exceso generados en las estaciones de tratamiento de las aguas residuales urbanas [Giraldi *et al.*, 2009; Nielsen, 2008]. En esencia se trata de humedales de flujo vertical, plantados generalmente con carrizo y que se alimentan, de forma dosificada, con fangos [Begg *et al.*, 2001]. Los lixiviados retornan de nuevo a cabe-



FIGURA 5. El Tancat de la Pipa (Valencia).

cera del tratamiento y las cargas superficiales de fangos que se recomiendan oscilan entre 50-60 kg MS/m².año.

Esta práctica, que comenzó a emplearse en Europa a finales de 1980, se extiende en la actualidad a numerosos países y

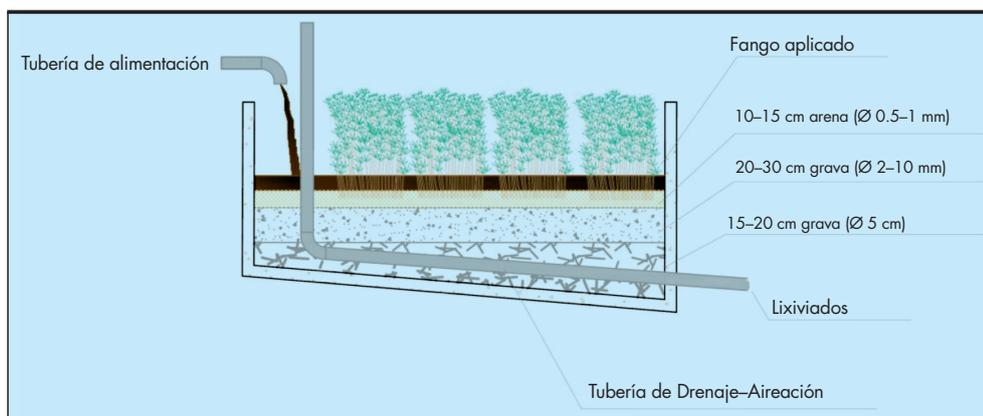


FIGURA 6. Corte transversal de un Humedal Artificial para el secado de lodos (Uggetti *et al.*, 2010).

comienza a implantarse en España, principalmente en Cataluña [Caselles-Osorio *et al.*, 2007; Huertas *et al.*, 2004].

El seguimiento de plantas a escala real, implantadas en Cataluña, arroja los siguientes resultados [Uggetti, 2011]:

- Se obtiene grados de sequedad de los fangos similares a los que se logran con los tratamientos convencionales de secado (16-30%).
- Los sólidos volátiles se reducen hasta el 30-49 % (SV/ST).
- El índice de respirometría dinámico presenta valores de 0,1-0,4 mg O₂ /g ST.h, lo que indica una parcial estabilización del producto final.

Las investigaciones que en la actualidad se llevan a cabo sobre la tecnología de Humedales artificiales se enfocan, principalmente, a:

- El estudio de los mecanismos de colmatación del sustrato filtrante y el desarrollo de posibles soluciones para minimizar esta colmatación [Pedescoll, 2010; Caselles-Osorio *et al.*, 2007; García *et al.*, 2007].
- La mejora en los rendimientos de eliminación de fósforo, mediante el empleo de sustratos filtrantes de características especiales [Xu *et al.*, 2006; Drizo *et al.*, 2000].
- La evaluación de la emisión de gases de efecto invernadero [Pícek *et al.*, 2007; Søvik *et al.*, 2007; Liikanen *et al.*, 2006].

2.5. MACROFITAS EN FLOTACIÓN

Las plantas emergentes toleran bien las condiciones de falta de oxígeno que se producen en suelos encharcados, al contar con canales internos, o zonas de aireación, que facilitan el paso del oxígeno desde las partes aéreas hasta la zona radicular [Tanner *et al.*, 2003; Crites *et al.*, 2006]. Las zonas radiculares y rizomáticas se entrelazan de forma natural, formando un manto que se mantiene suspendido en el interior de una balsa, canal o laguna, por la que circula el agua residual, que baña completamente dicho manto. La microfauna aerobia, que coloniza las raíces y los rizomas, es la responsable de la degradación de los contaminantes presentes en las aguas a tratar.

Se han desarrollado diversos sistemas para la fijación de las plantas en su fase inicial de plantación. Estos sistemas mantienen las plantas en posición vertical y favorecen la formación del manto radicular.

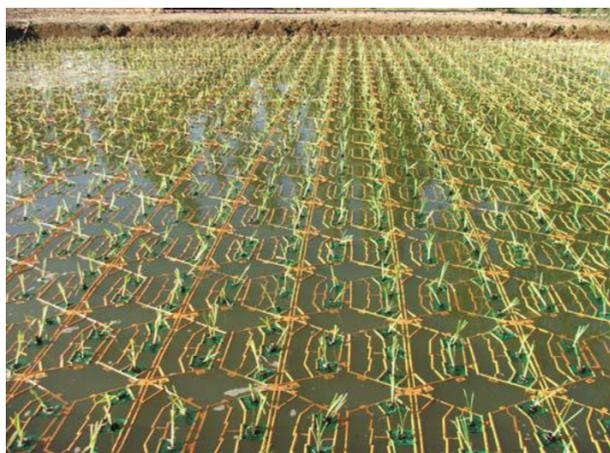


FIGURA 7. Sistema empleado para mantener en flotación los plantones. Fuente: Hidrolution S.L.

Previo a su ingreso a las balsas, o canales, con las plantas en flotación, las aguas a tratar se someten a etapas de desbaste y a tratamientos primarios, para reducir la presencia de sólidos en suspensión, tanto sedimentables como flotantes (fosas sépticas/tanques Imhoff).

La tecnología de fitodepuración utilizando plantas emergentes convertidas en flotantes, tales como las eneas, comenzó a desarrollarse por el Grupo de Agroenergética de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid, de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), al principio de los años 90 del pasado siglo.

El desarrollo de este sistema dio como consecuencia la presentación, por parte de la UPM, de una primera patente del sistema, conocida como FMF (Filtro de Macrófitas en Flotación), en el que el manto flotante está compuesto, exclusivamente, por las bases de los tallos, los rizomas y las raíces de las macrófitas, y flota libremente sobre la superficie del agua.

Actualmente el sistema FMF está siendo comercializado por la empresa Hidrolution S.L., que ha desarrollado unos soportes plásticos especiales, para la fijación de las plantas.

En la actualidad existen más de un centenar de instalaciones del sistema FMF, principalmente en pequeñas poblaciones de Castilla la Mancha (62), Castilla y León (38) y Madrid (15), que pueden agruparse en cuatro tipos de configuraciones diferentes:

- **Integradas:** depuradoras de nueva construcción, integradas generalmente por varias balsas impermeabilizadas, de distinta profundidad. En determinadas ocasiones (vertidos puntuales de alta carga, exceso de nitrógeno, poca superficie disponible), una de las balsas se complementa con un aireador (*depuradoras activadas*).
- **Recicladas:** depuradoras que se encuentran abandonadas, o funcionan deficientemente, y que se reconvierten al sistema FMF.
- **Combinadas:** depuradoras tradicionales de fangos activos, sobre las que se instala el sistema FMF.
- **Islas:** estructuras fabricadas en PVC, madera, y acero, que permiten crear islas flotantes del sistema FMF e introducirlas en láminas de aguas libres.

A modo de ejemplo la EDAR integrada de Los Cortijos (Ciudad Real) da servicio a una población de 1.400 habitantes equivalentes desde marzo de 2011. La línea de agua consta de: pretratamiento, un Decantador-Clarificador-Digestor



FIGURA 8. EDAR Los Cortijos (Ciudad Real). Fuente: Hidrolution S.L.-Constructora Aglomancha.

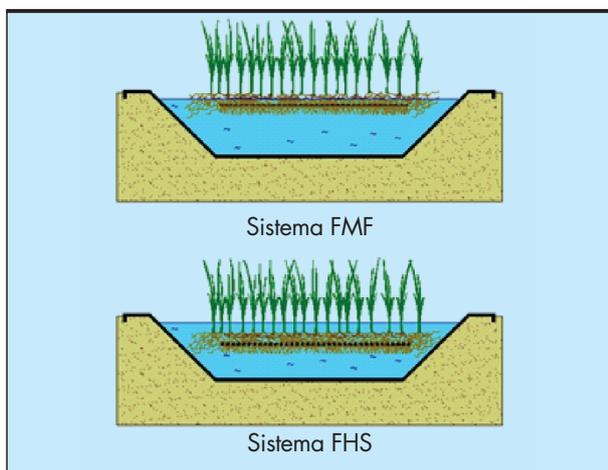


FIGURA 9. Esquema de las tecnologías FMF y FHS. Fuente: Fernández, J., UPM.



FIGURA 10. EDAR de Fabara (Zaragoza). Fuente: ETS Ing. Agrónomos. UPM.

(DCD) plantado, de 3,5 m de profundidad y 330 m² de superficie y dos balsas FMF, de 1,5 m de profundidad y de 600 m² de superficie unitaria. La relación m² de superficie plantada/habitantes equivalentes tratados se eleva a 1,1.

Con posterioridad, la UPM ha desarrollado y patentado un nuevo sistema de fitodepuración en flujo libre con plantas emergentes, cuya principal diferencia con el sistema FMF radica en la formación del tapiz vegetal (se realiza en el fondo del canal, con la ayuda de una red de polietileno), y la localización final de éste, en posición intermedia entre la superficie y el fondo del canal, con el objetivo de aumentar la oxigenación del agua, debido al intercambio de oxígeno con la atmósfera a través de la superficie del agua que queda libre (solamente atravesada por los tallos que emergen del manto sumergido). Este nuevo sistema se conoce como FHS (Filtro de Helofitas Semisumergido) y ha sido comercializado principalmente por la empresa Essentium. La Figura 9 muestra los esquemas de los sistemas FMF y FHS.

El sistema FHS instalado en la EDAR de Fabara (Zaragoza) consta de 18 canales, de 4 m de ancho y 45 m de longitud, conectados en serie, y recibe el agua residual de la población de Fabara (1.500 habitantes equivalente), tras pasar por un decantador Emsher. El sistema presenta una relación m² de superficie plantada/habitantes equivalentes tratados de 2,2.

Los fabricantes de ambos sistemas aseguran que se pueden alcanzar rendimientos de depuración superiores al 90% en eliminación de DBO₅ y de Sólidos en Suspensión.

El primer sistema (FMF), que es el más extendido, se encuentra actualmente sometido a estudio en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (Sevilla), con objeto de analizar detalladamente su comportamiento, bajo condiciones controladas, por parte de los técnicos del CENTA.

En la Tabla 2 se muestran los principales parámetros de diseño empleados por cada sistema.

Parámetro	Sistema FMF	Sistema FHS
Superficie de plantación requerida (m ² /he)	1 – 3	1,5 – 2,5
Tiempo de retención hidráulica (d)	7,5 – 10	> 5
Lugar de ubicación de las macrofitas	Balsas	Canales de anchura entre 2,5 y 4 m
Profundidad lámina de agua (m)	0,5 – 5	> 0,5
Plantas	Macrofitas emergentes	Fundamentalmente enneas o esparganios
Densidad de plantación inicial (plantas/m ²)	10,8 – 40,5	10
Mantenimiento	Tratamientos fitosanitarios	Segado 2 o 3 veces al año
Tiempo de entrada en funcionamiento	1 periodo vegetativo	1 año para alcanzar el máximo rendimiento
Pretratamiento	Desbaste+Desarenado+ Tamizado+Desengrasado	Desbaste+Fosa séptica/Tanque Imhoff

TABLA 2. Parámetros de diseño de los sistemas FMF y FHS.

Fuente: Hidrolution (Sistema FMF), ETS Ing. Agrónomos. UPM (Sistema FHS).

3. TENDENCIAS EN EL EMPLEO DE TECNOLOGÍAS INTENSIVAS

En las tecnologías intensivas, en función de cómo se encuentre la biomasa responsable de la degradación de los contaminantes, se distingue entre procesos con biomasa en suspensión (procesos de fangos activos) y procesos con biomasa adherida (procesos de biopelícula). En el grupo de los procesos de fangos activos el proceso más experimentado y extendido es el de Aireación Prolongada. Menos frecuente, en este rango de población, son los Reactores Secuenciales (Sequential Batch Reactor, SBR) cuya implantación se encuentra actualmente en expansión. En los últimos años se están introduciendo también los Biorreactores de Membranas (Membrane Bioreactor, BRM), pero fundamentalmente en el ámbito de las urbanizaciones o centros vacacionales con capacidad para asumir la complejidad de explotación de esta tecnología y sus altos consumos energéticos. Dada la falta de información sobre el comportamiento de los MBR en pequeñas aglomeraciones, no se contemplan en este artículo.

En el ámbito de los procesos de biopelícula, las tecnologías más empleadas y contrastadas vienen representadas por los Lechos Bacterianos y los Contactores Biológicos Rotativos (Rotating Biological Contactors, RBC). Como tecnologías con un desarrollo más reciente en el ámbito de las pequeñas aglomeraciones se encuentran los Lechos Aireados Sumergidos (Submerged Aerated Filter, SAF) y los Procesos Híbridos (Integrated Fix-film Activated Sludge, IFAS), que combinan procesos de biopelícula con procesos de biomasa en suspensión.

Todos los procesos intensivos pueden diseñarse y construirse en obra civil, con sus diferentes unidades separadas, o bien de forma compacta, mediante el empleo de equipos prefabricados. Cuanto más pequeño es el tamaño de población, más frecuente es la segunda opción, que resulta más económica, pero que dificulta la accesibilidad de los operarios, necesaria para llevar a cabo las operaciones de mantenimiento. Además, en estas pequeñas plantas compactas no siempre es posible el cumplimiento de los parámetros de diseño habitualmente recomendados. Para asegurar que este tipo de depuradoras permiten alcanzar y mantener un efluente de calidad, se ha desarrollado a nivel europeo el mercado CE [norma UNE-EN 12566-3], si bien es aplicable únicamente a plantas de menos de 50 habitantes equivalentes.

Se describe a continuación la situación actual de las tecnologías mencionadas, centrándose, especialmente, en los Reactores Secuenciales y los Lechos Aireados Sumergidos.

3.1. AIREACIÓN PROLONGADA

Como se ha comentado anteriormente es la tecnología más implantada actualmente en el rango de las pequeñas poblaciones, pese a que su aplicación a pequeña escala presenta complicaciones, principalmente relacionadas con la etapa de clarificación, que debe hacer frente a las fuertes variaciones de caudal que experimentan a lo largo del día las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas. Estas variaciones dan lugar a sobrecargas hidráulicas, que provocan la fuga de fangos en los efluentes depurados, con la consiguiente pérdida de calidad de los mismos.

Otro hándicap de esta tecnología es su elevado consumo energético, situado entre 2 y 2,5 kWh/kg DBO₅, superior al de otras tecnologías intensivas. Consumo que podría optimizarse mediante sistemas de regulación del aporte de oxígeno, pero que no suelen instalarse en las pequeñas unidades de tratamiento, en las que las que se tiende a simplificar, tanto a nivel de equipamiento como de control.

Pese a todo, las instalaciones basadas en la tecnología de Aireación Prolongada, con un buen diseño y operación, permi-

ten obtener efluentes tratados de elevada calidad, a la vez que se adaptan fácilmente para la eliminación de nitrógeno.

3.2. REACTORES SECUENCIALES (SBR)

El empleo de estos reactores está especialmente indicado para el tratamiento de aguas residuales generadas de forma discontinua, o irregular [Barjenbruch, 2012], lo que justifica su aplicación, cada vez mayor, en el rango de las pequeñas aglomeraciones urbanas.

Los SBR operan a baja carga y se caracterizan porque las fases de depuración del agua residual y la de separación del fango transcurren en el mismo depósito, extrayéndose el agua tratada del reactor de forma discontinua. Por ello, son más compactos que los sistemas de Aireación Prolongada, al integrar la etapa de decantación, lo que no hace necesario el bombeo de recirculación de fangos al reactor. Otra ventaja adicional estriba en que los SBR aseguran una decantación hidráulicamente estable.

El SBR puede trabajar con alimentación continua o intermitente y con una sola unidad o varias en paralelo. En pequeñas poblaciones se suele trabajar con alimentación intermitente, por lo que es necesario disponer de más de una línea de tratamiento, o de un depósito previo de almacenamiento. De esta forma se alimentan los reactores de forma más controlada y se mejora el régimen hidráulico de alimentación, separándose mejor las distintas etapas del proceso.

Las secuencias de operación pueden ser: con una duración del ciclo total constante (con lo cual el volumen de agua tratada en cada ciclo será distinto, dependiendo del caudal); o con una duración variable, pero manteniendo el mismo nivel máximo de llenado.

También es posible operar de forma intermedia entre ambas opciones [Merkblatt DWA-M 210, 2009].

La duración de los ciclos de operación puede modificarse de forma automática, en función de las variaciones en la alimentación del agua residual. En pequeñas aglomeraciones se suele trabajar con un único ciclo de duración total constante, que puede modificarse, de forma manual, en base a las analíticas realizadas y los cambios previstos en el agua residual, pues de lo contrario se requeriría de personal altamente cualificado en la planta y de un sistema de control adecuado.

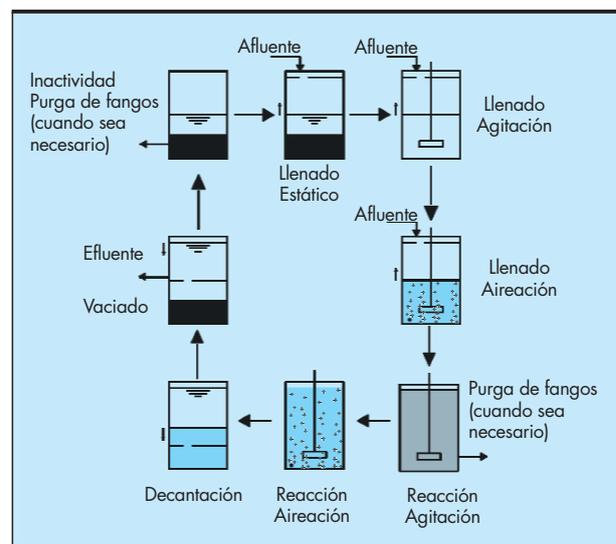


FIGURA 11. Ciclo de funcionamiento de un proceso SBR.



FIGURA 12. Reactores biológicos de las EDAR de Cercs y de Muntanyá.

CARACTERÍSTICAS DE LAS EDAR			
EDAR	Muntanyá	Guis de Cerdanya	Cercs
Nº líneas	2 (convencional + SBR)	2 SBR	2 SBR
Depósito previo	No	No	No
Volumen cubas	100 m ³ + 100 m ³ (SBR)	210 m ³ (por línea)	360 m ³ (por línea)
Tipo de reactor	Compactos prefabricados	De obra civil	De obra civil
Duración ciclo	8 h	4 h	
Fases del ciclo	[Llenado + aireación] + Decantación + Extracción (El llenado se produce durante la fase de aireación y tiene una duración variable en función del caudal. En Cercs el periodo de aireación es intermitente)		
Aireación	Aireadores eyectores	Soplantes con variador + difusores	Aireadores de aspiración con rotor sumergido
Regulación del aporte de aire	No existe regulación automatizada	En función del oxígeno disuelto	No existe regulación automatizada

TABLA 3. Características de depuradoras tipo SBR en Cataluña.
Fuente: Agencia Catalana del Agua (2011).

En varios estudios se ha observado un elevado rendimiento en eliminación de fósforo en sistemas secuenciales de alimentación continua, con concentraciones en el efluente final inferiores a 1 mg/l [CEDEX, 2009], por lo que convendría estudiar estos sistemas con mayor profundidad así como el potencial existente para la eliminación de este nutriente en sistemas de alimentación discontinua.

Cataluña es una de las regiones en las que más se ha implantado esta tecnología en pequeñas poblaciones. Actualmente, la Agencia Catalana del Agua tiene en explotación aproximadamente 30 instalaciones, la mayoría de ellas de tipo compacto prefabricadas, que dan servicio a poblaciones menores de 2.000 habitantes equivalentes.

En las Tablas 3 y 4 se recogen las principales características de tres de estas instalaciones (Muntanyá, Guis de Cerdanya y Cercs), así como la calidad del agua tratada en las mismas. Los resultados son valores medios de los análisis realizados durante un año de explotación y sobre muestras de tipo puntual. La depuradora de Muntayá dispone de dos líneas, que funcionan en paralelo, con aireación prolongada convencional y reactor secuencial, por lo que se recogen los resultados de la calidad del efluente correspondientes sólo a la línea SBR.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA TRATADA			
EDAR	Muntanyá	Guis de Cerdanya	Cercs
Caudal (m ³ /d)	70	271	457
DQO (mg/l)	69,6	22	27
DBO ₅ (mg/l)	–	2	3
SS (mg/l)	26,6	13	4
N _T (mg/l)	–	5	8,2
N-NO ₃ (mg/l)	4,7	3,7	0,7
N-NH ₄ (mg/l)	2,2	0,15	4,4
P _T (mg/l)	–	–	1,15

TABLA 4. Características del efluente en depuradoras tipo SBR en Cataluña.
Fuente: Agencia Catalana del Agua (2011).



FIGURA 13. EDAR de Lechos Bacterianos. Bernedo (Álava).

En la diferencia de calidad que se aprecia entre la EDAR de Muntayá y las otras dos, puede influir la diferente composición del agua bruta de entrada, ya que en el primer caso el agua de alimentación presenta, con frecuencia, puntas de contaminación superiores a 1.000 mg/l de DQO.

Las investigaciones que la actualidad se llevan a cabo sobre la tecnología SBR se enfocan principalmente a:

- Mejorar la eficiencia en eliminación de fósforo (Proyecto: Mejoras en el rendimiento de eliminación de fósforo en un reactor secuencial (SBR) para el tratamiento de aguas residuales, CENTA).
- El tratamiento conjunto de aguas residuales e industriales (Bay *et al.*, 2013).
- El desarrollo de métodos para la modelización y monitorización de los SBR (Aguado, 2005).

3.3. LECHOS BACTERIANOS

Constituyen la tecnología de biopelícula más extendida, contando con una larga tradición en el campo de la depuración de aguas residuales y que, con la aplicación como relleno de nue-

vos materiales plásticos, ha solventado antiguos problemas de colmatación del sustrato filtrante.

En aquellos casos en que se requiera eliminar nitrógeno, se puede alcanzar una desnitrificación parcial (siempre inferior a la que se consigue en fangos activos), bien utilizando el tratamiento primario como zona anóxica, o bien, realizando la desnitrificación en otro lecho bacteriano, que opera en alta carga y con elevadas recirculaciones, los que implica un elevado consumo eléctrico. En ambos casos se consiguen eliminaciones de N_T del orden del 60-65%.

Los Lechos Bacterianos tienen un consumo energético inferior al de los procesos de fangos activos (0,6-0,9 kWh/kg DBO_5), presentando una buena tolerancia a sobrecargas hidráulicas y orgánicas puntuales. Además, como el resto de procesos de biopelícula, son más adecuados que los procesos de fangos activos para el tratamiento de aguas residuales diluidas.

3.4. CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS (RBC)

El empleo de materiales adecuados (tanto en los ejes, como en el material soporte) ha permitido resolver los antiguos problemas mecánicos asociados a esta tecnología, que cuenta con instalaciones repartidas por todo el territorio.

Para la eliminación de nitrógeno existen diseños específicos, que desnitrifican en reactores anóxicos integrados en la propia unidad de depuración, permitiendo la eliminación parcial del nitrógeno previamente nitrificado. En la actualidad, varias casas comerciales ofrecen este tipo de diseños, pero aún no han sido suficientemente estudiados en España.

El consumo energético de los RBC es ligeramente inferior al de los Lechos Bacterianos (0,3-0,7 kWh/kg DBO_5).

3.5. LECHOS AIREADOS SUMERGIDOS (SAF)

En este tipo de reactores la biopelícula se desarrolla sobre un soporte sumergido y, en la mayoría de los casos fijo, sin movimiento alguno. El aire se introduce por la parte inferior, normalmente mediante el empleo de difusores de membrana. Requieren de una decantación primaria previa y una secundaria posterior. El agua puede introducirse en el reactor por la parte inferior, o superior (sistemas co-corriente o contracorriente). A diferencia de los biofiltros, no requieren operación de contralavado, y el control del crecimiento de la biopelícula se consigue mediante el rozamiento y el burbujeo provocados por la aireación.



FIGURA 14. Relleno plástico (izquierda) y formación de biopelícula en el soporte plástico (derecha). Fuente: Anox-Kaldnes.

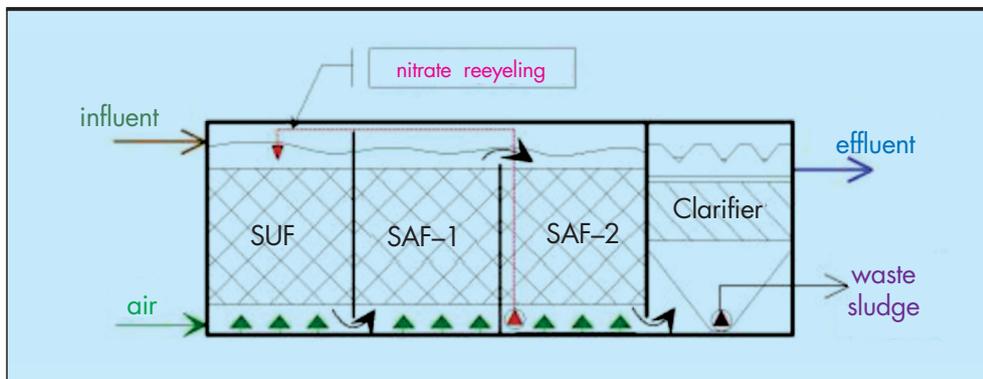


FIGURA 15. Esquema del reactor SAF (EDAR de Quenllo).

Es sin embargo inevitable, que tras un largo periodo de funcionamiento, la calidad del efluente se deteriore, debido al atascamiento del lecho, o al desprendimiento de biopelícula en exceso, que debe ser eliminada mediante retrolavado con aire, durante aproximadamente entre 10 y 20 minutos [Tejero, 2011].

Como medio soporte se emplean diversos tipos de relleno, estructurados o de elementos con formas diversas. Se suelen emplear medios plásticos con elevado porcentaje de huecos y con una superficie específica máxima del orden de varios cientos de m^2/m^3 .

La combinación de unidades SAF aireadas y no aireadas permite la eliminación de nitrógeno en el efluente.

Los SAF presentan una elevada tolerancia a las fluctuaciones en la cantidad y calidad de los influentes a tratar, su mantenimiento es simple y baja su generación de fangos [Tejero, 2011]. Además son sistemas compactos y robustos, por lo que resultan especialmente apropiados para el tratamiento de las aguas residuales generadas en pequeñas aglomeraciones. [Novoa *et al.*, 2012].

En Galicia existen varias instalaciones que disponen de esta tecnología, caso de la EDAR de Quenllo (2.000 h.e.) y la de Abegondo (200 h.e.). El seguimiento durante un año de esta última instalación dio como resultado un 90%, de media, de eliminación de DBO_5 y un 75% de eliminación de N_T , tra-

bajando en un rango de carga orgánica de 0,25-1,4 $kg\ DBO_5/m^3.d$, siendo el valor de diseño de 0,5 $kg\ DBO_5/m^3.d$. El consumo energético se optimizó mediante el empleo de aireación intermitente, pasando de 1,6 $kWh/kg\ DBO_5$ a 0,2 $kWh/kg\ DBO_5$ [Novoa *et al.*, 2012].

3.6. PROCESOS HÍBRIDOS (IFAS)

El sistema híbrido de Biomasa Fija sobre Lecho Móvil combinado con Fangos Activos, ha sido empleado por Navarra de Infraestructuras Locales S.A. (NILSA) en varias de sus instalaciones. La ampliación de plantas ya existentes y con falta de espacio, constituye una de las aplicaciones más interesantes de estos procesos.

La EDAR de Isaba en Navarra, con capacidad de 230 m^3/d , fue ampliada mediante el uso de esta tecnología. Inicialmente, la EDAR constaba de un sistema de biodiscos, que únicamente eliminaba materia orgánica. La adición de un reactor híbrido (IFAS), con recirculación a cabecera de parte de los fangos decantados, ha mejorado la calidad del efluente final, en el que se reduce no sólo materia orgánica, sino también nitrógeno total. Además, la conversión del antiguo decantador primario en un reactor anaerobio en cabecera del proceso, al que se envían los fangos recirculados, favorece la eliminación parcial del fósforo.



FIGURA 16. Reactor SAF y relleno estructurado (Bionet) (EDAR de Quenllo).

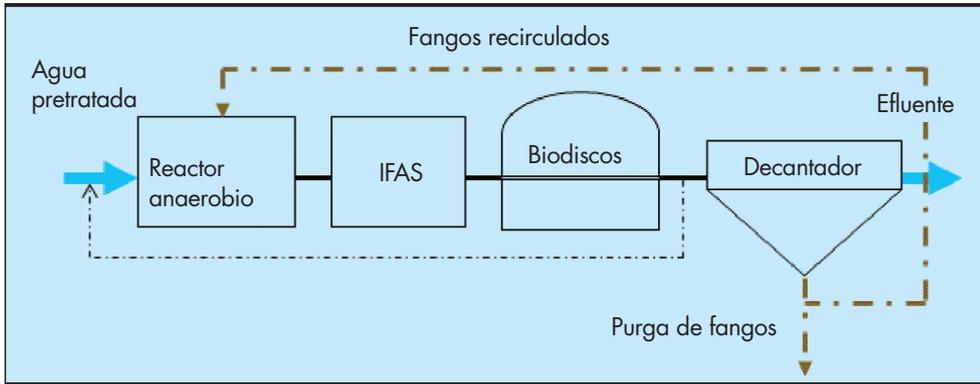


FIGURA 17. Diagrama de Flujo de la EDAR de Isaba.

4. COMBINACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO

En determinadas ocasiones, la aplicación de una tecnología aislada no permite alcanzar la calidad exigida al efluente final. En estos casos, es posible optar por la combinación de dos o más tecnologías, o de algunas de sus etapas, al objeto de aprovechar los puntos fuertes que presente una tecnología para solventar las deficiencias y carencias de otra y, de esta manera, crear sinergias.

La combinación de tecnologías, además de permitir el vertido conforme de las aguas depuradas al medio ambiente, también puede perseguir otros fines, como:

- Simplificar y abaratar la gestión de los fangos.
- El vertido de los efluentes depurados al terreno cuando no existe cauce próximo.
- Desinfectar y almacenar los efluentes depurados.
- Homogeneizar la calidad del vertido final.
- Aprovechar infraestructuras existentes (reciclado de instalaciones obsoletas).
- Eliminar nutrientes.

Entre las combinaciones de tecnologías más frecuentes cabe destacar:

- La implantación de una etapa anaerobia en cabecera del sistema de tratamiento para facilitar la gestión de los fangos en exceso.
- El empleo de sistemas de aplicación al terreno para el vertido de aguas depuradas.
- El uso de lagunas de maduración como tratamiento de desinfección.
- Combinaciones con filtros de turba (empleo de los filtros de turba como tratamiento previo; empleo de los

filtros de turba en sustitución de la etapa de decantación secundaria; empleo de los filtros de turba para la deshidratación de fangos).

- La aplicación de humedales artificiales de flujo superficial como tratamiento terciario.
- El empleo de humedales artificiales de flujo vertical en sustitución de la etapa de decantación secundaria.

5. TECNOLOGÍAS ACTUALMENTE EN FASE DE EXPERIMENTACIÓN Y DESARROLLO

En la actualidad, entre las tecnologías en fase de experimentación en el campo del tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas, se encuentran:

- La aplicación de técnicas de fotocatalisis solar para la desinfección y eliminación de contaminantes emergentes (Proyecto FOTOREG (UAL-CIEMAT, www.ual.es/Proyectos/FOTOREG/index.htm).
- El empleo de nanomateriales naturales, o modificados, en tecnologías de tratamiento de aguas residuales basadas en procesos de filtración. (Proyecto NANOWAT, www.nanowat.eu).
- La aplicación de técnicas bioelectrogénicas. La bioelectrogénesis es un novedoso proceso por el cual determinadas bacterias pueden oxidar materia orgánica y transferir directamente los electrones generados a una superficie sólida conductora como, por ejemplo, el grafito. De esta forma se puede obtener y almacenar energía limpia. (Proyecto AQUAELECTRA, www.aquaelectra.es).

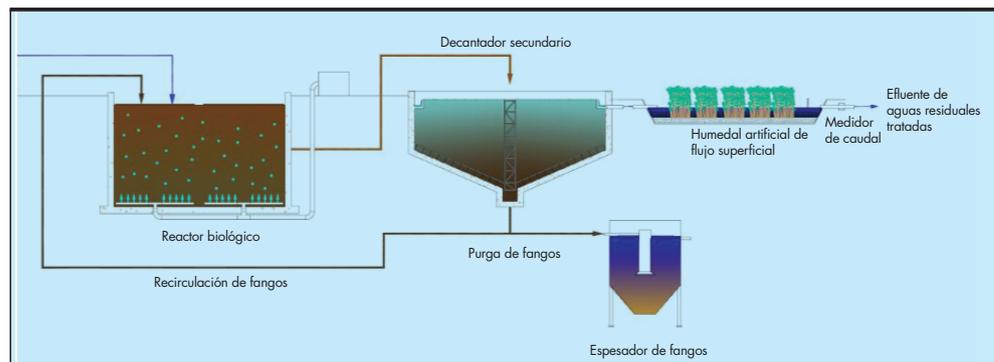


FIGURA 18. Diagrama de flujo de la combinación Aireación Prolongada-Humedal Artificial de Flujo Superficial.

6. REFERENCIAS

- Begg, J.S., Lavigne, R.L., Veneman, P.L.M. 2001. Reed beds: constructed wetlands for municipal wastewater treatment plant sludge dewatering. *WaterScience y Technology* 44, 393-398.
- Belchí, J.R. 1990. Desarrollo del lagunaje en la Región de Murcia. Jornadas sobre depuración de aguas residuales por Lagunaje. Murcia 27 Junio 1990.
- Barjenbruch, M. 2012. Wastewater disposal in rural areas. *Desalination y Water Treatment* 39, 291-295.
- Brix, H., Arias, C.A. 2005. The use of vertical flow constructed wetland for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering* 25(5). 491-500.
- Caselles-Osorio, A., Puigagut, J., Segú, E., Vaello, N., Granés, F., García, D., García, J. 2007. Solids accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. *Water Research* 41(6), 1388-1398.
- CEDEX. 2009. Estudio sobre el Funcionamiento de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales de las Poblaciones del Alto Duero.
- CEDEX-CENTA. 2009. Situación actual de la depuración de las aguas residuales en pequeñas poblaciones.
- Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25, 294-306.
- Consorci Costa Brava. 2008. http://www.ccbgi.org/análisis_completes/terciari_empuria-brava_PNAE_2008.pdf
- Drizo, A., Frost, C.A., Grace, J., Smith, K.A. 2000. Phosphate and ammonium distribution in a pilot scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. *Water Research* 34(9), 2483-2490.
- Fernández, J., de Miguel, E., de Miguel, J., Curt Fernández, M.D. 2005. Manual de Fitodepuración. Proyecto LIFE.
- García, J., Rousseau, D., Caselles-Osorio, A., Story, A., De Pauw, N., Vanrolleghem, P. 2007. Impact of prior physico-chemical treatment on the clogging process of subsurface flow constructed wetlands: Model-based evaluation. *Water, Air y Soil Pollution* 185(1-4), 101-109.
- Giraldi, D., Ianelli, R. 2009. Short-term water content analysis for the optimization of sludge dewatering in dedicated constructed wetlands (reed bed systems). *Desalination* 246, 92-99.
- Huertas, E., Güell, D., Folyc, M., Salgot, M., Torrens, A. 2004. Reed bed for sludge dewatering in Catalonia (Spain). In: *Proceedings of the 9th International Conference on Wetland System*, Avignon, France. Liénard A. (Ed).
- Liikanen, A., Huttenen, J.T., Karjalainen, S.M., Heikkinen, K., Väisänen, T.S., Nykänen, H., Martikainen, P.J. 2006. Temporal and seasonal changes in green-house gas emissions from a constructed wetland purifying peat mining runoff waters. *Ecological Engineering* 26, 241-251.
- Massa, M.P. 1988. Tratamiento biológico de las aguas residuales. Lagunas de estabilización. Hojas Divulgadoras, núm. 10/88. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. ISBN: 84-341-0585-3.
- Merkblatt DWA-M 210. 2009. Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb.
- MOPT. 1991. Depuración por Lagunaje de Aguas Residuales. Manual de Operadores. *Monografías de la Secretariade Estado para las Políticas del Agua y el Medio Ambiente*. Centro de Publicaciones del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid.
- Nielsen S. 2008. Sludge treatment y drying reed bed systems 20 years of experience. *Processing of Conference: European Conference on Sludge Treatment*. 1-2 September, Liège (Belgium).
- Novoa, R., Molina, J., Jácome, A., Suárez, J., Ferreira, S. 2012. Removal of carbon y nitrogen of municipal wastewater with submerged filters. Experience from a full scale plant. Libro de Actas. X Reunión Mesa Española de Tratamiento de Aguas. Almería, 4 a 6 de octubre. 295-298. ISBN: 978-84-15487-33-3.
- Ortega, E., Ferrer, Y., Salas, J.J., Aragón, C., Real, A. 2010. Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. ISBN: 978-84-491-1071-9.
- Pedescoll, A. 2010. Clogging in horizontal subsurface flow constructed wetlands. Mesures, design factors y prevention strategies. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Proyecto ALL-GAS: Industrial scale demonstration of sustainable algae cultures for biofuel production. http://www.biofatproject.eu/resources/pdf/FUEL_36-41_Algae-Biofuel.pdf
- Pizek, T., Cizkova, H., Dusek, J. 2007. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland plant as important sources of carbon. *Ecological Engineering* 31, 98-106.
- Puigagut, J., Villaseñor, J., Salas, J.J., Bécares, E., García, J. 2007. Subsurface-flow constructed wetlands in Spain for the sanitation of small communities: a comparative study. *Ecological Engineering* 30(4), 312-319.
- Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Sala, L., Romero de Tejada, S., Huguet, A., Marquès, E. 2001. El proyecto de reutilización de aguas para usos ambientales en la laguna del Cortalet, Empuriabrava. "La gestión del agua en los Aiguamolls". Comunicación presentada en el marco de Doñana 2005: *Segunda Reunión Internacional de Expertos en la Regeneración Hídrica de Doñana, Huelva*, 26-28 Noviembre 2001.
- Salas, J.J. 2008. Tratamiento de las aguas residuales urbanas mediante Filtros de Turba: modificaciones en el diseño y empleos alternativos. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- Søvik, A.K., Augustin, J., Heikkine, K., Huttenen, J.T., Necki, J.M., Karjalainen, S.M., Kløve, B., Liikanen, A., Mander, Ü, Puustinen, M., Teiter, S., Wachniew, P. 2006. Emission of the greenhouse gases nitrous oxide y methane from constructed wetlands in Europe. *Journal of Environmental Quality* 35, 2360-2373.
- Tejero, I. 2011. Procesos Biológicos de Película Fija. XXIX Curso sobre Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras (CEDEX).
- Ugetti, E. 2011. Sewage Sludge Treatment in Constructed Wetlands. Technical, economic y environmental aspects applied to small communities of the Mediterranean Region. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Xu, D., Xu, J., Wu, J., Muhammad, A. 2006. Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates in constructed wetlands. *Chemosphere* 63, 344-352.