

INFORME DE LA DEPURACIÓN DE AGUA CON MACROFITAS EN LA DEPURADORA DE LA ALMUNIA

CONVENIO DE COLABORACIÓN

suscrito entre:

- EL INSTITUTO ARAGONÉS DEL AGUA Y
- LA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA DE LA ALMUNIA

Para la colaboración en actividades de formación, investigación y desarrollo en materiales relativas al ciclo del agua.

Índice

1. ANTECEDENTES	4
2. OBJETO DEL PROYECTO	4
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
Eliminación de sólidos suspendidos.....	5
Eliminación de materia orgánica.....	5
Eliminación de nitrógeno	5
Eliminación de fósforo	6
Eliminación de metales pesados	6
Eliminación de bacterias	6
Fitodepuración en humedales artificiales	6
Tipos de humedales	7
Sistemas de tratamiento basados en macrofitas de hojas flotantes	7
Sistemas de tratamiento basados en macrofitas sumergidas	8
Sistemas de tratamiento basados en macrofitas enraizadas emergentes	8
Humedales de flujo superficial (FWS)	8
Humedales de flujo subsuperficial (SFS)	9
Flujo subsuperficial horizontal	10
Flujo subsuperficial vertical.....	11
Macrofitas en flotación	11
Vegetación.....	12
Anea	12
Junco	13
Carrizo	13
Esparganio.....	14
3.1. Metodología de trabajo	15
3.2. Metodología de análisis	16
pH	17
Conductividad (CE)	17
Oxígeno disuelto (OD)	17
DBO ₅	17
DQO	17
Turbidez (NTU)	17
Fósforo (P)	17

Nitratos (NO ₃ -).....	17
Amonio (NH ₄)	17
Sólidos suspendidos	17
4. RESULTADOS	18
4.1. Dimensionamiento	18
4.2. Pretratamiento	18
4.3. Sistemas de flotación	18
4.4. Oxigenación.....	19
4.5. Tomamuestras.....	19
4.6. Resultados de depuración.....	19
4.6.1. DBO ₅	19
4.6.2. NTU.....	21
4.6.3. P.....	21
4.6.4. NO ₃	22
4.6.5. NH ₄	23
4.6.6. Oxígeno disuelto.....	23
5. CONCLUSIONES	24
5.1.- Para los parámetros de contaminación:	24
pH	24
Conductividad Eléctrica.....	24
Oxígeno Disuelto.	24
DBO ₅	24
DQO	25
TURBIDEZ.....	25
FÓSFORO	25
NITRÓGENO TOTAL, NITRATO Y AMONIO.....	25
5.2.- Para el funcionamiento del sistema.....	25
6.- LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.	26
<i>Bibliografía</i>	<i>27</i>

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla descriptiva del sistema construido.	15
---	----

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Plantas acuáticas comunes. (Fuente: Casa Enlatada – WordPress.com).....	7
--	---

Ilustración 2. Jacinto de agua y lenteja de agua.....	8
Ilustración 3. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrofitas.....	8
Ilustración 4. Cortes transversal y longitudinal de un humedal artificial con fuljo subsuperficial.....	9
Ilustración 5. Corte longitudinal de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.....	10
Ilustración 6. Esquema humedal artificial tipo subsuperficial horizontal.....	10
Ilustración 7. Esquema humedal artificial tipo flujo subsuperficial vertical.....	11
Ilustración 8. Esquema de un humedal con especies en flotación.....	11
Ilustración 9. Anea (Typha Latifolia).....	13
Ilustración 10. Junco (Scirpus).....	13
Ilustración 11. Carrizo (Phragmites).....	14
Ilustración 12. Esparganios.....	14
Ilustración 13. (Izq.) Sistema de toma de agua, compuesto por una bomba y un by pass para retirar el exceso de agua que nos ofrece la bomba. (Dcha.) Temporizador para controlar el caudal de entrada al sistema.....	15
Ilustración 14. (Izq.) Sistema de flotación con poliespán perforado. (Dcha.) Sistema de flotación que consiste en una manta de arpillera.....	16
Ilustración 15. (Izq.) Sistema de sujeción de la vegetación en planchas de poliestireno expandido. (Dcha.) Vegetación colocada en las planchas.....	18
Ilustración 16. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en DBO ₅ para el sistema de flujo subsuperficial.....	19
Ilustración 17. . Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en DBO ₅ para el sistema de flujo en flotación.....	19
Ilustración 18. Gráfica de tendencias en muestreos de DBO ₅ para los años 2018 y 2019 para el sistema de flujo subsuperficial.....	20
Ilustración 19. Gráfica de tendencias en muestreos de DBO ₅ para los años 2018 y 2019 para el sistema de flujo en flotación.....	20
Ilustración 20. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en turbidez (NTU) para el sistema de flujo subsuperficial.....	21
Ilustración 21. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en turbidez (NTU) para el sistema de flujo en flotación.....	21
Ilustración 22. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Fósforo para el sistema de flujo en subsuperficial...21	21
Ilustración 23. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Fósforo para el sistema de flujo en flotación.....	22
Ilustración 24. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Nitratos para el sistema de flujo subsuperficial.....	22
Ilustración 25. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Nitratos para el sistema de flujo en flotación.....	22
Ilustración 26. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Amonio para el sistema de flujo en subsuperficial, .23	23
Ilustración 27. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Amonio para el sistema de flujo en flotación.....	23
Ilustración 28. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en OD para el sistema de flujo subsuperficial.....	23
Ilustración 29. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en OD para el sistema de flujo en flotación.....	24

1. ANTECEDENTES

De la importancia de preservar el agua por ser un recurso indispensable para la vida, surge la necesidad de depurar las aguas residuales. A raíz de esta necesidad se crean normativas, en Aragón se redacta el Plan Aragonés de Saneamiento y Depuración, que fija la ejecución de depuradoras en la comunidad.

Se construyen depuradoras para las poblaciones de mayor número de habitantes, son depuradoras convencionales, muy eficaces y en algunas ocasiones costosas. El problema viene con la depuración de los pequeños municipios, que engloban a una parte de la población de la comunidad.

A fecha de 2018, la población de Aragón que dispone de depuración de sus aguas ronda el 88 %, mientras, aún queda el 12% de población sin sistema de depuración. La mayor parte de la población de Aragón vive en municipios de más de 1.000 habitantes, este 12% corresponde a la población que reside en municipios de menos de 1.000 habitantes. (datos extraídos del IAEST)

En algunos casos se ha resuelto la depuración de una pequeña población con el diseño de un modelo convencional de depuradora pero a escala reducida, algo que sigue siendo económicamente muy costoso, por los costes de construcción, explotación y mantenimiento.

Con estos problemas en la depuración en las pequeñas poblaciones surge este estudio, que se centra en los sistemas no convencionales, que son sistemas con un bajo consumo energético, con un coste más asumible en explotación y mantenimiento, con el fin de cumplir los objetivos de la Directiva Europea en cuanto a depuración.

2. OBJETO DEL PROYECTO

En este proyecto de estudio se tratan los sistemas de depuración no convencionales. Estos 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 de 50 habitantes. De esta forma se podrá estudiar tanto su funcionamiento como sistema de depuración como el de la vegetación empleada.

La fitodepuración, el sistema a estudiar para este proyecto, utiliza la energía solar a través de la fotosíntesis de las plantas macrofitas. Estas plantas son flotantes de forma natural y forman un tapiz de raíces y rizomas que ocupan el volumen del canal, forzando al agua a circular a través de las raíces. Estas raíces contienen microorganismos que degradan la materia orgánica, eliminan el fósforo y el nitrógeno (elementos eutrofizantes).

El influente de este sistema debe someterse previamente a un proceso de desbaste para evitar obstrucciones en las tuberías de conducción y reparto.

Como diferencia entre estos sistemas y los convencionales, la velocidad del proceso es más lenta, al producirse de forma natural. Otra de las diferencias es el coste del sistema, tanto de instalación como de mantenimiento. El bajo consumo energético empleado reduce los costes

de mantenimiento y operación. En estos sistemas se reducen los malos olores y el impacto visual se minimiza al mimetizarse en el paisaje. La principal desventaja es la gran área de terreno necesario para construir el sistema de fitodepuración.

Por fitodepuración se entiende 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. (de Miguel Beascochea, de Miguel Muñoz, & Curt Fernández de la Mora, 2000) A su vez, las plantas macrofitas son aquellas que pueden vivir en terrenos inundados toda su vida o durante largos periodos de tiempo encharcadas.

El funcionamiento de los humedales 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.

3. MATERIALES 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. (Delgado, Camacho, Pérez, & Andrade, 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. (Delgado, Camacho, Pérez, & Andrade, 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, Camacho, Pérez, & Andrade, 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, Camacho, Pérez, & Andrade, 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, Camacho, Pérez, & Andrade, 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. (de

Miguel Beascochea, de Miguel Muñoz, & Curt Fernández de la Mora, Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación, 2000)

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.

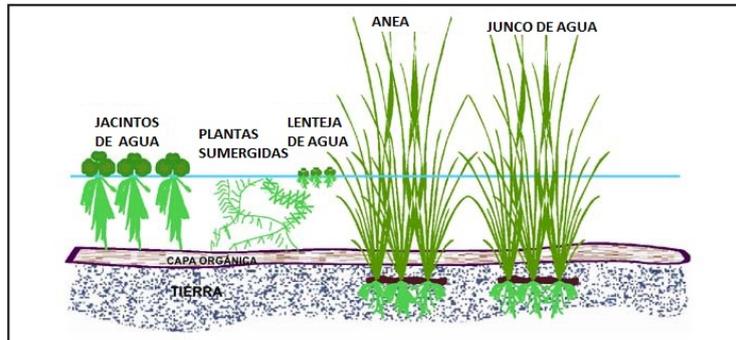


Ilustración 1. Plantas acuáticas comunes. (Fuente: Casa Enlatada – WordPress.com)

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, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)



Ilustración 2. Jacinto de agua y lenteja de agua

Sistemas de tratamiento basados en macrofitas sumergidas: comprenden helechos, numerosos musgos y cariofitas y muchas angiospermas. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

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

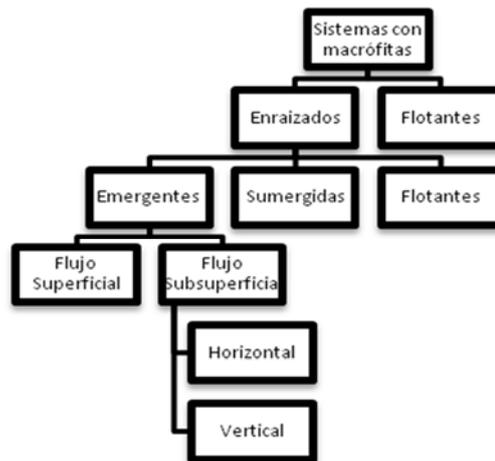


Ilustración 3. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrofitas.

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, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

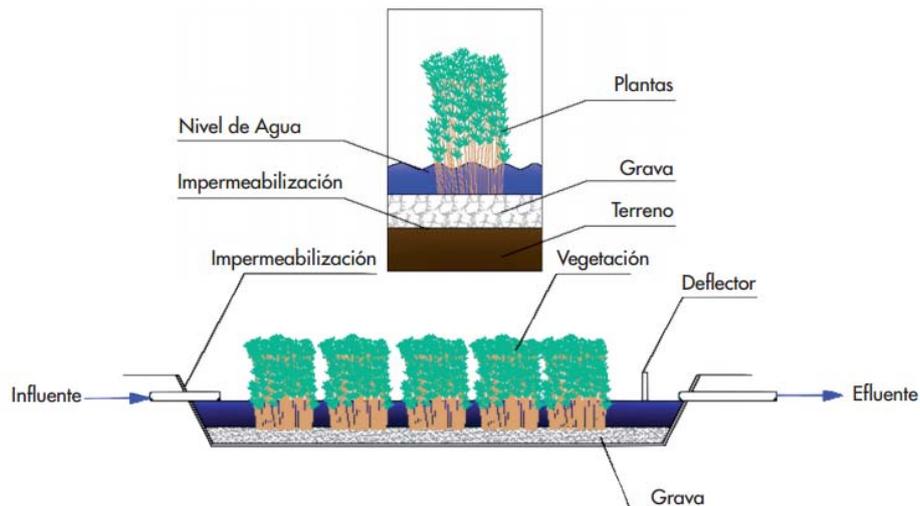


Ilustración 4. Cortes transversal y longitudinal de un humedal artificial con flujo subsuperficial. (Ortega de Miguel, Ferrer Medina, Salas Rodríguez, Aragón Cruz, & Real Cruz, 2010)

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. (de Miguel Beascochea, de Miguel Muñoz, & Curt Fernández de la Mora, Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación, 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 es 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.

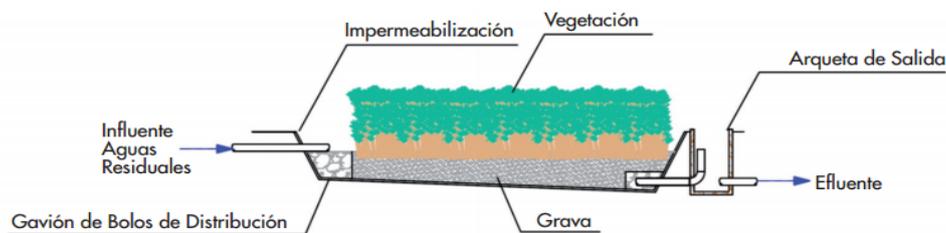


Ilustración 5. Corte longitudinal de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. (Ortega de Miguel, Ferrer Medina, Salas Rodríguez, Aragón Cruz, & Real Cruz, 2010)

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.

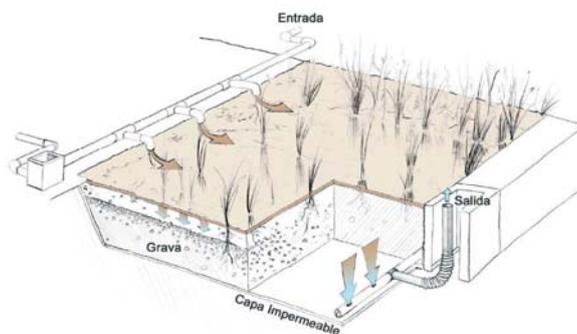


Ilustración 6. Esquema humedal artificial tipo subsuperficial horizontal. (Fuente: <http://depuranatura.blogspot.com.es>)

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.

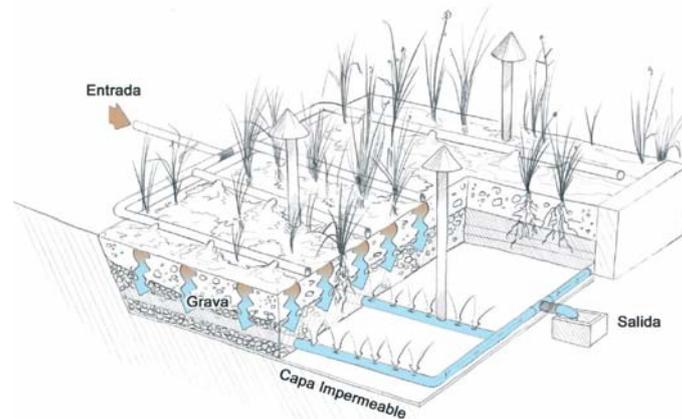
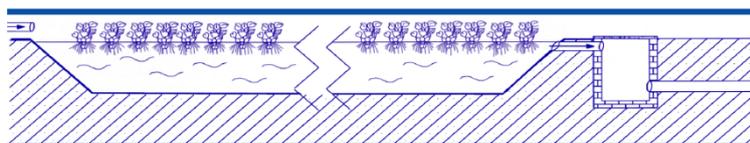


Ilustración 7. Esquema humedal artificial tipo flujo subsuperficial vertical. (Fuente: <http://depuranatura.blogspot.com.es>)

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.

Macrófitas 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. (de Miguel Beascochea, de Miguel Muñoz, & Curt Fernández de la Mora, Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación, 2000)



Ilustración

de un humedal con especies en flotación. (de Miguel Beascochea, de Miguel Muñoz, & Curt Fernández de la Mora, Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación, 2000)

8. Esquema de

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 eneas e higrófitos 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 escurrentía 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. (Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, 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.



Ilustración 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 lacustre*, 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.



Ilustración 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.



Ilustración 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.



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

3.1. Metodología de trabajo

La EDAR de La Almunia se conforma de un pretratamiento, para la eliminación de objetos gruesos, arenas y grasas, un tratamiento biológico y un decantador secundario.

El sistema está diseñado para una población de 50 habitantes equivalentes, a partir de los cuales se ha calculado el caudal de entrada. Estamos ante el estudio de un sistema de depuración a tamaño real.

El sistema ejecutado consta de 6 balsas, una línea de 3 para cada uno de los sistemas a estudiar. Para la toma de agua en el proyecto inicial se planteó una perforación en la pared de la arqueta de entrada al reactor, pero en la fase de construcción fue sustituido por un sifón, con el objeto de no producir afecciones a la concesionaria de la depuradora. Este sifón ha producido problemas en la entrada de agua al sistema de forma continuada, por ello se ha procedido a sustituirlo por una bomba que introduzca agua de manera continuada al sistema.



Ilustración 13. (Izq.) Sistema de toma de agua, compuesto por una bomba y un by pass para retirar el exceso de agua que nos ofrece la bomba. (Dcha.) Temporizador para controlar el caudal de entrada al sistema.

Inicialmente en la fase de proyecto se optó por no incluir un sistema de depósito de sólidos, considerando suficiente el sistema de pretratamiento existente en la depuradora. Sin embargo, la práctica diaria demostró que en las balsas se acumulaba fango, por lo que se procedió a instalar un sistema decantador que constan de tres depósitos previo a la entrada al sistema.

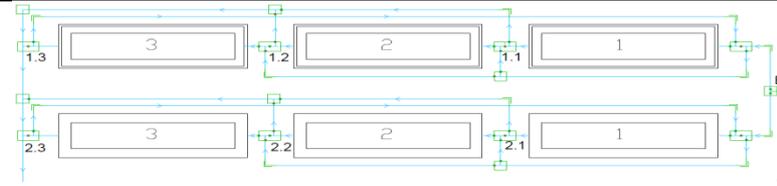
Con la disposición de los canales y el conjunto de tuberías que conforman el sistema podemos redirigir el caudal de agua, mediante unas tajaderas en las arquetas, a la balsa que queramos que reciba la carga contaminante más alta, para conocer cómo reacciona la vegetación de esa balsa, a la vez que conocer el tipo de sistema que es más apropiado para cada tipo de vegetación.

A continuación, se muestra una tabla descriptiva del sistema construido.

Tabla 1. Tabla descriptiva del sistema construido.

SISTEMAS A TRATAR	MACROFITAS EN FLOTACIÓN	FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL
VEGETACIÓN	Anea	Anea
	Carrizo	Carrizo
	Esparganio	Junco

DISPOSICIÓN



El sistema consta de tuberías para cambiar el orden de entrada del influente a los canales.

SISTEMA DE FLOTACIÓN

Manto de arpillera
Sacos arpillera
Poliestireno extrusionado

DIMENSIONES

<p>3 canales Sección trapezoidal 10,50 m longitud (fondo) 2,30 m ancho (fondo) 0,60 m profundidad + 0,20 m resguardo</p>	<p>3 canales Sección trapezoidal 10,50 m longitud (fondo) 2,30 m ancho (fondo) 0,60 m profundidad + 0,20 m resguardo</p>
--	--



Ilustración 14. (Izq.) Sistema de flotación con poliestireno perforado. (Dcha.) Sistema de flotación que consiste en una manta de arpillera.

Los sistemas de flotación colocados inicialmente constaban de una malla flotante de fibra de coco en la balsa 1, la cual servía de soporte a la vegetación. En la balsa 2 se instaló un sistema consistente en sacos de arpillera que contenían la vegetación y la mantenían a flote. En la balsa 3 el sistema se basaba en planchas de poliestireno extrusionado de alta densidad con orificios para la vegetación.

3.2. Metodología de análisis

Se toman muestras compuestas semanalmente en los puntos de entrada y salida de cada uno de los sistemas. Inicialmente las muestras compuestas se tomaban manualmente en el periodo de 8 horas, posteriormente se diseñó dispositivo capaz de tomar muestra de una determinada masa de agua para ser almacenada en un depósito de forma automática en periodos de tiempo regulables. Con esto se pretende que la muestra almacenada sea representativa.

Las muestras son analizadas en laboratorio empleando diversos equipos y procedimientos.

pH

Se emplea un pHmetro Portátil Impermeable de la marca HANNAinstruments modelo HI 9025.

Conductividad (CE)

La conductividad es medida con un Medidor de conductividad portátil multirango e impermeable de la marca HANNAinstruments modelo HI 9033.

Oxígeno disuelto (OD)

Se mide este parámetro empleando dos sistemas diferentes, por un lado, mediante una sonda en agua en movimiento que nos proporciona el oxígeno disuelto en tanto por ciento y, por otro lado, con ayuda de un equipo multiparámetro que nos proporciona el oxígeno disuelto en mg/l.

DBO₅

Para determinar la DBO empleamos el sensor BOD, se basa en el método respirométrico que proporciona una medición directa del oxígeno consumido de los microorganismos en la muestra, en un ambiente cerrado, a una temperatura constante y con agitación constante.

DQO

La DQO se determina gracias a un equipo multiparamétrico y un reactor a 150 °C. Al igual que otros parámetros, se emplean distintos rangos hasta dar con el adecuado para la lectura de la DQO correcta.

Turbidez (NTU)

Se emplea un Turbidímetro TN- 100.

Fósforo (P)

Para la determinación del Fósforo se emplea un equipo de la marca HANNAinstruments modelo HI 706.

Nitratos (NO₃-)

La medida de los nitratos se realiza con un medidor microprocesador de auto-diagnóstico portátil de la marca HANNAinstruments modelo HI 96728.

Amonio (NH₄)

Para medir amonio se emplea un equipo de la marca HANNAinstruments modelo HI733 (en Rango Alto).

Sólidos suspendidos

La medida de sólidos suspendidos se realiza con 1 L de muestra, haciendo pasar ésta por un filtro e introduciendo éste en el horno a 105 °C para su secado.

Tras el secado del filtro, se pesa en la báscula y obtenemos los mg/l de sólidos suspendidos que tenemos en nuestras muestras.

4. RESULTADOS

En este apartado se analizan los resultados obtenidos en función de los distintos puntos a estudiar que presentaba el proyecto.

4.1. Dimensionamiento

Tras los primeros meses de funcionamiento, y a la vista de los resultados obtenidos se concluyó que las balsas estaban infra dimensionadas. La colocación de la bomba para la entrada de caudal al sistema nos permitió estudiar el caudal de entrada óptimo. Y tras varias pruebas se encontró que una entrada del 50% del caudal de diseño era la óptima para ambos sistemas. Esto nos lleva a concluir que la superficie necesaria para estos sistemas está infravalorada en la bibliografía analizada, necesitando aumentar significativamente la misma en los proyectos que se acomentan.

4.2. Pretratamiento

La ausencia de un tratamiento previo a la entrada al sistema que eliminara los sólidos suspendidos dio como resultado la colmatación de las balsas de fango. De esta forma se concluye que el sistema no convencional requiere un pretratamiento y un tratamiento primario.

4.3. Sistemas de flotación

Los sistemas de flotación consistentes en sacos de arpillera fueron sustituidos por planchas de poliestireno de baja densidad de 14 centímetros de grosor.

De la misma manera, también fue sustituido el sistema de flotación de la balsa 3 consistente en placas de poliestireno de alta densidad por otras placas de poliestireno de baja densidad de 5 centímetros de diámetro. En soporte de la vegetación flotante dentro de las balsas consta de un alambre de hierro, el cual atraviesa el sustrato de la planta y, tras darle forma de omega (Ω) se inserta en el poliestireno. Este mecanismo permite que la planta mantenga una profundidad fija.



Ilustración 15. (Izq.) Sistema de sujeción de la vegetación en planchas de poliestireno expandido. (Dcha.) Vegetación colocada en las planchas.

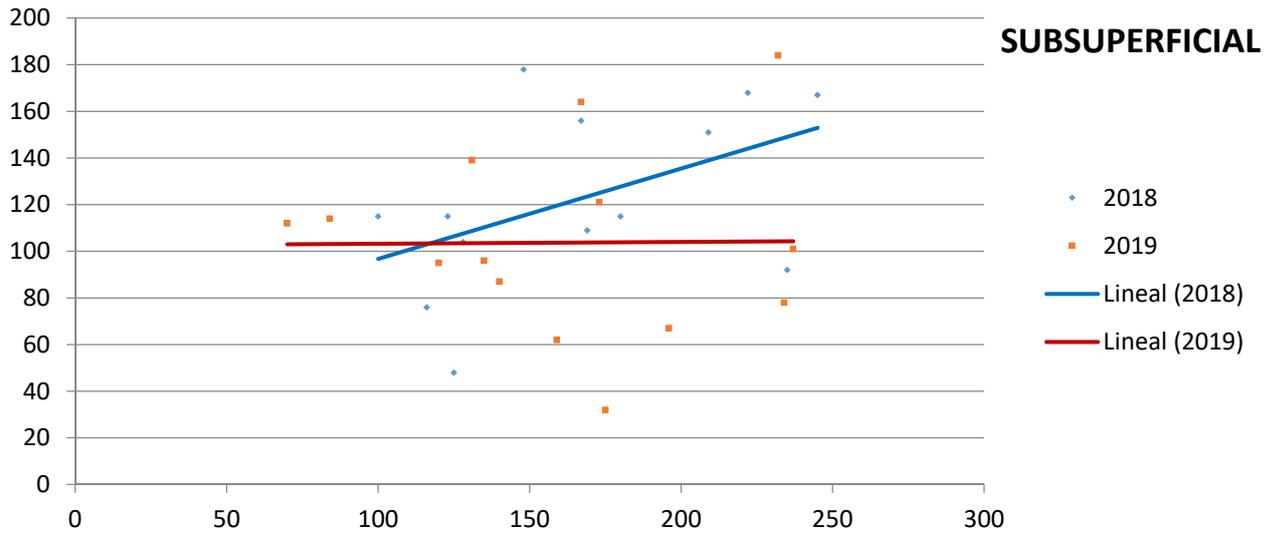


Ilustración 18. Gráfica de tendencias en muestreos de DBO₅ para los años 2018 y 2019 para el sistema de flujo subsuperficial.

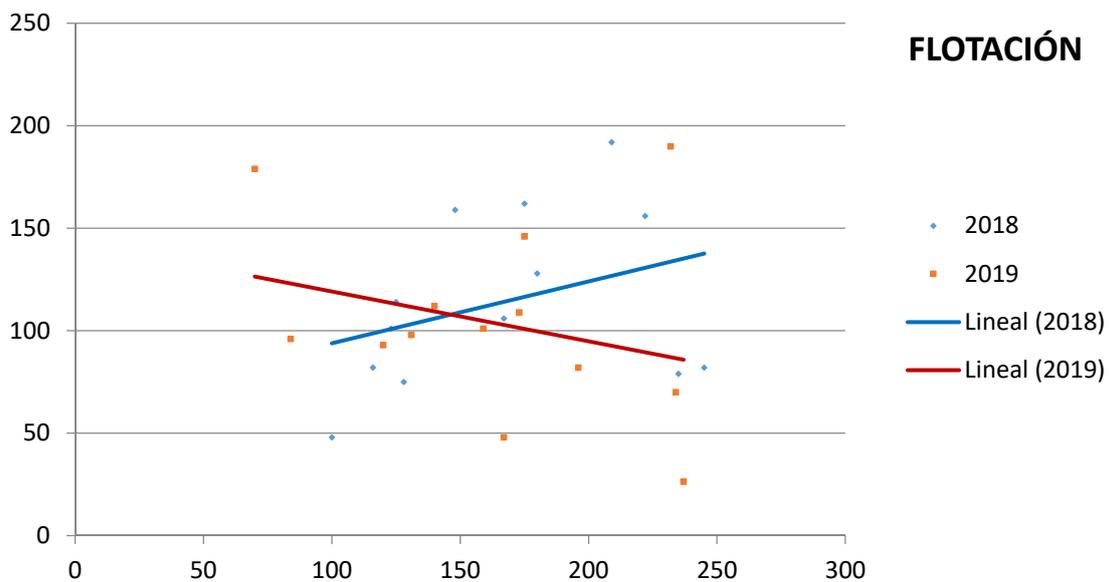


Ilustración 19. Gráfica de tendencias en muestreos de DBO₅ para los años 2018 y 2019 para el sistema de flujo en flotación.

4.6.2. NTU

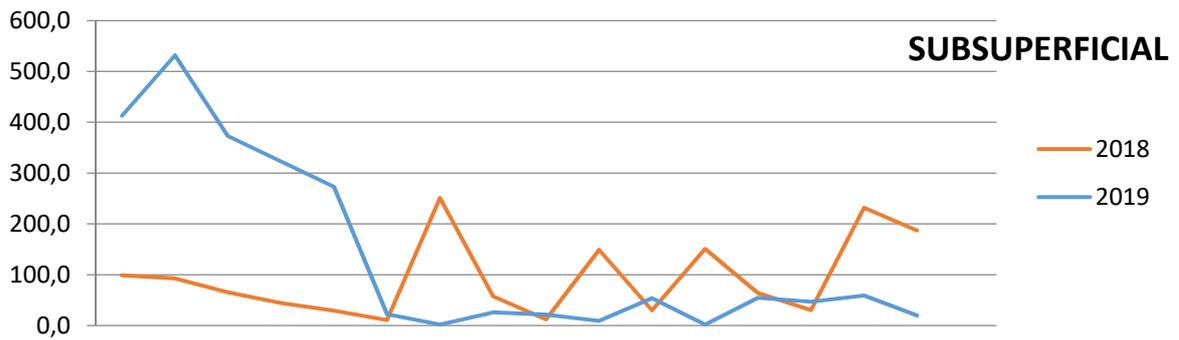


Ilustración 20. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en turbidez (NTU) para el sistema de flujo subsuperficial.

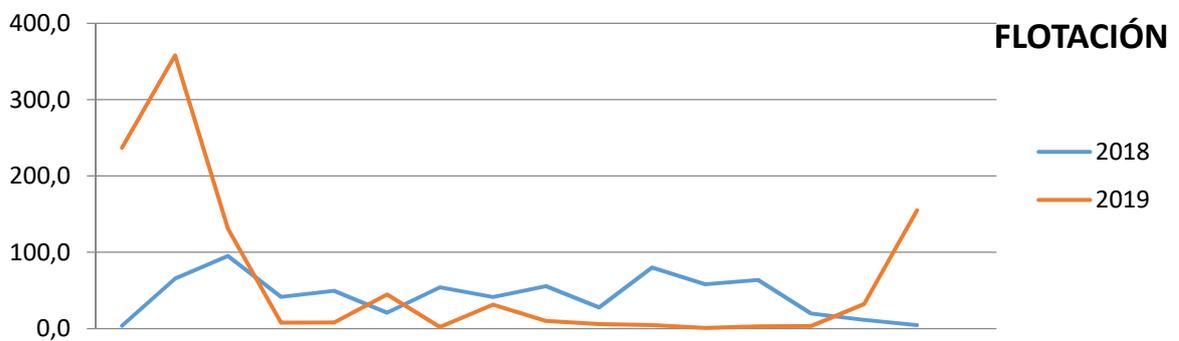


Ilustración 21. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en turbidez (NTU) para el sistema de flujo en flotación.

4.6.3.P

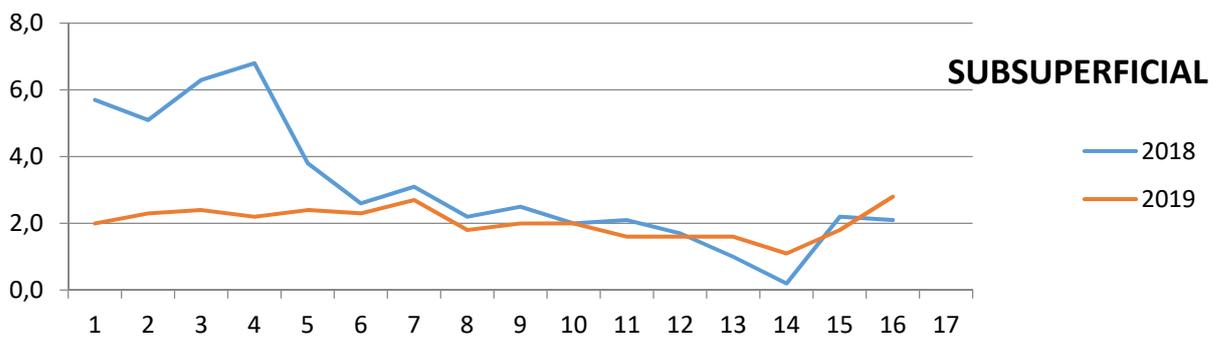


Ilustración 22. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Fósforo para el sistema de flujo en subsuperficial.

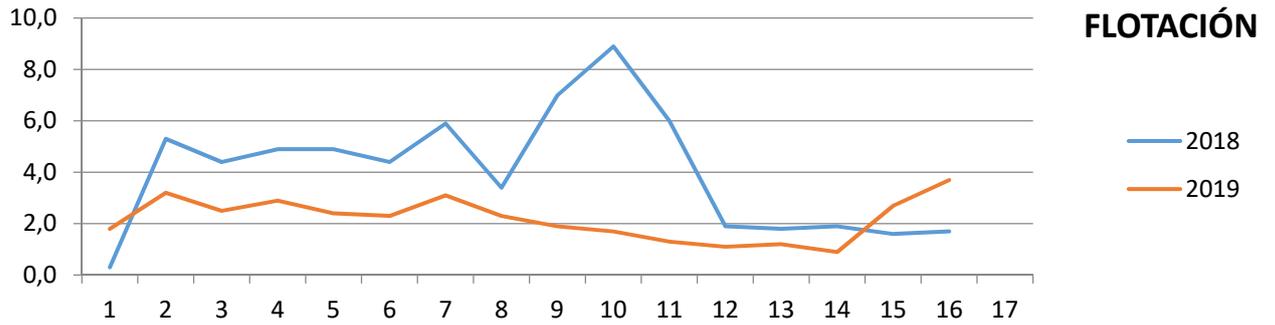


Ilustración 23. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Fósforo para el sistema de flujo en flotación.

4.6.4. NO₃

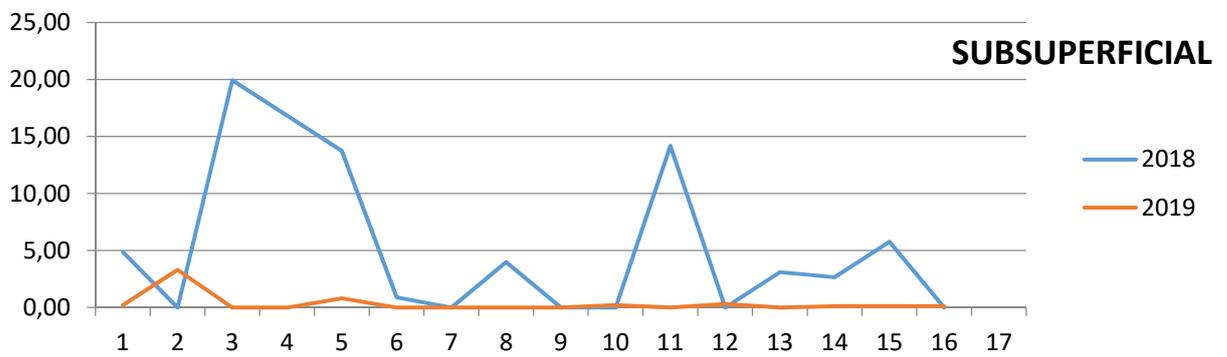


Ilustración 24. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Nitratos para el sistema de flujo subsuperficial.

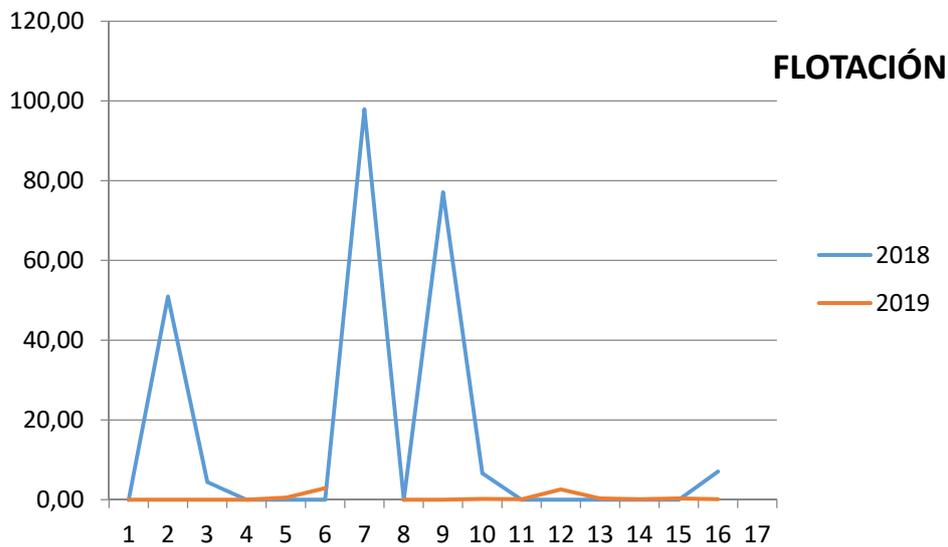


Ilustración 25. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Nitratos para el sistema de flujo en flotación.

4.6.5. NH₄

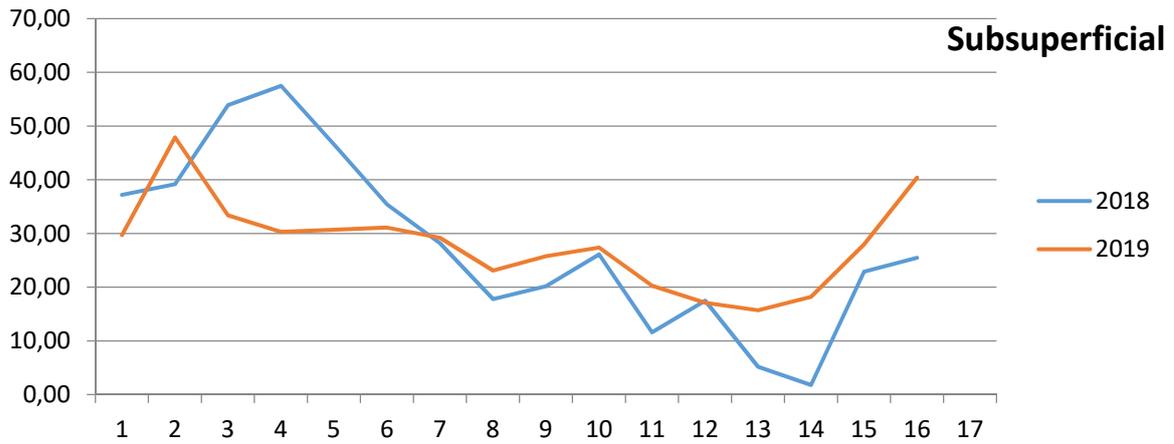


Ilustración 26. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Amonio para el sistema de flujo en subsuperficial,

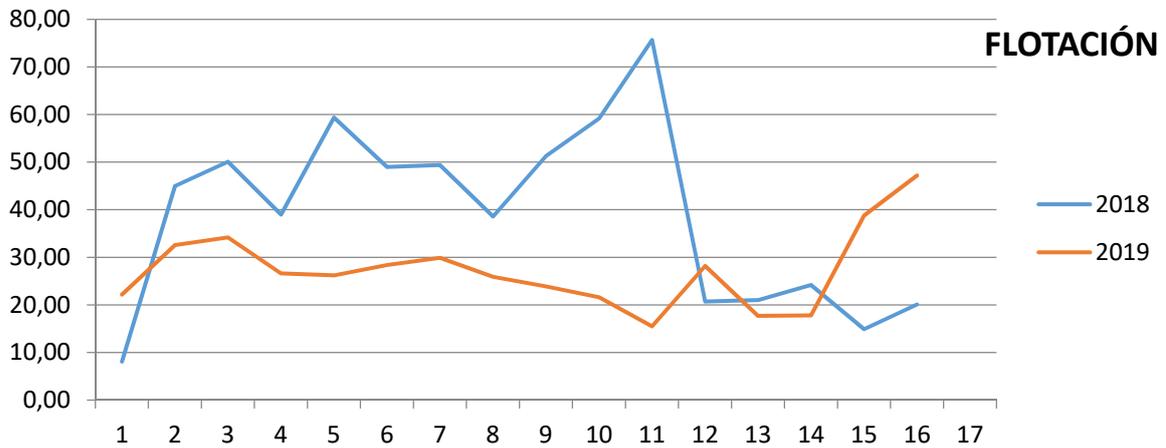


Ilustración 27. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en Amonio para el sistema de flujo en flotación

4.6.6. Oxígeno disuelto

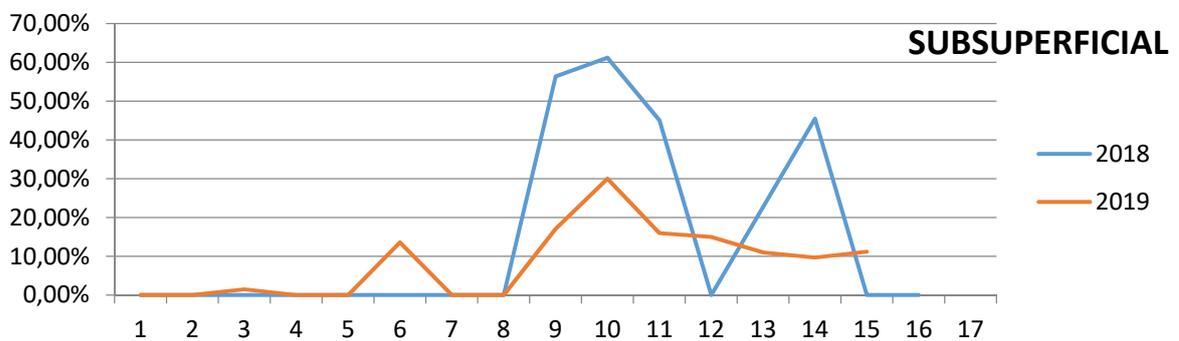


Ilustración 28. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en OD para el sistema de flujo subsuperficial.

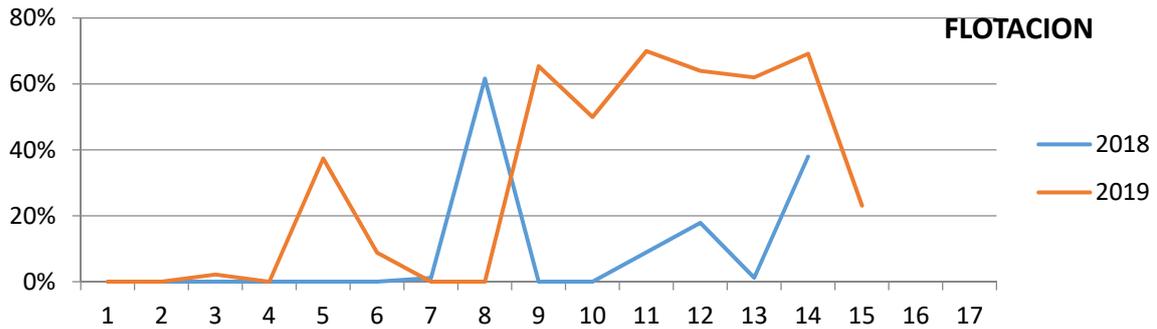


Ilustración 29. Gráfica muestreos 2018 vs. 2019 en OD para el sistema de flujo en flotación.

5. CONCLUSIONES

Durante la puesta en marcha del sistema se ha llegado a unas primeras conclusiones sobre el funcionamiento de los sistemas de depuración no convencionales objeto de este proyecto de investigación.

5.1.- Para los parámetros de contaminación:

pH

Durante el periodo de parada vegetativa el pH resultante del tratamiento con en flotación es significativamente mayor.

Durante el periodo de actividad vegetativa, el pH resultante de los dos tratamientos no tiene diferencias significativas, siendo muy similar al de entrada.

Conductividad Eléctrica.

La CE es un parámetro que no sufre grandes alteraciones entre la entrada de Agua Residual y la salida de los tratamientos. Sí que tenemos que señalar que el agua a la salida del tratamiento subsuperficial muestra una tendencia al alza con respecto a la entrada y el tratamiento de macrofitas en flotación, motivado seguramente por la reacción que realiza esta agua residual con el sustrato del tratamiento subsuperficial.

Oxígeno Disuelto.

El oxígeno disuelto es un recurso básico en el medio ambiente de ríos y lagos. Son necesarios niveles adecuados de oxígeno disuelto para la vida acuática. El nivel mínimo recomendado en ríos es de 5 mg/l.

Analizando la evolución de este parámetro podríamos concluir que es prácticamente cero en el tratamiento subsuperficial, manteniéndose en unos más altos en el tratamiento de macrofitas en flotación en los meses de verano decayendo en el mes de octubre.

DBO₅

Lo primero que se puede observar de las gráficas y de los datos es una fuerte oscilación entre los valores absolutos de la DBO₅ de entrada a nuestro sistema entre los meses de verano, con una menor DBO₅, y los de invierno con un valor mayor. Esto es motivado por el aporte del agua de riego al sistema de saneamiento urbano.

Teniendo presente estas oscilaciones se puede concluir que si analizamos el porcentaje de reducción del este parámetro, el sistema que tiene un mejor comportamiento en los meses de invierno es el de tratamiento subsuperficial, consiguiéndose reducción cercanas al 90% en numerosas ocasiones. Si analizamos el comportamiento en los meses de actividad vegetativa, tiene un mejor comportamiento el de macrofitas en flotación en la mayoría de las ocasiones analizadas.

DQO

Como en el caso del parámetro anterior, no podría ser de otra manera, sufre oscilaciones importantes en los valores de entrada, originados por intrusión de agua de riego en la red de saneamiento de La Almunia.

Si se analizan los periodos mostrados se puede concluir lo siguiente:

1.- El periodo de otoño-invierno, el sistema subsuperficial se ajustó en la mayoría de las mediciones al límite establecido de vertido (125 mg/l), presentado un mejor comportamiento en el porcentaje de reducción.

2.- Con respecto al periodo de verano, los dos sistemas se ajustan al límite de vertido, observándose una mayor estabilidad en el sistema de macrofitas en flotación.

TURBIDEZ

Con respecto al comportamiento de la turbidez, se puede concluir que el tratamiento subsuperficial reduce la misma sólo en los momentos de parada vegetativa del macrofito, siendo su comportamiento inverso cuando las plantas no se encuentran en reposo. Este comportamiento, pero a la inversa se puede observar el tratamiento de macrofitas en flotación.

FÓSFORO

Se observa que en la gran mayoría de los casos el fósforo detectada a la salida de los tratamientos es mayor que el de la entrada.

En la actualidad se está investigando el motivo de este hecho, analizando tanto las formas químicas de este elemento y su transformación en medio acuoso como el ciclo biogeológico del mismo.

NITRÓGENO TOTAL, NITRATO Y AMONIO

Con respecto a estos parámetros y observando los datos de las analíticas y las gráficas mostradas se pueden concluir lo siguiente:

1.- Las balsas de depuración reducen, en la mayoría de las ocasiones; el nitrógeno de las aguas residuales.

2.- Que durante todos los periodos el comportamiento de reducción de este parámetro es muy similar en los dos tratamientos.

3.- Que, durante el periodo de retención en las balsas, la forma más mayoritaria de presencia en agua es amoniacal, encontrándose en contadas ocasiones la forma oxidada en las mismas.

5.2.- Para el funcionamiento del sistema.

La vegetación que mejores resultados ha ofrecido es la anea (*Thypha Latifolia*), tanto en el sistema de flujo subsuperficial como en el sistema de flujo en flotación. Los juntos (*Scirpus Lacustre*) no resultaron vegetación adecuada y fueron reemplazados. El esparganio (*Sparganium*) colocado en flotación ha funcionado correctamente con la única modificación en su sistema de flotación a otro similar con orificios de mayor tamaño.

En cuanto al comportamiento de la vegetación a distinta carga contaminante, la anea (*Thypha Latifolia*) es la planta que mejor ha soportado las mayores cargas.

La anea colocada en el sistema de flotación volcó al alcanzar un tamaño superior a un metro de alto, mientras en el sistema de flujo subsuperficial ha soportado un tamaño mucho mayor antes de volcarse (aprox. dos metros).

El sistema de flotación diseñado para la balsa 2 (sacos de arpillera hechos flotar mediante flotadores de poliestireno expandido) fue reemplazado debido a su hundimiento en las primeras semanas de puesta en marcha del sistema. El sistema implantado fue constituido por planchas de poliestireno expandido, similares a las colocadas en la balsa 3, con orificios de mayor tamaño. Estos orificios han permitido a la vegetación crecer a mayor velocidad debido al espacio que dispone la vegetación para su crecimiento y aireación y, por ello ha sido implantado también en la balsa 3 sustituyendo así las placas de poliestireno extrusionado de alta densidad.

Concluimos así que el sistema de flotación óptimo para el carrizo (*Phragmites*) y el esparganio (*Smarganium*) son las placas de poliestireno de 5 cm de espesor con orificios de 7-8 cm de diámetro, mientras para la anea (*Thypha Latifolia*) las placas óptimas son igualmente de poliestireno pero de 15 cm de espesor y orificio de igual tamaño; el espesor mayor evita que la planta vuelque cuando alcanza un tamaño considerado.

En cuanto a los elementos mínimos para la puesta en marcha de un sistema de depuración mediante plantas macrófitas, es necesario un sistema de decantación previo a la entrada a cualquiera de los dos sistemas de depuración construidos.

En cuanto a parámetros contaminantes, la conclusión obtenida en los primeros meses de funcionamiento es la necesidad de la presencia de oxígeno en el medio para la correcta y esperada eliminación de contaminantes.

Por otro lado, también influye en la eliminación de contaminantes el crecimiento de la vegetación. En los primeros meses de puesta en marcha del sistema se realizaron varias modificaciones en puntos que influyeron a la vegetación, sobre todo a la instalada en el sistema de flujo subsuperficial, la cual se sustituyó dos veces en dos de sus balsas debido a los problemas con la deposición de fangos. Estas acciones han ralentizado el crecimiento de la vegetación y han influido directamente en el análisis de los datos que aquí se muestran.

Como resultados de transferencia y diseminación; este convenio se ha materializado en dos comunicaciones a congresos, en varios posters de congresos y en dos modelos de utilidad abiertos (bomba tomamuestras y sistema de soporte de macrofitas).

6.- LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

Como líneas futuras de investigación se proponen las siguientes:

- 1.- Conexión de las dos líneas de tratamiento con el fin de observar su comportamiento a lo largo de todo el año.
- 2.- Colocación de túneles invernaderos con el fin de prolongar el periodo vegetativo de las plantas macrofitas y acortar el reposo vegetativo.
- 3.- Estudiar el comportamiento de estas plantas frente a contaminantes emergentes (disruptores endocrinos, fármacos...) y su capacidad de biorremediación para las aguas residuales.

Bibliografía

- Aina, M., Kpondjo, N., Adoukpe, J., Chougourou, D., & Mpudachirou, M. (2012). Study of the Purification Efficiencies of three Floating Macrophytes in Wastewater Treatment. *International Research Journal of Environment Sciences* .
- Alfaro, C., Perez, R., & Solano, M. (2013). Saneamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional. *Revista de Ciencias Ambientales Tropical Journal of Environmental Sciences* .
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands. . *Water Science and Technology* .
- Bustamante, I. d., Vera, S., Sanz, J., Alpuente, J., Mateos, J., León, V., y otros. *Tecnologías de depuración de aguas residuales mediante filtros verdes: diseño, funcionamiento, evolución y control de la contaminación de las aguas subterráneas*.
- Cajigas Delgado, Á. (2012). La evolución de la depuración de las aguas residuales urbanas en España. *Ingeniería Civil* , 9-20.
- Cardenas Calvachi, G. L., & Sanchez Ortiz, I. A. (2013). Nitrogeno en aguas residuales: origenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud publica. *Universidad y Salud* , 72-88.
- 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.
- del Rosario Núñez, L. M. (Junio de 2017). Evaluación de la eficiencia en remonición de nitrato en un humedal costruido a escala de laboratorio. La Plata.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. (N. Antequera Durán, Ed.)
- Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. (2010).
- Gallego García, L., & Lassovsky, L. A. (2013). *Humedal de tratamiento en flotación (HTF) con mayor cantidad de biofilm y mejor canalización hidráulica*. Sevilla, España.

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*.

Gersberg, R., Elkins, B., Lyon, S., & Goldman, C. (1986). Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands.

Huertas, R., Marcos, C., Iburguren, N., & Ordás, S. (2013). *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Confederación Hidrográfica del Duero (CHD).

Jacome Burgos, A. (2014). Experiencias con humedales de flujo subsuperficial en el saneamiento rural de Galicia. *Conama2014. Congreso nacional del medio ambiente*.

Kone, D. (2002). Edupration des eaux usées par lagunage à microphytes et à macrophytes en Afrique de l'ouest et du centre: etat des lieux, performances épuratoires et critères de dimensionnement.

Kone, D. (2002). Epuration des eaux usées par lagunage à microphytes et à macrophytes en Afrique de l'ouest et du centre: etat des lieux, performances épuratoires et critères de dimensionnement.

Lahora, A. (2001). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los galardos (Almería).

Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Ayuntamiento de Lorca; Universidad Politécnica de Madrid; Fundación global nature; Obra social.

Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. (2010). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

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.

Sipaúba-Tabares, L. H., & de Souza Braga, F. M. (2008). Constructed wetland in wastewater treatment. *Biological Sciences*.

Soler, C., Crespi, R., Soler, E., & Pugliese, M. (2018). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre superficial con macrófitas acuáticas flotantes. *Ingeniería del Agua*.

Stottmeister, U., Wiebner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., y otros. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment.

Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment.

