

Planta Piloto para el análisis del rendimiento de la depuración de aguas fecales mediante macrofitas

Ruiz, O.^{a1}, Acero, A.^{a2}, Lorén, J.^{a3}, Russo, B.^{a4} y Lapuente, M.^{a5}

^aGrupo de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GIHA). Escuela Politécnica de La Almunia (EUPLA). Universidad de Zaragoza. c/ Mayor s/n · 50100 La Almunia de Doña Godina (Zaragoza) email: ^{a1}orui@unizar.es, ^{a2}acero@unizar.es, ^{a3}jlloren@unizar.es, ^{a4}brusso@unizar.es, ^{a5}651968@unizar.es

Línea temática C | Agua y ciudad

RESUMEN

La Comunidad Autónoma de Aragón tiene solucionado la depuración de los municipios mayores de 2000 h-eq y busca encontrar soluciones tecnológicamente innovadoras para resolver la depuración de los de menor tamaño. Distintas técnicas permiten tratar las aguas residuales y la fitodepuración mediante humedales artificiales es una de ellas. Los humedales formados por macrofitas tienen que sufrir en Aragón dos dificultades principales: el clima, variando entre extremadamente seco y cálido en verano frente a rigurosamente frío en invierno; y la diferencia estacional de población de los pequeños núcleos rurales, llegando a multiplicarse por más de 50. Estas variaciones llevan hasta el límite un sistema de humedal artificial que debe justificar que cumpla con los criterios establecidos de depuración.

Con el objetivo de establecer la viabilidad de las depuradoras de macrofitas en Aragón se ha definido una instalación de prueba que permita monitorizar el proceso de fitodepuración al mismo tiempo que se compara la efectividad de distintos tipos de plantas.

Palabras clave | fitodepuración; macrofitas; depuración en Aragón.

INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso más importante de la tierra y por ello conviene su conservación, sin embargo, el crecimiento de las poblaciones lo deterioran al agotar su capacidad de autodepuración, por lo que surge la necesidad de tratar las aguas residuales y que los vertidos sean asumibles por el medio receptor. El vertido de aguas contaminadas causa múltiples efectos negativos como la aparición de fangos y flotantes, la disminución de la cantidad de oxígeno en el agua perjudicando a la fauna y la flora, el aporte excesivo de nutrientes, la propagación de organismos patógenos, dañinos para la salud, y la dificultad para reutilizar el agua. La contaminación del agua puede suponer un obstáculo serio para el desarrollo socioeconómico de regiones donde el recurso del agua es escaso, como Aragón. La reutilización del agua puede llegar a ser imposible o inabordable como consecuencia de la acumulación de contaminantes en el medio. Esto hace indispensable la depuración del agua contaminada antes de su vertido.

En actuaciones de depuración de aguas, Aragón es una de las comunidades autónomas pioneras, así como en la protección y restauración del medioambiente. Adelantándose a la Directiva, en 1989 se redactó el Plan Director de Saneamiento de Aragón. Más tarde, en 1993, éste se revisó y se redactó un Proyecto de Ley de Saneamiento de Aragón.

El Plan Nacional de Saneamiento y Depuración propuso en 1995 la ejecución de ciertas depuradoras, las más importantes de Aragón, sin contar las de Zaragoza. La Ley de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de Aragón se aprobó en 1997. Desarrollada ésta, el Gobierno de Aragón redactó y aprobó el Plan Aragonés de Saneamiento y Depuración en 2001, fijando la depuración de las poblaciones con un número de habitantes equivalentes superior a 1000. Con el fin de cumplir estos objetivos, en 2004 se puso en marcha por parte del Gobierno de Aragón el Plan Especial de Saneamiento y Depuración, que consideraba el tratamiento de las aguas de los municipios de más de 1000 habitantes equivalentes. La primera revisión del

Plan Aragonés de Saneamiento y Depuración se aprueba en 2009. Este documento se redacta para cumplir la Ley 6/200 de ordenación y Participación en la Gestión del Agua en Aragón y desarrollar así la Directiva 91/271 sobre el Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas. (IAA, 2004)

Una vez solucionada, o en vías de solución, la depuración de los municipios de más de 1000 habitantes equivalentes, la Comunidad pone el foco en los municipios más pequeños, teniendo en cuenta que 618 de los 731 municipios de Aragón tiene una población inferior a esa cifra o que casi 500 municipios tienen menos de 500 habitantes y de estos, más de la mitad tienen menos de 150 habitantes. La despoblación y el abandono del territorio es uno de los graves problemas de Aragón.

Los sistemas convencionales, empleados en la mayor parte de la Comunidad, no son asumibles por pequeñas poblaciones por el coste de mantenimiento y explotación, y por la necesidad de técnicos conocedores de la tecnología. Por otro lado, estas poblaciones también deben cumplir los objetivos de la Directiva Marco del Agua y los objetivos de calidad establecidos por otras Directivas. Por ello, surge el estudio de los sistemas no convencionales como medida para solventar estos problemas y cumplir así la Directiva Europea.

Los sistemas no convencionales en los que nos vamos a enfocar son los humedales artificiales, en los cuales el agua, tras pasar por una fase de pretratamiento, es conducida a unos canales que contienen plantas acuáticas específicas. Las plantas depuran el agua eliminando un gran porcentaje de los contaminantes que contiene. Con objeto de probar estos sistemas, se construirán, en el espacio libre de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de La Almunia de Doña Godina, distintos tipos de humedales artificiales que serán alimentados con un caudal correspondiente a una población tipo. Situar la planta piloto en la propia EDAR supone una serie de ventajas significativas:

- Se evita la construcción del pretratamiento, al realizar la toma aguas abajo del desarenador
- No existen problemas de vertidos sin tratamiento adecuado por falta de capacidad, pues la salida de la planta piloto se dirige hacia la cabecera de la planta
- El personal presente de forma casi permanente en planta podrá dar la alarma ante cualquier tipo de incidencia
- Se reducen costes de construcción y explotación

Dado el espacio disponible, la planta piloto comenzará su funcionamiento con dos tratamientos: macrofitas en flotación en flujo superficial y en flujo subsuperficial. Estos sistemas de tratamiento estarán formados por tres canales y en cada canal habrá un tipo de planta acuática distinta; de esta manera se podrá conocer que planta trabaja mejor o peor con una determinada carga contaminante. Además, cada uno de los canales podrá ser el primero de la línea de tratamiento permitiendo observar cómo responde la planta frente a ello. La construcción de los canales comenzará en el verano de 2017 y se monitorizará durante tres años, prorrogables.

En definitiva, con este proyecto se busca determinar si los humedales artificiales tienen la capacidad necesaria para tratar las aguas residuales de pequeños núcleos de población en el exigente clima aragonés, la superficie necesaria por habitante para cumplir los límites de vertido y las plantas más adecuadas para alcanzar estos límites. La flexibilidad de la instalación diseñada permitirá alcanzar estos objetivos y aquellos otros que puedan surgir durante su monitorización.

MATERIAL Y MÉTODOS

Las macrofitas de forma natural son flotantes, forman un tapiz de raíces y rizomas que ocupa el volumen del canal disponible, forzando así que el agua circule por las raíces, las cuales contienen los microorganismos que degradan la materia orgánica, y fijando otros contaminantes como el nitrógeno y el fósforo. La velocidad de circulación del agua debe ser más lenta que en los sistemas convencionales al deberse adaptar a la capacidad biológica de las plantas. Las plantas suministran el oxígeno necesario para los microorganismos, adsorben y asimilan los contaminantes en sus tejidos, todo ello debido a una serie de reacciones químicas que proceden de procesos de eliminación químicos, físicos y biológicos, que se describen a continuación.

- *Eliminación de sólidos suspendidos*

Los humedales filtran y sedimentan los remanentes del tratamiento previo. Las raíces y el sustrato reducen la velocidad del agua, lo que favorece este proceso. El tratamiento previo es imprescindible para el funcionamiento del sistema, evitando obstrucciones y la pérdida de capacidad prematura. (Delgadillo et al., 2010)

- *Eliminación de materia orgánica*

Tiene lugar mediante procesos aerobios y anaerobios, dependiendo de la presencia de oxígeno disuelto. La biodegradación es realizada por los microorganismos, que están adheridos a la planta. Estos microorganismos requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, nutrientes y elementos traza. Su fuente de energía es la luz o una reacción química de oxidación-reducción. (Delgadillo et al., 2010)

- *Eliminación de nitrógeno*

Los principales mecanismos son la nitrificación y la desnitrificación. El proceso puede dividirse en tres pasos: amonificación, nitrificación y desnitrificación. El primero ocurre en zonas aeróbicas y anaeróbicas, por la mineralización del nitrógeno contenido en el agua residual. La nitrificación ocurre en condiciones aeróbicas, presencia de amonio o nitrito como fuente de energía y dióxido de carbono como fuente de carbono. La transformación del nitrógeno en forma amoniacal a nitrógeno en forma de nitratos se lleva a cabo mediante la actuación de bacterias:

- Autótrofas (carbono inorgánico por síntesis celular)
- Quimiótrofas (obtiene energía de reacciones de oxidación)
- Aerobias (requieren el aporte de oxígeno disuelto)

La desnitrificación es la transformación del nitrógeno en forma de nitratos a nitrógeno en forma de gas, ocurre cuando no hay oxígeno disuelto presente. Las bacterias anaeróbicas facultativas realizan el proceso tomando la energía de las fuentes de nitrógeno y de azufre presente en el agua residual. Las bacterias que desarrollan el proceso son:

- Heterótrofas (carbono orgánico por síntesis celular)
- Quimiótrofas (obtiene energía de reacciones de oxidación)
- Anoxia (Eh o potencial de oxidación-reducción valores desde -50 a -200 mV)

La nitrificación y desnitrificación dependen de la temperatura y necesitan carbono como fuente de energía para que la bacteria realice la conversión. (Delgadillo et al., 2010)

- *Eliminación de fósforo*

El fósforo está presente en tres formas: ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. Éste último es el que realmente importa cuando hablamos del tratamiento. El consumo de fósforo por la planta es considerado insignificante comparado con los efectos de la adsorción, como consecuencia de la cual se elimina el ortofosfato. (Delgadillo et al., 2010)

- *Eliminación de metales pesados*

Los metales pueden encontrarse en formas solubles o como partículas asociadas, siendo las primeras las formas más biodisponibles. La adsorción involucra la unión de las partículas, en partes de la planta o a la superficie de la matriz. En una relación de intercambio catiónico, los iones metálicos positivamente cargados en solución se unen a los sitios negativamente cargados en la superficie del material adsorbente. La fuerza atractiva para el intercambio catiónico es electrostática y la medida de esta fuerza depende de un amplio rango de factores. (Delgadillo et al., 2010)

- *Eliminación de bacterias*

La eliminación de estos microorganismos está basada en una combinación de factores físicos (filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta), químicos (oxidación, absorción y exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos) y biológicos (ataque por bacteriófagos). (Delgadillo et al., 2010)

Fitodepuración en humedales artificiales

Se entiende por fitodepuración la reducción o eliminación de contaminantes de las aguas residuales, por medio de procesos biológicos y fisicoquímicos con ayuda de las plantas del propio ecosistema acuático. Las plantas conocidas como Macrofitas son aquellas que pueden vivir en terrenos inundados toda su vida o durante largos periodos de tiempo encharcadas. (Beascochea et al., 2005)

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado o en flotación.

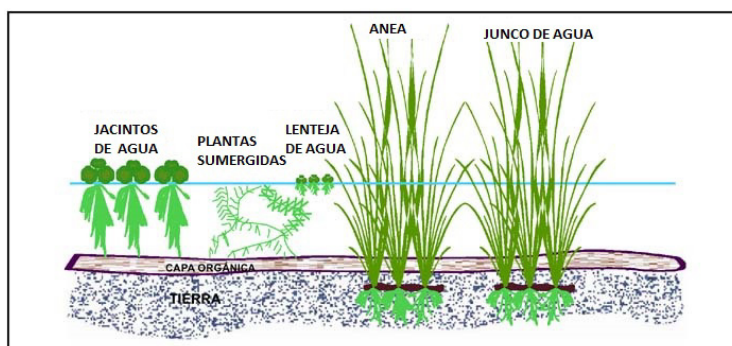


Figura 1 | Plantas acuáticas comunes. (Fuente: Casa Enlatada - WordPress.com)

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos:

- La actividad bioquímica de microorganismos.
- El aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día.
- El apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante.

Los humedales tienen tres funciones básicas que les hacen atractivos para el tratamiento de aguas residuales. Estas funciones son las siguientes:

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica
- Utilizar y transformar los elementos por acción de los microorganismos
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

Tipos de humedales

Los humedales artificiales pueden clasificarse según el tipo de macrofitas que se empleen en su funcionamiento: macrofitas fijas al sustrato (enraizadas) o macrófitas flotantes libres. Considerando la forma de vida de estas macrófitas, los humedales artificiales se clasifican en:

Sistemas de tratamiento basados en macrofitas de hojas flotantes: los órganos reproductores son flotantes o aéreos. El Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*) son las especies más utilizadas en este sistema. (Delgadillo et al., 2010)



Figura 2 | Jacinto de agua y lenteja de agua

Sistemas de tratamiento basados en macrofitas sumergidas: comprenden helechos, numerosos musgos y cariófitas y muchas angiospermas. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.

Sistemas de tratamiento basados en macrofitas enraizadas emergentes: en suelos anegados permanente o temporalmente, son plantas perennes con órganos reproductores aéreos. (Delgadillo et al., 2010)

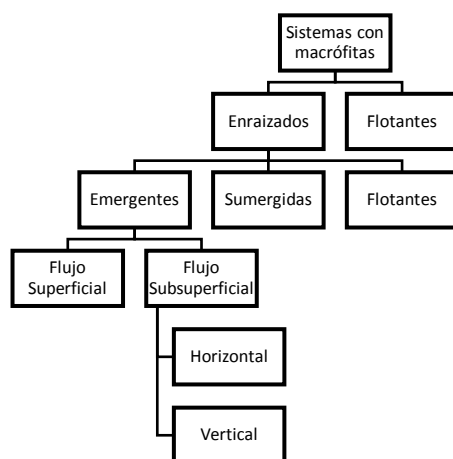


Figura 3 | Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrofitas

Humedales de flujo superficial (FWS)

Los humedales de flujo superficial o (*Free Water System*, FWS) consisten en canales estrechos de gran longitud en los que circula el agua laminada de forma libre por la superficie del sustrato, circulando alrededor de los tallos y hojas de las plantas. La profundidad de la columna de agua suele variar entre los 30 a 60 cm. Las plantas emergentes se enraízan en el lecho del canal siendo aconsejable la impermeabilización del mismo para evitar la percolación de las aguas a tratar. Estos se suelen emplear para tratar agua residual de una forma continua. El tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente. (Delgadillo et al., 2010)

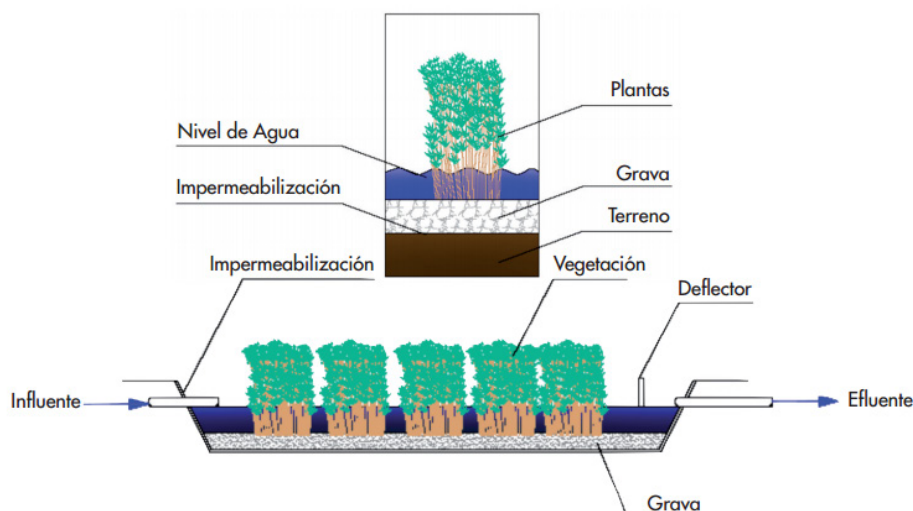


Figura 4 | Cortes transversal y longitudinal de un humedal artificial con flujo superficial. (Ortega et al., 2010)

Estos sistemas se diseñan como canales o estanques con paredes ataluzadas estancas, gracias a recubrimientos con materiales impermeables, canalizaciones de entrada y salida del agua, estructuras o dispositivos de control de flujo, y alternancia de áreas con y sin vegetación acuática. En estos sistemas el sustrato en el que están enraizadas las plantas tiene una baja conductividad y no permite un flujo significativo a través de la zona radicular. (Beascochea et al., 2000)

La eliminación de contaminantes se produce a través de reacciones que tienen lugar en el agua y en la zona superior del sustrato, por lo que su potencial de eliminación se ve fuertemente restringido. Este tipo de humedales dan tratamiento a aguas normalmente tratadas por otros medios, operando con baja carga orgánica. El olor puede ser controlado pero en cuanto a los insectos, el control de estos es caro. El coste de este sistema es menor comparado con el humedal con flujo subsuperficial.

Los humedales artificiales de flujo superficial pueden también diseñarse para crear nuevos hábitats para la flora y la fauna, mejorar las condiciones de terrenos pantanosos naturales próximos o incrementar la calidad de los efluentes depurados en las estaciones de tratamiento. Al ser el agua accesible para la fauna, tienen un gran valor como ecosistema para la vida salvaje.

Humedales de flujo subsuperficial (SFS)

Los humedales artificiales con flujo subsuperficial (*Subsurface flow System*, SFS), consisten en canales o zanjas con fondos impermeables, en los que el flujo de agua atraviesa un relleno granular donde asienta el sistema radicular de la vegetación plantada. Tal y como se ha podido observar en la figura 3, existen dos tipologías dentro de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, los de flujo subsuperficial horizontal y los de flujo subsuperficial vertical.

Estos humedales dan tratamiento a flujos primarios, es decir, aguas pretratadas, y operan con altas tasas de carga orgánica. El olor y los insectos son inexistentes. Gracias a la acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo, el agua mantiene una temperatura constante, lo que les da la ventaja de la protección térmica frente a las bajas temperaturas que afectan a los humedales superficiales. La superficie requerida es menor, aunque el coste el mayor.

Al igual que los FWS, se diseñan como estanques con paredes y base estancas. Lo que define a este tipo de sistema es que no existe una columna de agua continua, sino que el influente circula a través de un medio inerte, que consiste en un lecho de arena o grava de grosor variable, el cual sostiene la vegetación. No existe lámina de agua a la vista. Durante el paso del agua residual a través del sistema radicular de las plantas, la materia orgánica se descompone biológicamente, el nitrógeno puede ser desnitrificado y el fósforo y los metales pesados son fijados en el suelo. Las plantas tienen dos importantes funciones en este proceso: suministrar oxígeno a los microorganismos en la rizosfera e incrementar y estabilizar la conductividad hidráulica del suelo.

Las ventajas que ofrece este sistema con respecto al superficial son: una menor incidencia de malos olores, bajo riesgo de exposición directa de las personas, de aparición de insectos y la protección térmica, todo debido a la naturaleza subterránea del flujo de agua.

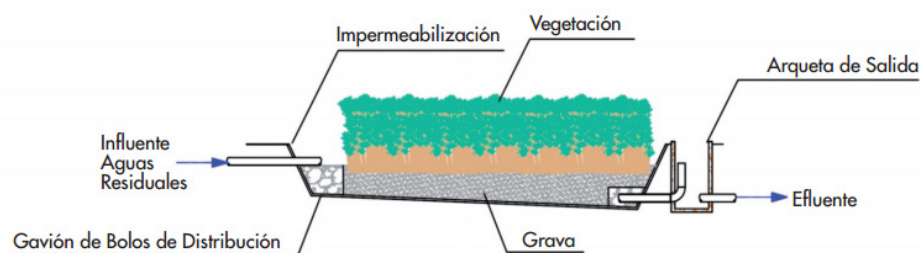


Figura 5 | Corte longitudinal de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. (Ortega et al., 2010)

Flujo subsuperficial horizontal

Las aguas a tratar circulan horizontalmente a través del medio granular, donde se asientan las raíces y los rizomas de las plantas. Se introduce el agua por un extremo del filtro y se extrae por el extremo contrario, tal y como se muestra en la figura 6. Este tipo de humedales se caracterizan por estar permanentemente inundados, es decir que la alimentación es continua, encontrándose la lámina de agua entre 0,1 y 0,05 metros por debajo de la superficie. Las aguas circulan horizontalmente, atravesando un sustrato filtrante de gravilla-grava de unos 0.4-0.6 metros de espesor, donde se fija la vegetación.

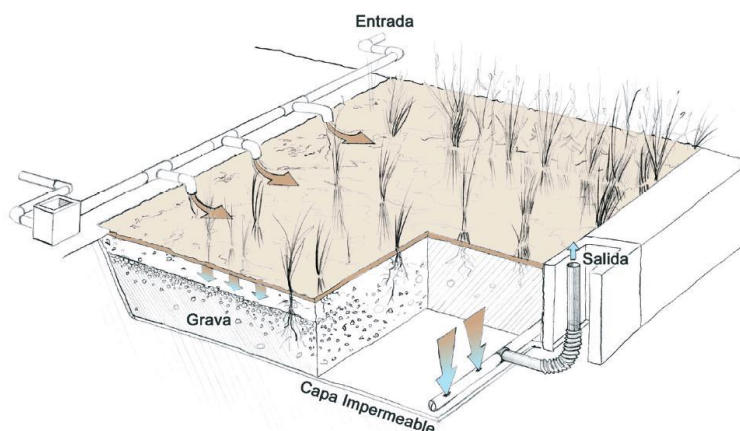


Figura 6 | Esquema humedal artificial tipo flujo subsuperficial horizontal (Fuente: <http://depuranatura.blogspot.com.es>)

Flujo subsuperficial vertical

En este caso, las aguas residuales discurren de manera vertical, a través de un medio poroso donde están arraigadas las plantas macrofitas. La alimentación se realiza mediante tuberías dispuestas longitudinalmente al filtro. La salida del agua se realiza por el extremo opuesto del humedal, recogiendo el agua en una red de drenaje que se sitúa en el fondo del lecho de gravas. La inundación del filtro se puede realizar de forma continua o a pulsos.

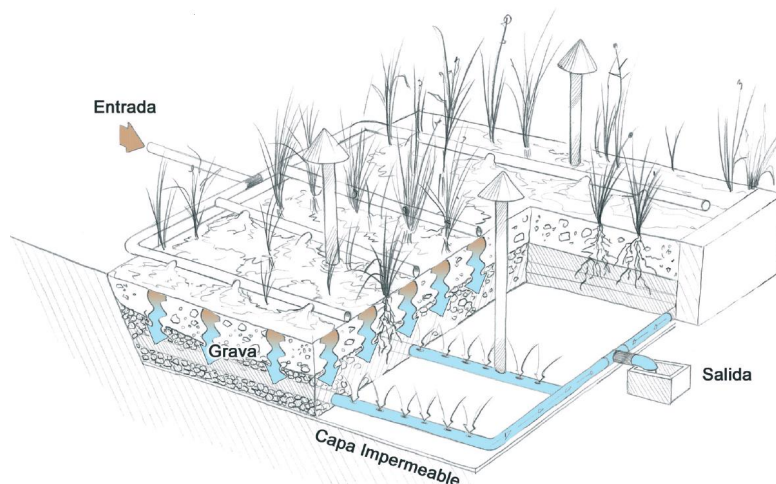


Figura 7 | Esquema humedal artificial tipo flujo subsuperficial vertical (Fuente: <http://depuranatura.blogspot.com.es>)

La principal diferencia entre los humedales de flujo subsuperficial horizontal y vertical, es que los humedales de flujo subsuperficial horizontal operan en condiciones anaerobias, produciendo efluentes con ausencia de oxígeno disuelto, mientras que en los de flujo vertical imperan condiciones aerobias, produciendo efluentes oxigenados. Otra diferencia es que los sistemas verticales poseen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales, es decir requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica. Por el contrario los humedales de flujo horizontal son menos susceptibles a la colmatación.

Macrofitas en flotación

El filtro de macrofitas en flotación combina las ventajas de los sistemas de humedales artificiales FWS y de los sistemas acuáticos, reduciendo los inconvenientes existentes. Las macrofitas tienen desarrollado un sistema de grandes espacios aéreos internos, que les permiten la provisión de aire bajo condiciones de suelo saturado con agua desde la atmósfera hacia las raíces y rizomas. Además de airear el sistema radicular que forma el filtro y el agua de su entorno, eliminan los contaminantes al incorporarlos a sus tejidos (tallos, hojas y rizomas) y posibilitan que se fijen y se establezcan en sus raíces numerosas colonias de microorganismos que degradan la materia orgánica disuelta en el agua. (Beascoechea et al., 2000)

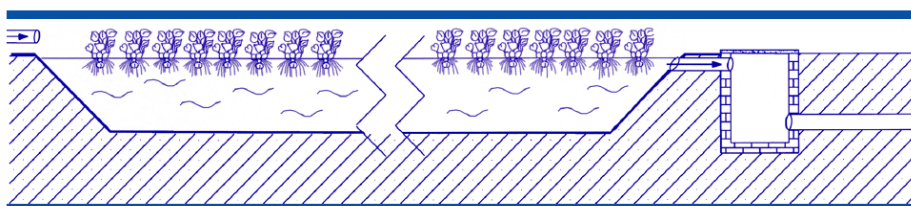


Figura 8 | Esquema de un humedal con especies en flotación (Beascoechea et al., 2000)

Algunas de las propiedades de las macrofitas son la estabilización de la superficie de los humedales construidos, la prevención de taponamientos de la matriz, poseen buenas condiciones para la filtración física y una superficie para el crecimiento microbiano adjunto, y transfieren el oxígeno a la rizósfera. Las plantas generan un hábitat para la vida salvaje y dan una apariencia agradable al sistema de tratamiento de aguas residuales.

El rasgo que diferencia este sistema es el uso de vegetación emergente como vegetación flotante. Helófitos como las enneas e hígrófitos como juncos se hacen crecer como plantas flotantes, a fin de que el sistema radicular y órganos sumergidos de reserva se entrelacen formando un tapiz filtrante que esté permanentemente bañado por el agua residual. Estas plantas producen gran cantidad de biomasa aérea, lo que posibilita el funcionamiento del sistema sin necesidad de retirar la biomasa durante periodos de tiempo mayores.

El sistema puede utilizarse tanto para un tratamiento secundario extensivo, como para un tratamiento de afino en el tratamiento terciario, tanto de tipo extensivo como intensivo.

Vegetación

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación. Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

(Delgadillo et al., 2010)

Anea

Su nombre científico es *Typha latifolia*, es capaz de crecer bajo diversas condiciones medioambientales. Representa una especie de planta ideal para humedales porque se propaga fácilmente. Es capaz de producir una biomasa anual grande y tiene un potencial pequeño de remoción de Nitrógeno y Fósforo por la vía de la poda y la cosecha.



Figura 9 | Anea (*Typha latifolia*) (Fuente: <http://www.growiser.net/typha-latifolia-broadleaf-cattail.html>)

Tiene un tamaño máximo de 2,5 metros, entre las hojas emerge una especie de tallo sobre el que se agrupan las flores en espiga cilíndrica compacta, de color castaño. Se encuentran con un pH de 4 a 10 y la temperatura deseable es de 10-30°C.

La distancia de siembra es de 60 cm y la penetración de las raíces en grava es relativamente pequeña, 30 cm, por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial.

Junco

Su nombre científico es *Scirpus lacustris*, entre otros, pertenecen a la familia de las ciperáceas, son perennes y crecen en grupos. Los juncos crecen bien en aguas desde 0,05 a 3 metros de profundidad.

La distancia de la siembra es de 30 cm y la penetración de raíces en grava de 60 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo superficial. Estas plantas pueden alcanzar una altura de 3 metros, se encuentran con un pH de 4 a 9 y la temperatura deseable es de 18-27°C.



Figura 10 | Junco (Scirpus) (Fuente: <http://www.outdooralabama.com/bulrush>)

Carrizo

Su nombre científico es Phragmites y vienen de la familia de las gramíneas, son plantas con un rizoma perenne extenso, logran un buen cubrimiento en un año con separación de 60 cm. pueden ser más eficaces en la transferencia de oxígeno porque sus rizomas penetran verticalmente y más profundamente. Son muy usadas en humedales porque ofrecen un bajo valor alimenticio. El tamaño máximo es de 6 metros. Es una planta introducida que se ha naturalizado y se mantiene en los alrededores de viviendas y zonas de cultivo. Incluso se siembra en parques y jardines.

Se encuentran en un pH de 2 a 8 y la temperatura deseable para estas plantas está entre 12 y 23°C. La penetración de las raíces en grava es de 40 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial.



Figura 11 | Carrizo (Phragmites)(Fuente: (<http://science.halleyhosting.com/nature/basin/poaceae/phragmites/australis.html>)

Esparganio

Su nombre científico es Sparganium erectum, pertenece a la familia Sparganiaceae. Se desarrolla en aguas poco profundas y produce flores blancas en forma de bolas espinosas. Presenta hojas de color paja en invierno y verde en verano.

Se trata de una planta erecta con hojas lineales de color verde oscuro, que puede alcanzar una altura de 1,50 m. En verano le aparecen espigas de flores amarillas, les sigue la formación de frutos de un verde amarronado, espinosos y carnosos y de forma esférica. Se encuentran en un pH de 5,5 a 8.



Figura 12 | Esparganios. (Fuente: <http://www.asturnatura.com/especie/sparganium-erectum.html>)

Lirio amarillo

Su nombre científico es *Iris Seudacorus*, viene de la familia Iridaceae. Se trata de una planta perenne con un bulbo ovoide que perdura en invierno, la parte aérea muere en esta época del año. Se caracteriza por sus floras amarillas que miden unos 8 cm, presentan 3 pétalos externos caídos y 3 pétalos internos erectos. Florecen desde la primavera hasta principios de verano. Los frutos que producen tienen forma de cápsula.

El tallo mide de 60 a 120 cm y tiene varias hojas. Las flores son amarillas. Crece en zonas húmedas y encharcadas, a orillas de ríos y embalses. Se encuentran en un pH de 4,5 a 7,5, en suelos débilmente ácidos y soportar una temperatura calurosa moderada. Es capaz de soportar heladas y vientos fuertes.



Figura 13 | Lirio amarillo (Fuente: <http://www.asturnatura.com/fotografia/flora/iris-pseudacorus-1>)

Situación de la depuración en pequeñas comunidades en Aragón

Aragón cuenta con un total de 731 municipios y 1.217.847 habitantes, de los cuales 541 municipios no tienen depuradora, coincidiendo con que, la mayoría de éstos no superan los 500 habitantes. Un análisis de estos municipios produce la siguiente tabla:

Tabla 1 | Tabla de población de Aragón vs depuración. (Elaboración propia. Datos obtenidos de IAEST).

Nº habitantes	< 100	100 - 200	200 - 500	500 - 1000	> 1000	Total
Municipios sin depuradora	161	171	156	35	18	541/731
% población	1%	2%	4%	5%	88%	100%

La mayor parte de la población de Aragón vive en municipios que superan los 1000 habitantes, mientras el 12 % de la población vive en municipios pequeños. Estos datos coinciden con los calculados para municipios sin depuradora, por lo que el 12% de la población de Aragón (aproximadamente 150.000 habitantes) vive sin depuración de sus aguas residuales.. El hecho de que sean municipios donde no hay un notable número de habitantes no puede suponer que no tengan derecho a la depuración de sus aguas. Algunos de estos municipios cuentan con plantas depuradoras diseñadas como modelos a escala reducida de las depuradoras convencionales y que han sido abandonadas por sus costes de explotación y mantenimiento, sumado a las dificultades técnicas que implican para las administraciones locales.

Los sistemas convencionales resultan inasumibles para estos municipios y por ello surge el estudio de los sistemas no convencionales o sistemas blandos. Estos sistemas proponen una solución más económica y asumible tanto en ejecución como en explotación y mantenimiento. Antes de la implantación generalizada de estos sistemas es necesario estudiar su funcionamiento y sus resultados, con el fin de conocer de manera óptima el rendimiento de las plantas acuáticas, así como lo que podemos esperar de ellas si cambian las condiciones del vertido, dada la particularidad climática y poblacional de Aragón.

La planta piloto de La Almunia de Doña Godina servirá para analizar el funcionamiento de este tipo de depuración y su adaptación a las circunstancias locales. Los canales con distintas plantas acuáticas ayudarán al conocimiento de las plantas y su respuesta a diferentes vertidos, ya que éstos serán aplicados con mayor y menor carga contaminante en función de la época del año. Una vez estudiadas las plantas, conocidos sus requisitos, características y sus resultados, este tipo de sistemas se podrá implantar en las pequeñas poblaciones de la región.

Rendimientos que se esperan

Tras la consulta de una amplia bibliografía sobre el tema de los humedales artificiales, se tiene conocimiento de los rendimientos que se pueden esperar del trabajo de depuración realizado por las plantas. Los rendimientos aportados por la bibliografía proceden de casos prácticos en los que se han instalado humedales de manera similar al objeto de este proyecto y con el mismo fin: demostrar la capacidad depuradora de los humedales construidos.

Se han analizado varios ejemplos de humedales en funcionamiento: aeropuerto de Madrid-Barajas (Beascoechea et al., 2000); EDAR de Los Gallardos (Almería) (Lahora); y aeropuerto de Reus (Junco, 2004). Los valores obtenidos de estos experimentos han sido tomados entre los años 2000 – 2005. Además de estos casos nombrados también se tiene conocimiento de que estos sistemas de depuración fueron construidos y probados en el Aeropuerto de Zaragoza, pero no se han encontrado datos sobre su funcionamiento o rendimientos ni si está actualmente en funcionamiento. A continuación, se muestra en una tabla los datos que caracterizan cada uno de los humedales nombrados:

Tabla 2 | Datos de los humedales

	Aeropuerto de Reus	Madrid-Barajas	Los Gallardos (Almería)
Superficie	1440 m ²	1500 m ²	671 m ²
Caudal medio	-	200 m ³ /día	155 m ³ /día
Habitantes-equivalentes	500	700	264

En cuanto a las especies de plantas utilizadas, en Madrid son las Aneas (*Typha*) y Esparganio (*Sparganium erectum*) y en Almería las plantas protagonistas del humedal son Carrizos (*Phragmites australis*) y Aneas (*Typha dominguensis*). Del aeropuerto de Reus no se han encontrado datos sobre las plantas.

A continuación, se muestran los rendimientos obtenidos en cada una de las plantaciones. Éstos son muy similares, el único porcentaje que difiere es el de los sólidos en suspensión que puede deberse al pretratamiento aplicado en cada una de las depuradoras. En Madrid, el pretratamiento consiste en un tamizado únicamente mientras que en Almería consiste en un tamizado y un desarenador. En cuanto a los datos de sólidos en suspensión, nitrógeno y fósforo del Aeropuerto de Reus no hay datos, el porcentaje de reducción de DQO y DBO₅ es tan alto comparado con los otros debido a que este sistema contiene un tratamiento primario con un separador de grasas.

Tabla 3 | Rendimientos obtenidos

	Aeropuerto de Reus	Madrid-Barajas	Los Gallardos (Almería)
DQO	92 %	66 %	73 %
DBO₅	97 %	81 %	79 %
SS	-	67 %	94 %
Nitrógeno	-	36 %	36 %
Fósforo	-	28 %	40 %

Estos rendimientos corresponden a una media de los obtenidos a lo largo del año. Los máximos se encuentran en la estación de verano, cumpliendo los requerimientos mínimos que marca la Directiva, mientras que en invierno, debido a la sensibilidad biológica a las bajas temperaturas, los rendimientos son inferiores.

Diseño

Para un mayor conocimiento del funcionamiento de los humedales artificiales, se probarán tres de ellos: macrofitas en flotación, sistema de flujo superficial y sistema de flujo subsuperficial horizontal. De la misma manera, se probarán distintos tipos de plantas: Anea, Junco, Carrizo y Esparganio. Además, para ampliar aún más los conocimientos sobre estas plantas, se dispondrá de un conjunto de tuberías que nos permitirá modificar el orden de llegada y salida del vertido, de manera que conoceremos si una planta es más o menos susceptible a la cantidad inicial de contaminantes en el vertido.

Estas tuberías corresponden a los sistemas de flujo superficial y subsuperficial, ya que para el sistema en flotación, al disponer de únicamente dos tipos de plantas, la distribución de tuberías será menos compleja.

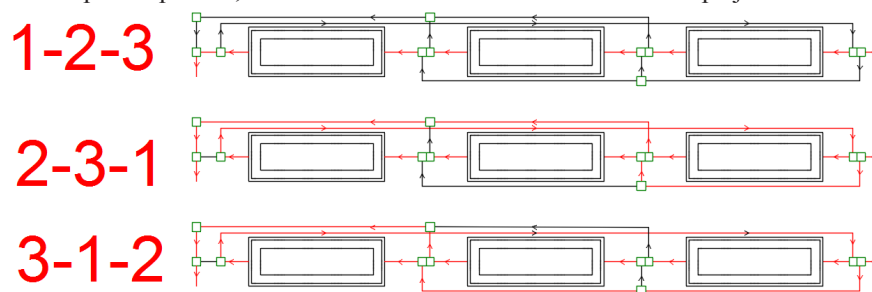


Figura 14 | Disposición de tuberías para alterar el orden de entrada del agua en las distintas balsas que forman la línea de tratamiento

En esta ilustración podemos observar las tuberías que permitirán todas las posibles combinaciones en cuanto a la entrada y orden a seguir por el caudal vertido. Lo que vemos en la ilustración es una serie de canales, de cualquiera de los tres sistemas, pues serán todos iguales en cuanto a disposición de tuberías; el caudal entraría por la tubería de la parte derecha de la imagen y siguiendo el recorrido de la línea roja se observa el recorrido del vertido para cada orden, y saldría al medio siempre desde la última arqueta, situada en la parte izquierda de la imagen. Entre los canales se colocarán arquetas dobles con tajaderas, mediante

las cuales se manipulará el recorrido del vertido a conveniencia. Junto a estas arquetas, una losa de hormigón servirá de apoyo a los equipos de toma de muestras que recogerán el agua de las arquetas para su posterior análisis en laboratorio.

La impermeabilización de los canales se realiza mediante una lámina impermeable o geomembrana y un geotextil de protección, unidos mediante soldadura y anclados al terreno mediante zanja. El lugar más adecuado para los canales, dentro de la EDAR, se puede ver en la ilustración a continuación.



Figura 15 | Emplazamiento de los canales

Parámetros de diseño

Se ha realizado un estudio del caudal que correspondería a un municipio tipo para el dimensionamiento los canales. El municipio tipo es de 50 habitantes ya que el objeto del presente proyecto es el estudio de los humedales artificiales como medio de depuración para su posible implantación en municipios de pequeñas poblaciones. El estudio se ha realizado fijando como criterio el número de habitantes y fijando el número de habitantes equivalentes.

En primer lugar, se ha realizado un estudio a partir de datos extraídos del IAEST, estos datos corresponden a los caudales medios de municipios de Aragón con poblaciones inferiores a 1000 habitantes. El caudal medio obtenido para esta población es de 350 l/día/habitante, con una media de habitantes de 500.

Por otro lado, se ha estudiado también los caudales medios para municipios con habitantes equivalentes de diseño de 50. En este caso, la media de habitantes es mucho inferior y más cercana a la que se tomará para los humedales protagonistas de este trabajo. El caudal medio para este caso es de 320 l/día/habitante.

Teniendo en cuenta que el municipio tipo será de 50 habitantes, el caudal de diseño que tomaremos será de 300 l/día/habitante, cerca de los caudales medios estudiados.

El dimensionamiento de los canales de depuración se ha calculado para 50 habitantes equivalentes, suponiendo una carga contaminante de DBO5 de 60 g/hab/día.

Dimensionamiento

Para el dimensionamiento de los **canales de macrofitas** hay determinar la superficie necesaria de tratamiento, empleándose la relación facilitada por Ortega, 2010 de 1,6 m² de superficie por cada habitante equivalente. La profundidad de los canales recomendada por el mismo autor es de 0,5 metros mínimo. El dimensionamiento se hace con 0,6 metros de lámina de agua, y de 0,2 metros de resguardo. La anchura de estos canales será de 3m. Se necesita una superficie de agua de 80 m², con un canal de 3 metros de ancho, por lo que la longitud necesaria es de 27 metros, como se van a dividir en tres canales, la longitud de cada canal será de 9 metros.

En el caso de los Canales de Flujo Superficial y Flujo Subsuperficial, se emplea la relación facilitada por García, 2008, con una dotación de 2,5m² por habitante equivalente. Para este caso la anchura de los canales será de 3,5 metros y la profundidad del agua será también 0,6 metros. La superficie de 125 m² con una anchura por canal de 3,5 metros requerirá que el canal tenga 35,7 metros de longitud, como son tres canales, 11,7 metros de longitud para cada uno.

CONCLUSIONES

La planta piloto de depuración por macrofitas de La Almunia de Doña Godina que se va a construir en verano de 2017 es una herramienta única para verificar el funcionamiento de este tipo de instalaciones y su adaptación al clima de Aragón. La planta piloto estará controlada de forma continuada por el Grupo de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GIHA) de la Escuela Politécnica de La Almunia (EUPLA) durante dos años ampliables. Al final de estos dos años, se deberá estar en condiciones de determinar que superficie se necesita para cumplir los parámetros de vertido que marca la Directiva durante todo el año, que plantas son las más adecuadas para el tratamiento y que requisitos de explotación tienen. Este análisis permitirá al Instituto Aragonés del Agua plantear instalaciones adaptadas a estos criterios en toda la Comunidad en su búsqueda de la depuración total en Aragón.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se lleva a cabo por el interés en el empleo de técnicas de depuraciones blandas y sostenibles del Instituto Aragonés del Agua, para cubrir las necesidades de depuración de los numerosos municipios de reducida población de la Comunidad. El IAA financia el proyecto, obras y la operación y mantenimiento durante dos años prorrogables.

REFERENCIAS

- de Miguel Beascoechea, E., & Fernandez González, J., 2005. *La depuración de las aguas mediante filtros verdes en el medio rural. El problema de las aguas residuales*. ambienta .
- de Miguel Beascoechea, E., de Miguel Muñoz, J., & Curt Fernández de la Mora, M. D., 2000. *Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación*. (J. Fernández Gonzalez, Ed.) Madrid.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M., 2010. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. (N. Antequera Durán, Ed.)
- García Serrano, J., & Corzo Hernández, A., 2008. *Depuración con humedales contruidos. Guía práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*.
- Instituto Aragonés del Agua, 2004. *Plan Especial de Depuración de Aguas Residuales de Aragón del IAA*.
- Junco, V. J., 2004. El filtro de macrofitas en flotación para la depuración de las aguas residuales y la regeneración de ríos, Lagos... *Revista técnica de medio ambiente* , 26-30.
- Ortega de Miguel, E., Ferrer Medina, Y., Salas Rodríguez, J. J., Aragón Cruz, C., & Real Cruz, Á., 2010. *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*. (M. d. Marino, Ed.) Madrid.