Innovaciones en los humedales: las SBN para el tratamiento de las aguas residuales urbanas

Rafael Marín Galvín, jefe de Control de Calidad de Emacsa y director de la Cátedra Emacsa; **Juan José Salas Rodríguez**, médico del agua; **Alessandro Pagani**, responsable de ventas para España de SSI Aeration; **Alfredo Santiago Rodríguez Martínez**, *partner* de APM Agua Ibérica; **Pablo Pérez Robla**, CEO y fundador de Aquacorp

Las soluciones basadas en la naturaleza (SBN) son estrategias que usan los principios y dinámicas naturales para solucionar problemas relacionados con la gestión territorial y urbana, tales como la adaptación al cambio climático, la gestión de los recursos y del agua, la seguridad alimentaria o la calidad del aire y el entorno. Se trata de herramientas útiles, económicas y con el valor añadido en ahorro de costes y generación de empleo local, que ayudan, además, a desarrollar las ciudades con un enfoque sostenible para ser resilientes, saludables y, en definitiva, habitables y vivas. El término SBN fue impulsado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) y el Banco Mundial a finales de la década de 2000, siendo después adoptado por la Comisión Europea, y estando alineado con la Agenda 2030 y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. Los humedales reproducen los mecanismos de eliminación de las sustancias contaminantes que se dan en las zonas húmedas naturales. Para ello se hacen pasar las aguas residuales por zonas húmedas artificiales en las que se dan procesos físicos, químicos y biológicos en que participan: agua residual, medio filtrante y plantas emergentes acuáticas. Actualmente, los humedales constituyen el tratamiento extensivo con un mayor grado de implantación a nivel mundial para el tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas. La Cátedra Emacsa celebró el próximo 29 de octubre la jornada técnica 'Humedales Urbanos Innovadores. Soluciones basadas en la naturaleza para depurar aguas residuales', un encuentro que reunió a especialistas y técnicos del sector para analizar los últimos avances en el uso de humedales artificiales como sistemas naturales de depuración. Este reportaje es un resumen de la misma.

INTRODUCCIÓN A LAS SBN

La jornada fue una iniactiva más de la Cátedra Emacsa enfocada a tratar en este tipo de eventos toda la casuística dimanada de lo que comporta la gestión operativa del ciclo integral del agua urbana. Todas las SBN, que siendo objetivos sería la forma de abordar la depuración de todas las aguas residuales urbanas, son enfoques, acciones, estrategias o procesos que utilizan los principios de la naturaleza (basados en el conocido proceso de la autodepuración natural de las aguas) para intentar dar una solución sostenible a los distintos problemas experimentados por la sociedad actual. Dentro de ellos se engloba la gestión territorial y urbana, la adaptación al imparable cambio climático, la gestión de los recursos y del agua, la seguridad alimentaria, o la calidad del aire y el medio ambiente. En una sociedad cada vez más urbana, las SBN son herramientas útiles, económicas y con valor añadido en ahorro de costes y generación de empleo local. Además, ayudan a desarrollar las ciudades con un enfoque medioambientalmente sostenible.

El término SBN fue presentado por iniciativa de UICN y el Banco Mundial a finales de la década de 2000 y posteriormente adoptado por los responsables de la Comisión Europea. Hoy en día, las SBN están perfectamente alineadas con el programa de la Agenda 2030 y pueden contribuir a que una región alcance distintos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) marcados por la ONU. Asimismo, sus principios están también recogidos en la Nueva Agenda Urbana (Habitat III. Naciones Unidas, Quito 2016) y trasladados al contexto español en la Agenda Urbana Española (Ministerio de Fomento, 2019).

Los humedales para el tratamiento de las aguas residuales constituyen una SBN que reproduce los mecanismos de eliminación de las sustancias contaminantes que se dan en las zonas húmedas naturales. La depuración de las aguas tiene lugar al hacerlas pasar por zonas húmedas artificiales en las que se dan, conjuntamente, procesos físicos, químicos y biológicos, constituyendo un ecosistema complejo, en el que participan el agua residual a depurar, el medio filtrante y las plantas emergentes acuáticas (helófitas) allí desarrolladas.

En la actualidad, los humedales constituyen el tratamiento extensivo con un mayor grado de implantación a nivel mundial, para el tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas. Esta cuestión presenta ahora una mayor relevancia práctica, ya que la nueva Directiva (UE) 2024/3019 sobre tratamiento de aguas residuales establece la obligatoriedad de aplicar la depuración consiguiendo los rendimientos de la misma establecidos anteriormente (especialmente en sólidos en suspensión -35 mg/L-, demanda bioquímica de oxígeno -25 mg/L- y demanda química de oxígeno -125 mg/L-) para las aglomeraciones urbanas de hasta 1.000 habitantes equivalente (he) en todo el territorio de la Unión Europea en los plazos establecidos, a las que también aplica la reducción de contaminantes de preocupación emergente al 80% mínimo de los presentes en el agua residual bruta de los saneamientos europeos.

Por lo dicho, en este ámbito se desarrollan innovaciones técnicas que tienden, fundamentalmente, a reducir los requisitos de superficie para la implantación de los humedales, y a dotarlos de una mayor capacidad para el control de su funcionamiento. Presentar algunas de estas innovaciones técnicas constituyó el objetivo fundamental de esta jornada de la mano de las empresas punteras que trabajan en este campo.

DESARROLLO DE LA JORNADA

La Jornada se enmarcó en las actividades llevadas a cabo por la Cátedra Emacsa en el apartado de organizar foros de expertos para actualizar el estado del arte en los diferentes aspectos que comporta el ciclo integral del agua urbana. La organización contó con el patrocinio de Emacsa y de la Universidad de Córdoba, desarrollándose en el salón de actos de Emacsa-Córdoba el pasado día 29 de octubre de 2025. En la mesa inaugural se contó con la presencia del presidente de Emacsa y teniente de alcalde de Sostenibilidad y Medio Ambiente del Ayuntamiento de Córdoba, Daniel García-Ibarrola Díaz, de la decana de la Facultad de Ciencias, Mari Paz Aguilar Caballos, y del director de la Cátedra Emacsa, Rafael Marín Galvín.

Con respecto al contenido práctico de la jornada, se expusieron cuatro ponencias, finalizando con una mesa redonda con la intervención de ponentes y del director de la Cátedra. Las ponencias expuestas fueron, por orden de intervención, las siguientes:

- 'Introducción a los humedales para el tratamiento de las aguas residuales'. A cargo de Juan José Salas Rodríguez, exdirector de I+D+i de la Fundación CENTA (Centro Experimental de Nuevas Tecnologías del Agua, ubicado en Carrión de los Céspedes -Sevilla- de la Junta de Andalucía).
- 'Tecnologías Intext. Humedales aireados. Sistemas de aireación.

Casos de éxito'. Expuesta por el ingeniero Alessandro Pagani, de la empresa SSI Aeration.

- 'Humedales en flotación (FHS). Sistemas solares flotantes (SFS). Casos de éxito'. Desarrollada por Alfredo Santiago Rodríguez Martínez, de la empresa APM Agua Ibérica.
- 'Monitorización por imagen del comportamiento de los humedales para el tratamiento de las aguas residuales. Casos de éxito'. Contó con Pablo Pérez Robla, de la empresa Aquacorp, como ponente.

Tras las cuatro ponencias se desarrolló una mesa redonda que profundizó sobre los temas tratados en las ponencias y respondió a las varias cuestiones planteadas por el público asistente, más de 70 técnicos y responsables de diferentes empresas y administraciones relacionadas con el sector del agua (tanto a nivel de Córdoba como a nivel regional). A continuación se recoge lo más relevante de las cuatro exposiciones presentadas en el evento.

INTRODUCCIÓN A LOS HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Los humedales para el tratamiento de aguas residuales se inician con las investigaciones de la doctora Seidel en el Instituto Max Planck de Alemania en 1952. Posteriormente, en 1971 ya se construyó el primer humedal en Hougthon (Michigan, Estados Unidos) destinado a la depuración de aguas residuales urbanas. Por su parte, la tecnología se traslada a Europa en Othfresen (Alemania Occidental) tres años más tarde (1974). Desde entonces se va asentando y, en 1980, aparecen los primeros criterios de diseño, experimentándose a partir de aquí un gran auge, al emplear áridos como sustrato para conseguir la fijación de la vegetación y la filtración biológica de las aguas residuales a tratar.

FIGURA 1. Las dos tipologías de sistemas de depuración de aguas residuales basados en la naturaleza y características más relevantes.

Puede afirmarse que se trata de una tecnología consolidada y contrastada, y que bien explotada garantiza un alto rendimiento de depuración. En todo caso recuérdese que la depuración aerobia de aguas residuales urbanas se ajusta a la ecuación bioquímica general:

$$\text{COHNS} + \text{Bacterias} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + NH_3 + \text{Nuevas bacterias} + \text{Energía}$$

siendo COHNS la materia orgánica presente en el agua y objeto de metabolización por parte de las bacterias aerobias implicadas en el proceso.

La depuración biológica aerobia puede llevarse a cabo mediante técnicas intensivas (las aplicadas en las EDAR municipales convencionales operadas, por ejemplo, por fangos activos o biodiscos) o extensivas, correspondiendo estas a los humedales. La diferencia fundamental entre ambas radica en que las extensivas no requieren aporte de energía (salvo la solar o eólica), pero sí superficies de implantación muy grandes (>1 m^2/he), mientras las intensivas sí necesitan energía externa (eléctrica), pero su implantación en superficie es muy inferior (<1 m^2/he).

En cuanto a las denominadas al principio como SBN, la **Figura 1** presenta los dos grandes grupos de tecnologías existentes, los sistemas acuáticos y los sistemas basados en sustrato, así como las características más relevantes de todos los tipos existentes. En esta figura se denotan, mediante rectángulos de líneas discontinuas, los humedales de flujo superficial como sistema acuático, y los humedales de flujo subsuperficial como sistemas basados en sustrato que, en realidad, son los dos sistemas más empleados en la práctica como humedales con dos variedades en cada uno, como se observa en la **Figura 2**.

Por otro lado, el funcionamiento depurador de los humedales horizontales requiere de un sistema de alimentación, integrado por una fosa séptica multicámara, que posibilita una decantación natural del agua residual a tratar. Desde aquí se distribuye el agua residual pretratada en la zona de cabecera del humedal, discurriendo de forma subsuperficial y en sentido horizontal, hacia la zona de salida, atravesando el sustrato filtrante y la zona radicular de la vegetación previamente plantada, que

FIGURA 2. Esquemas de humedales de flujo superficial y de humedales de flujo subsuperficial.

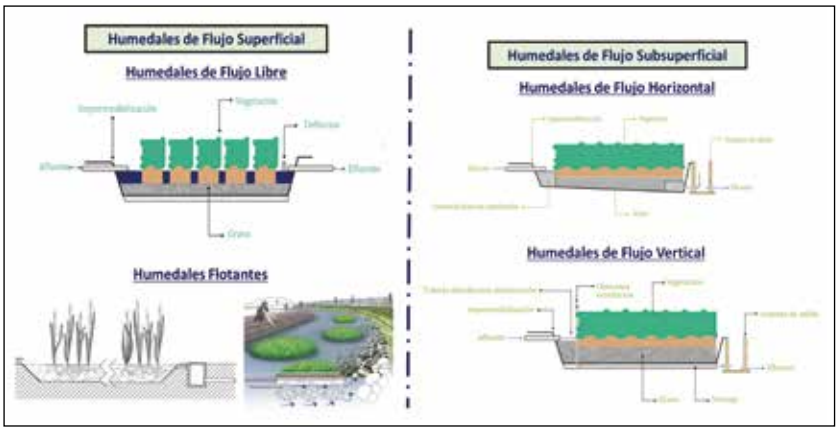


FIGURA 3. Funcionamiento de un humedal de flujo horizontal (izquierda) con crecimiento de un carrizal y de flujo vertical (derecha).

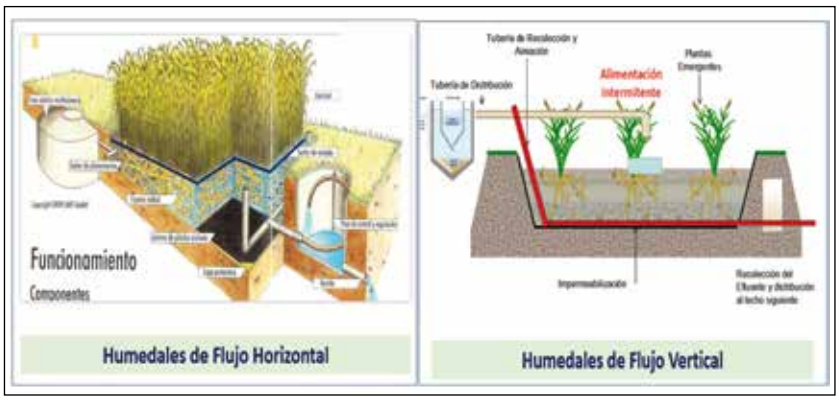


FIGURA 4. Funcionamiento de un humedal de flujo vertical.

dispone así tanto de agua como de nutrientes (N y P) para su desarrollo. En el sustrato filtrante y en los rizomas y raíces de las plantas se forma una biopelícula,que es la principal responsable de los procesos de depuración que se dan en este tipo de humedales. Finalmente, por la parte inferior del humedal, y a través de una tubería de altura regulable, se recoge el agua ya depurada en un pozo final para control, desde donde se vehicula a vertido o su uso posterior (**Figura 3** izquierda).

En cuanto a los humedales de flujo vertical (**Figura 3** derecha), la alimentación del agua residual pretratada se produce en altura y de forma intermitente, mientras que en los de flujo horizontal la alimentación es en continuo. Además, en ambos casos, el receptáculo donde se ubican los sistemas debe estar revestido de una lámina impermeabilizante al objeto de preservar al terreno circundante de la potencial afección del humedal.

Dentro de los humedales de flujo vertical se encuentra el denominado modelo francés, que conjuga la gestión conjunta de agua residual y de lodos generados (**Figura 4**). Se trata de humedales subsuperficiales de flujo vertical. En estos, el agua residual tras desbaste y desarenado, alimenta en una primera etapa a un humedal, de los tres disponibles en el sistema completo, durante un período de 3-4 días. Posteriormente, se establece un período de reposo de al menos el doble de la duración de la fase anterior, es decir, 6-8 días.

En una segunda etapa, el agua procedente de la primera etapa alimenta otro único filtro durante 3-4 días que después se deja en reposo otros 3-4 días. Por último, el agua depurada se recoge al final del sistema. Los lodos que se van acumulando en los humedales de la primera etapa se extraen cada 10 años junto con la parte aérea de la vegetación, para su posterior compostaje.

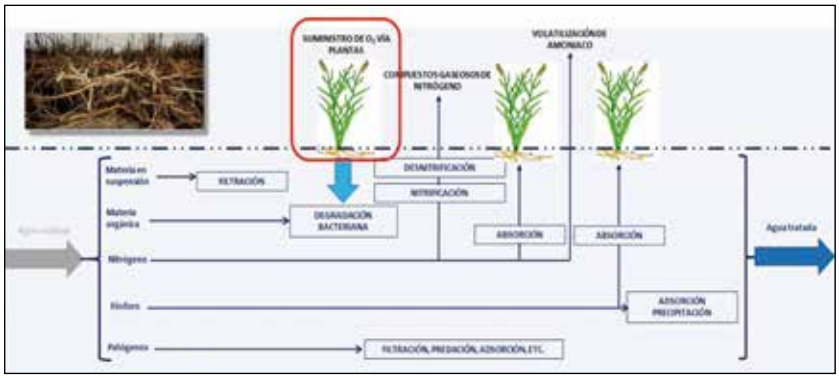
Como ejemplo práctico de estos sistemas, el de la EDAR de Castelserás (Teruel) de 2018 diseñado para 1.200 he., cuenta con 6 lechos en la etapa 1, y otros 4 en la etapa 2, supuso una inversión de 424 €/he y un coste de mantenimiento de 4,2 €/he/año. Con este sistema se genera agua residual depurada con valores de DQO entre <20 mg/L y 81 mg/L, de DBO_5 entre <2 mg/L y 20 mg/L, y de S_{SUSP} entre 2 y 6 mg/L, cumpliendo los límites establecidos en la normativa vigente (RD 11/1995) sobre depuración de aguas residuales ur-

banas, que no varían de los recogidos en la Directiva (UE) 2024/3019.

En la **Figura 5** se presenta el esquema de actuación de los humedales para eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual urbana. Se observa, por un lado, que mediante filtración se elimina la materia en suspensión y, por otro lado, que mediante degradación bacteriana se metaboliza la materia orgánica. En cuanto a la eliminación de N, concurren fenómenos de nitrificación y desnitrificación vía bacteriana, absorción por la masa vegetal del humedal, existiendo además una salida de amoníaco al medio. Con respecto al P, se elimina mediante absorción por las plantas así como por procesos de precipitación en el terreno. Finalmente, los patógenos presentes se eliminan a través de mecanismos de absorción, predación y filtración a través del material filtrante.

En cuanto al aporte de oxígeno, las plantas helófitas que se emplean en los humedales y que se desarrollan en ambientes encharcados cuentan con un sistema interno compuesto por canales internos huecos, denominado arénquima, que transporta el oxígeno que desde el ambiente externo es captado vía difusión por hojas y tallos a la zona radicular inferior (rizosoma) rica en bacterias aerobias. Asimismo, la alimentación intermitente de agua residual al humedal favorece la oxigenación cíclica del terreno de desarrollo de las plantas.

FIGURA 5. Mecanismo de eliminación de contaminantes en humedales.



Los rendimientos medios obtenidos con humedales para depuración de aguas residuales urbanas se recogen en la **Tabla 1**. En los tres tipos considerados, horizontales, verticales y del tipo francés, la eliminación de S_{SUSP} y DQO superan, respectivamente, el 80% y el 90%, mientras que la reducción de nitrógeno amoniacal es muy superior en los verticales y de tipo francés, y la de nitrógeno total es más alta en los horizontales que en el resto. Con respecto al fósforo, su reducción puede llegar hasta el 20%. Además, la reducción de coliformes oscila entre 1 y 4 unidades logarítmicas. Estos resultados, en general, son similares a los conseguidos con sistemas de aeración prolongada de aguas residuales urbanas.

De lo dicho se observa que el principal hándicap de los humedales y de la aireación prolongada es el de la eliminación de N y P, cuyos niveles máximos se limitan en la nueva Directiva (UE) 2024/3019 a 10 mg/L de Nt, y a 0,7 mg/L de Pt para las EDAR de >10.000 he y <150.000 he.

Para mejorar este aspecto, se puede recurrir a la conjunción de humedales verticales y horizontales, para conseguir fenómenos de nitrificación y desnitrificación como se observa en la **Figura 6**, y al uso de suplementos con adsorbentes selectivos de P o incluso con sales de Fe o Al, o incluso emplear fangos procedentes de potabilización de aguas a fin de lograr la adsorción del P, secuestrándolo del agua (**Figura 7**) y logrando niveles residuales <2 mg/L. Además, en cuanto a los microcontaminantes, existen varios estudios especialmente en Suiza, que demuestran que estos sistemas pueden ser eficaces en su reducción en aguas depuradas.

Siguiendo con este punto, otra limitación de los humedales es su carácter extensivo que comporta una alta necesidad de terreno, de >1 m^2/he, y su falta de control al ser proce-

TABLA 1

RENDIMIENTOS DE DEPURACIÓN CONSEGUIDOS CON HUMEDALES DE DIFERENTE TIPOLOGÍA

Parámetro	FH	FV	FV tipo francés
Etapa de tratamiento (aplicación principal)	Secundario	Secundario	Combinado primario y secundario
Sólidos suspendidos totales	>80%	>90%	>90%
Materia orgánica (medida como demanda de oxígeno)	>80%	>90%	>90%
Nitrógeno amoniacal	20-30%	>90%	>90%
Nitrógeno total	30-50%	<20%	<20%
Fósforo total (a largo plazo)	10-20%	10-20%	10-20%
Coliformes	2 log_{10}	2-4 log_{10}	1-3 log_{10}

sos totalmente naturales, si bien su consumo energético es muy modesto con respecto a las técnicas intensivas, con una media de 0,1 KWh/m^3, frente a 0,4 KWh/m^3 en técnicas intensivas. Esto hace que se estén desarrollando sistemas mixtos de depuración 'extensivos/intensivos', como es el caso de los humedales aireados.

En cuanto a la implantación de estos sistemas en España, en 2007, se contaba con unos tres, mientras abundaban en Europa. En Francia existen actualmente unos 3.500, generalmente en poblaciones de menos de 5.000 habitantes. En Dinamarca se están construyendo unos 100 humedales al año, existiendo también en Alemania, Reino Unido, Austria, Chequia, Croacia, Polonia y Eslovenia, así como en China y en Hispanoamérica (Brasil, Colombia y Costa Rica). En este sentido, la existencia de guías para diseño y construcción de humedales, como ocurre en Dinamarca, Alemania, Austria y Brasil, es imprescindible para potenciar esta tecnología, no contándose aún en España con tal documento.

TECNOLOGÍAS INTEXT. HUMEDALES AIREADOS. SISTEMAS DE AIREACIÓN. CASOS DE ÉXITO

La ponencia se ocupó de las tecnologías intensivas + extensivas (denominadas Intext) o, lo que es lo mismo, de potenciar los sistemas extensivos con modificaciones aplicadas en depuración convencional para su optimización. Se parte de lagunas ya existentes impermeabilizadas de geomembrana a las que se incorporan sistemas de difusión de aire, de acero y fijados al fondo mediante contrapesos de hormigón, o bien dispuestos en flotación sobre la superficie de la laguna (**Figura 8**, experiencias de la empresa SSI Aeration).

FIGURA 6. Adaptaciones para mejorar la eliminación de N en humedales.

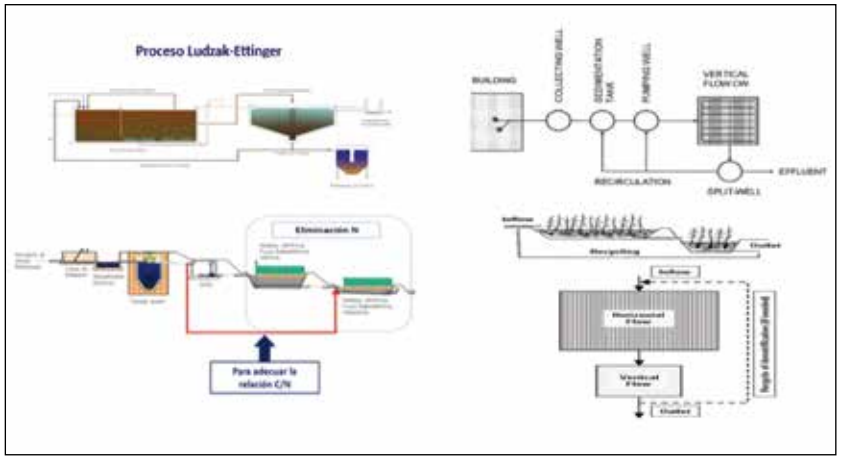


FIGURA 7. Adaptaciones para mejorar la eliminación de P en humedales.

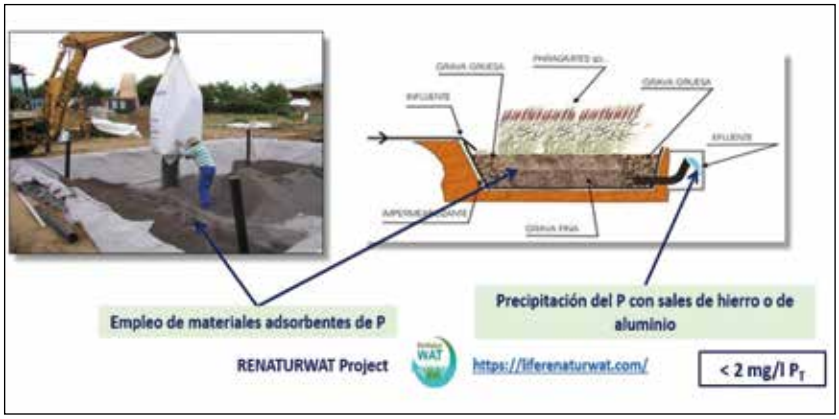


FIGURA 8. Sistema de lagunaje con dosificación de aire desde el fondo (arriba) o flotantes (abajo).

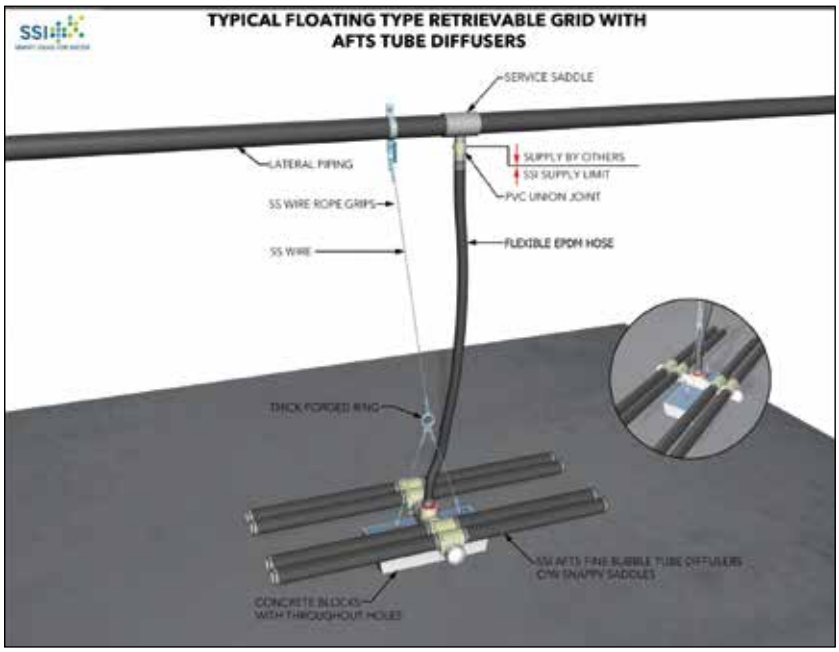
En este segundo caso, los tubos flotantes suelen ser de EPDM, etileno propileno dieno monómero, los cuales se insertan desde parrillas de distribución ubicadas en el fondo. La **Figura 9** presenta un esquema de este tipo de sistemas. Aquí se emplea difusión mediante burbujas de aire finas SSITM siendo los tubos empleados de diámetro 2" o 3", resistentes hasta temperaturas de 100ºC, y estando recubiertos de una membrana con bajos contenidos en plastificante al objeto de reducir la contracción y la pérdida de elasticidad con el tiempo.

Como más datos de interés, el caudal de trabajo de los difusores se sitúa entre 2,5 y 10 m^3 estándar de aire/hora, con una eficiencia estándar de transferencia de oxígeno (SOTE) entre 6-7%/m. Como caso de éxito se cita la planta de Ellicottville en Nueva York (Estados Unidos) que opera mediante fangos activos.

En cuanto a los difusores de burbuja fina comercializados por la empresa SSI Aeration, se fabrican en tecnología de un solo molde para reducir costes, en cuerpo de polipropileno con bajo contenido en plastificante para conseguir una mínima agresión ambiental, existiendo 4 versiones de tamaños 7, 9, 12 y 20" que presentan unas altas eficiencias SOTE, con una resistencia a deformación hasta una temperatura de 100ºC (**Figura 10**).

Por otro lado, cuando se usan difusores mediante módulos longitudinales flotantes, su diseño y emisión del caudal de aire facilitan la puesta en suspensión de los sólidos del agua, así como la ausencia de zonas anóxicas en el sistema.

FIGURA 9. Elementos de una disposición de tubos flotantes instalados en un lagunaje.



Con relación a las membranas, la empresa emplea dos compuestos: el politetrafluoroetileno (PTFE) como material base que es un material hidrófobo que permite proteger el EPDM, reduciendo la migración de plastificantes desde la membrana, así como la proliferación del *biofouling* microbiano y mitigando el efecto de los productos químicos agresivos. También el PEEK que es un polímero termoplástico (polieteretercetona) que limita el ataque de fosfatos y sulfatos que persisten tras lavado ácido, teniendo propiedades lubricantes y estando libre de PFA.

FIGURA 10. Difusores de burbuja fina de un solo cuerpo de SSI Aeration.

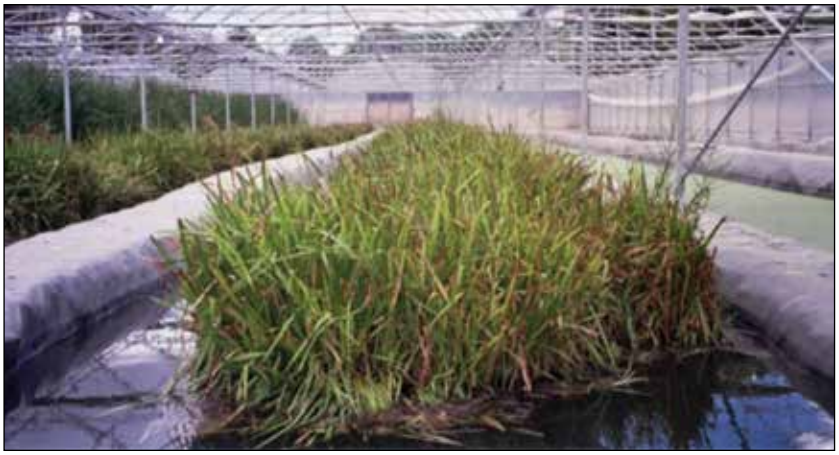
Finalmente, los difusores tanto discos como tubulares de SSI Aeration se han empleado con éxito en Estados Unidos, Europa, Corea, India, China y Emiratos Árabes.

HUMEDALES EN FLOTACIÓN (FHS). SISTEMAS SOLARES FLOTANTES (SFS). CASOS DE ÉXITO

Sobre este tema versó la exposición de la empresa APM Agua Ibérica, que se dedica a la implantación de tecnología de humedales flotantes por medio de filtros de plantas helófitas semisumergidas o flotantes (FHS/FMF/FVF/TST) para el tratamiento natural de aguas residuales y en general, contaminadas. Estos sistemas de humedales FHS son los únicos capaces de cumplir en el tiempo con las normas de calidad de agua, y sin colmatación de los lechos filtrantes.

Los humedales en flotación comienzan a investigarse en la Universidad Politécnica de Madrid en 1997, lo que genera una patente

FIGURA 11. EDAR de filtros de macrófitas en flotación del aeropuerto de Barajas, 1998 (APM Agua Ibérica).



por parte del doctor Jesús Fernández relativa a los filtros de macrófitas en flotación (FMF) (**Figura 11**), siendo la innovación clave el emplear helófitas que flotan por tener una densidad más baja que la del agua. Así se lograba un mayor rendimiento de depuración al contar con un mayor volumen radicular que las plantas terrestres evitando al mismo tiempo la colmatación de las mismas.

En todo caso, la validación científica de la solución de los humedales en flotación se llevó a cabo mediante una EDAR piloto instalada en el Aeropuerto de Madrid-Barajas donde se plantaron especies vegetales del tipo *Typha, Scirpus* y *Phragmites.* Allí se trabajó con 4 canales en exterior, a cielo abierto y 10 en invernadero. Paralelamente se desarrollaron los primeros manuales de operación y los primeros diseños de flotadores, poniéndose en marcha posteriormente nuevas instalaciones en aeropuertos de AENA en Reus, Alicante, Fuerteventura, Zaragoza y Vitoria, así como filtros verdes de macrófitas en flotación en toda la cuenca mediterránea. Además, esta tecnología fue reconocida en Kyoto 2003 como 'Mejor Propuesta para el Agua'.

Por otro lado, entre 2005 y 2012 se llevó a cabo la expansión y optimización de esta tecnología con aplicación de la patente ya reseñada más arriba, a través de proyectos públicos con el Instituto del Agua de Castilla-La Mancha, Confederación Hidrográfica del Duero, Aguas de Galicia, Junta de Extremadura, Instituto Balear del Agua entre otros. También se llevaron a cabo proyectos de I+D+i con el CENTA y Canal de Isabel II como más reseñables. En total, se ejecutaron un total de 150 instalaciones en toda España.

Desafortunadamente, entre 2012 y 2020 se experimentó un período de recesión a causa de la crisis económica de 2008, que no detuvo la expansión por Hispanoamérica (Panamá, República Dominicana, México, etc.), si bien estando sujetos estos sistemas a críticas por problemas de malos rendimientos y diseños inadecuados. Sin embargo, a partir de 2020 se ha producido una nueva época de ejecuciones de EDAR de este tipo que aplican nuevas innovaciones con lo que los humedales en flotación se han consolidado como tecnología de referencia a escala internacional cumpliendo al menos 7 objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030 de la ONU.

Ya se ha comentado que esta tecnología está basada en la capacidad natural de las plantas tipo helófitas de translocar el oxígeno del aire hasta sus raíces, por diferencia de presión isostática, para poder vivir en lodos y humedales. Las plantas helófitas, al estar huecas, son capaces de enviar oxígeno a la raíz formando un tapiz flotante, que crece hasta 80 cm de profundidad. A destacar su poder de desinfección del agua >90% por presencia de sustancias radiculares que actúan como sulfamidas. En la **Figura 12** se presenta el esquema de funcionamiento de un humedal en flotación.

En cuanto a los criterios de diseño de estos sistemas, cabe indicar que en lagunas de cierta profundidad (1 a 5 m) la columna de agua se estratifica naturalmente con condiciones anaerobias en el fondo (Eh < –200

FIGURA 12. Esquema de funcionamiento de un filtro de macrófitas en flotación.

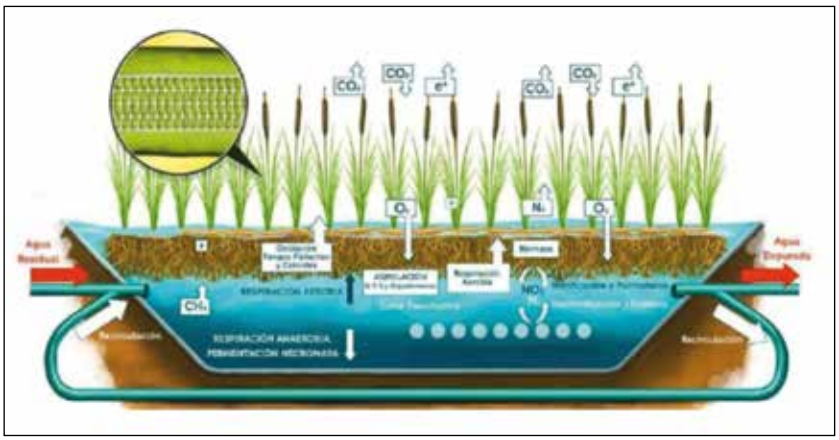


TABLA 2

CRITERIOS DE DISEÑO PARA HUMEDALES FSF Y FHS

Fase	Profundidad (m)	TRH (días)	Eliminación DBO	Función principal
Anaerobia	3-4	2-3	50-65%	Fermentación, digestión y clarificación inferior
Facultativa	1-2	3-5	30-40%	Oxidación heterótrofa y nitrificación parcial
Maduración	0,5-1	1-2	5-10%	Adsorción de nutrientes y desinfección radicular

mV), una zona media facultativa (Eh ≈ −50 a +50 mV), manteniéndose la superficie aerobia (Eh = +150 a +400 mV). Esto posibilita procesos simultáneos de fermentación, oxidación parcial y nitrificación, así como fenómenos de depredación entre bacterias que derivan en un eficaz control de sólidos.

Asimismo, las plantas de *Typha domingensis* translocan oxígeno al rizoma y liberan fenoles antibacterianos (ácido ferúlico, p-coumárico), absorbiendo iones del medio, atrapando coloides y estabilizando los biofilms aeróbicos desarrollados, si bien la cobertura vegetal inhibe la luz solar con lo que la desinfección depende de la rizosfera. Además, sus raíces liberan compuestos orgánicos que son oxidados por bacterias electrogénicas en la zona anaerobia, proceso que genera electrones que migran hacia la rizosfera oxigenada, donde se combinan con oxígeno.

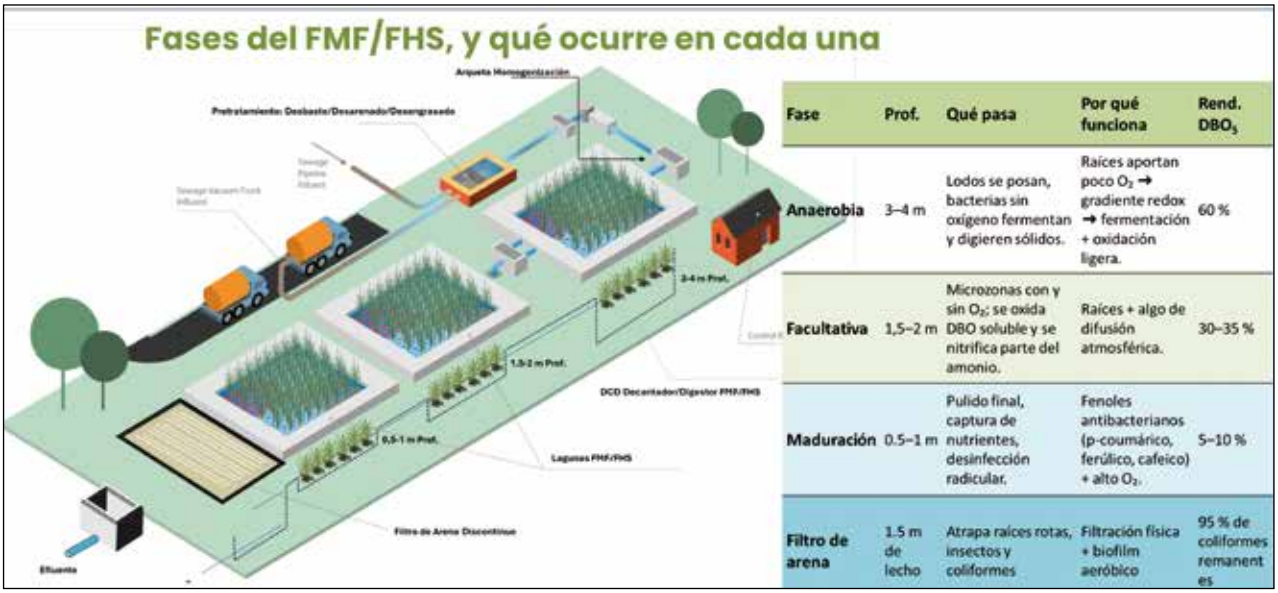
Hay que destacar que el movimiento del viento sobre las hojas crea un gradiente eléctrico que favorece la transferencia de electrones y la atracción de iones disueltos y coloides, aumentando la depuración con lo que, en conjunto, el sistema actúa como una celda bioeléctrica natural, capaz de eliminar materia orgánica y disipar energía, mejorando la eficiencia del tratamiento sin aporte energético externo.

Es interesante señalar que se ha desarrollado un modelo matemático, según estudios llevados a cabo en más de 150 sistemas de humedales, cuyo fundamento teórico ha sido una cinética de saturación microbiana tipo Monod, considerando además factores tales como profundidad y gradiente redox de las lagunas, así como factores ambientales. De este modo se ha formulado la expresión recogida más abajo, que relaciona la DBO_5 de salida de la instalación con la de entrada:

$$DBO_5_sal = DBO_5_ent \bullet [a \bullet \ln(DBO_5_ent) \bullet \ln(1 + h) \bullet f_T(T) \bullet f_{TRH}(TRH)] / h$$

siendo 'a' un coeficiente empírico de calibración (a = 0,3030 para T = 22 °C), '$\ln(DBO_5_ent)$' la dependencia logarítmica de la carga orgánica de entrada, '$\ln(1 + h)/ h$' la dependencia de la profundidad 'h' de la laguna (h en metros), '$f_T(T)$' la corrección

FIGURA 13. Esquemas de funcionamiento de humedales en flotación de diferente tipología. Explicación en la figura.



por temperatura (ºC) y 'f_{TRH}(TRH)' la corrección por tiempo de retención hidráulico (en horas). Este tratamiento matemático ha sido desarrollado por APM Agua Ibérica.

Con este planteamiento, los parámetros de referencia son una superficie de 1 a 3 m^2/he (para un caudal de unos 250 L/h y día), una DBO_5 de entrada de 300 mg/L y de salida de 25 mg/L, una temperatura óptima entre 18-25ºC y una tasa de digestión de lodos de 11 L/m^2. Así, las características de funcionamiento de las lagunas se recogen en la **Tabla 2** con tres ecosistemas típicos: anaerobio, facultativo y oxidativo radicular. Por su parte en la **Figura 13** se recoge un esquema explicativo del funcionamiento de los humedales en flotación.

Las ventajas de estos sistemas de depuración son: sin consumo de energía eléctrica; digestion de lodos y ausencia de olores; eficacia del proceso a lo largo de todo el año;)bajo mantenimiento agrícola; rendimientos de depuración en sólidos, DBO_5, DQO y coliformes >90%; conjugación tratamientos primario, secundario y terciario; mejora el rendimiento del lagunaje; posibilidad de reconversión de lagunas de oxidación obsoletas e ineficientes; y, finalmente, no experimentan colmatación al ser cultivos hidropónicos. Desde el punto de vista económico, los humedales en flotación suponen entre 0,05-0,15 €/m^3, frente a sistemas de lodos activos con 0,20-0,40 €/m^3, los humedales subsuperficiales con 0,10-0,20 €/m^3 y, por último, el lagunaje con 0,02-0,10 €/m^3.

Estos sistemas se han implantando con buenas prestaciones como ejemplos, en México (2016, 22.000 he), con un coste de implantación de menos de 2 M€ y de mantenimiento de 3.300 €/mes, República Dominicana (2016, 1.150 m^3/d) y Punta Cana, Cáceres (Extremadura), y también en Estados Unidos, Panamá, Uruguay, Argentina, Kenia y Gambia. Además, como fase previa en potabilización subsiguiente de aguas en Mali (6.000 h), así como para recuperación de lagos eutróficos en Francia, sirviendo de base para instalación en superficie de paneles solares en proyectos novedosos que conjugan el binomio agua-energía (**Figura 14**).

FIGURA 14. Humedales en flotación con incorporación de sistemas fotovoltáicos para optimización y aprovechamiento energético (APM Agua Ibérica).

MONITORIZACIÓN POR IMAGEN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES. CASOS DE ÉXITO

La última ponencia tuvo como objetivo el presentar sistemas de monitorización para control y seguimiento de Humedales mediante el sistema de imagen, es decir, una tecnología no invasiva con respecto al sistema de depuración. La importancia de este tema es tal que el propio World Water Council afirma que la gestión de la calidad del agua es una de las principales debilidades crítica en relación con la contaminación del agua y la megatendencia de la crisis climática.

En este sentido el seguimiento de proceso en depuración es una exigencia dimanada de las normativas vigentes y de la propia administración hidráulica, siendo los análisis de laboratorio lentos y difícilmente aplicables en tiempo real. Por su parte, la estimación mediante imagen no necesita tocar el agua para monitorizar su calidad, permite el control continuo de manera remota, posibilita un sistema de alerta temprana para apoyo a la toma de decisiones, generando la automatización de acciones correctivas y preventivas a tomar en el mínimo tiempo posible.

Los controles a través de imagen permiten estimaciones fisicoquímicas y microbiológicas del agua en tiempo real y en forma remota permitiendo evaluar el nivel de calidad del agua residual. A tal fin se usan cámaras instaladas entre 0,5 y 10 m por encima de la lámina de agua (**Figura 15**).

El sistema se puede emplear para seguimiento de vertidos, alivios de aguas e intrusiones marinas, lodos y escurridos de centrífugas, flóculos en sistemas biológicos, cinaobacterias en medios libres, así como para control de influentes y efluentes de EDAR. Son capaces de determinar N, P, color, turbidez, DQO, COT, hierro y manganeso, fundamentalmente. Todas estas determinaciones han de ser calibradas durante un determina-

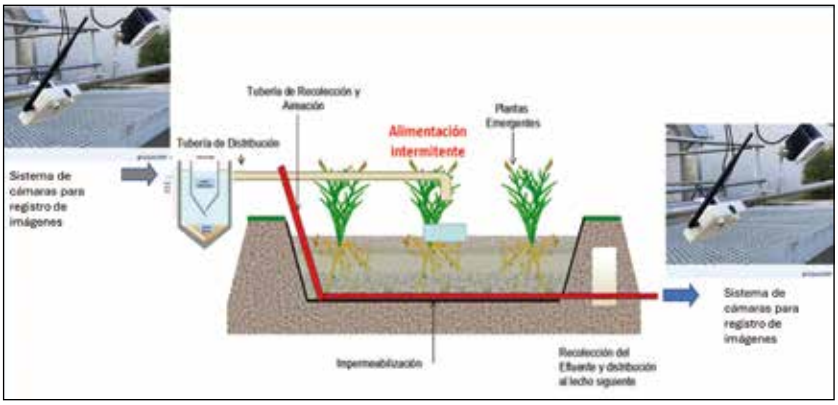
do tiempo en el lugar de su implantación y con el agua residual a depurar a fin de contar con datos fiables.

En concreto, en depuración de aguas residuales es muy importante la ayuda prestada al explotador en la toma de decisiones sobre dosificación de reactivos, recirculación de efluentes, reutilización de aguas y establecimiento de criterios claros de parada de instalaciones ante eventos peligrosos.

El sistema requiere de la posibilidad de visualizar la superficie del agua, de no estar sometido a inundaciones (que lo dejaría fuera de servicio), de alimentación eléctrica o vía solar, y de corbertura vía internet 2G a 5G, siendo una aplicación informática abierta a integración con otras del cliente vía física o inalámbrica.

Finalmente, en 2023 la empresa y esta tecnología consiguieron la validación tecnológica de la Dirección General del Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Miteco), siendo además evaluada positivamente por parte de la Confederación Hidrográfica del Duero, y consiguiendo situarse como la primera startup española que ha liderado, ejecutado y superado con éxito un proceso de compra pública precomercial.

FIGURA 15. Aplicación de técnicas de imagen en control de proceso en humedales de alimentación vertical.



CONCLUSIONES

Las soluciones basadas en la naturaleza, o SBN, estrategias que usan los principios de la naturaleza para solucionar problemas relacionados con la gestión territorial y urbana, el cambio climático, la gestión de los recursos y del agua, la seguridad alimentaria o la calidad del aire y el entorno, se muestran como herramientas útiles, económicas y con el valor añadido en ahorro de costes y generación de empleo local, ayudando, además a desarrollar las ciudades con un enfoque sostenible para ser resilientes, saludables y, en definitiva, sostenibles, habitables y vivas.

Con motivo de la publicación de la Directiva (UE) 2024/3019 donde se establece la obligatoriedad de la depuración integral del agua en colectividades de más de 1.000 he, las soluciones del tipo de los humedales, tecnologías de carácter extensivo con una necesidad importante de suelo para su implantación (>1 m^2/he) pueden ser una herramienta eficaz en estos casos.

En los humedales, en sus diferentes tipologías, se hacen pasar las aguas residuales por zonas húmedas artificiales en las que se dan procesos físicos, químicos y biológicos en que participan: agua residual, medio filtrante y plantas emergentes acuáticas, dando una solución integrada a la depuración del agua residual y a la gestión de los lodos generados que quedan dentro del sistema.

Los humedales son capaces de conseguir rendimientos en eliminación de SSUS y DQO que superan, respectivamente, el 80% y el 90%, con costes energéticos del orden de 0,1 kWh/m^3, pudiendo incorporar procesos convencionales para reducir contenidos en N y P, que acaso sean su principal hándicap actual, estando en investigación su rendimiento frente a microcontaminantes.

» Los humedales son capaces de conseguir rendimientos en eliminación de SSUS y DQO que superan, respectivamente, el 80% y el 90%, con costes energéticos del orden de 0,1 kWh/m^3, pudiendo incorporar procesos convencionales para reducir contenidos en N y P, siendo esto último seguramente su principal hándicap actual

Bibliografía

[1] 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, 312-319.

[2] Información técnica de SSI Aeration, www.ssiaeration.com.

[3] Información técnica de APM Agua Ibérica, www.aguainc.es y www.aguainc.com

[4] Información técnica de Aquacorp, www.aquacorp.es.