

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
MEDIANTE HUMEDALES CONSTRUIDOS
CON AIREACIÓN FORZADA.
APLICACIONES Y RENDIMIENTOS.**

**WASTEWATER TREATMENT USING
CONSTRUCTED WETLANDS WITH
FORCED AERATION. APPLICATIONS
AND PERFORMANCES.**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D^a Carla Romero Ferriol.

Dirigido por:

Dr./ D. Luis Felipe Fernández Fernández y Francisco Carreño Conde.

Alcalá de Henares, a 6 de junio de 2022.

Este Trabajo de Fin de Máster, se ha realizado bajo la supervisión de mis tutores Luis Felipe Fernández Fernández y Silvia Ruíz Martínez a quienes quiero agradecer su dedicación y ayuda.

A todas las personas que me han ayudado a llegar hasta aquí. A mis padres Antonio y Montse por haberme dado la oportunidad de estudiar. A mis amigos que me han acompañado durante este curso y a Ángel por su paciencia y apoyo incondicional. A mi familia donde no pueden faltar los nombres de Alejandra, Carmen, Pascual y Clari por estar conmigo día a día.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes básicos de un humedal. (a) capa impermeable, (b) sustrato, (c) especies macrófitas, (d) agua residual y (e) agua tratada (Fuente: Montenegro-Rosero et al., 2019).....	10
Figura 2. Tipos de humedales según las especies de macrófitas: (a) emergentes, (b) de hoja flotante, (c) sumergidas y (d) flotantes (Fuente: Montenegro-Rosero et al., 2019).	16
Figura 3. Tipos de humedales artificiales. (a) FHS, (b) FHSS y c) FV.....	16
Figura 4. Comparación de pros y contras: Tecnologías Intensivas y Extensivas (Fuente: Río et al., 2015; Salas, 2018b).....	17
Figura 5. Humedales de Flujo Horizontal Superficial (FHS) (Fuente: Ecolagunas, 2021).	18
Figura 6. Humedales de Flujo Vertical Saturado a la izquierda y no Saturado o intermitente a la derecha (Fuente: Ecolagunas, 2021).....	18
Figura 7. Humedales de Flujo Horizontal Subsuperficial (FHSS) (Fuente: Ecolagunas, 2021).	19
Figura 8. Humedales de Flujo Vertical Subsuperficial (FVSS) (Fuente: Salas, 2021).....	19
Figura 9. Humedales de Aireación Forzada (FBA™) (Fuente: Ecolagunas, 2021).	21
Figura 10. Profundidad y construcción de un Humedal de Aireación Forzada (Fuente: Salas, 2018b).....	21
Figura 11. Gráfico comparativo de la OTR en distintos tipos de humedales (FHS, FV y FBA™) (Fuente: Ecolagunas, 2021).	22
Figura 12. Gráfico comparativo del consumo energético en kWh/ m ³ de agua residual de las diferentes tecnologías de tratamiento (Fuente: Ecolagunas, 2021).....	22
Figura 13. Humedales Sistema Francés (Phragmifiltre™) (Fuente: Ecolagunas, 2021).....	25
Figura 14. Humedales de Aireación Forzada contruidos en funcionamiento (Fuente: Elaboración propia a partir del Proyecto H2O-OP en La fundación CENTA, Carrión de los Céspedes (Sevilla).....	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales contaminantes que se encuentran en el agua residual y principales Mecanismos de eliminación (Fuentes: Elaboración propia a partir de Lahora, 2003; Kadlec et al., 2008; Mena et al., 2009 y Martínez, 2014).	8
Tabla 2. Listado con ejemplos de humedales híbridos para el tratamiento de aguas residuales procedentes de distintos orígenes (Fuente: Martínez, 2014).	27
Tabla 3. Concentraciones máximas permitidas en los vertidos de aguas residuales urbanas para zonas Normales y el P y N para zonas Sensibles, según la Directiva 91/271/CEE (Fuente: Elaboración propia a partir de Directiva 91/271/CEE).....	35
Tabla 4. Tabla comparativa de los Rendimientos de eliminación (%) y Límites superiores (mg/l) y otros parámetros de algunas Tecnologías Extensivas significativas (Fuente: elaboración propia a partir de datos aportados por el Tutor académico).....	38
Tabla 5. Tabla comparativa de los Rendimientos de eliminación (%) y Límites superiores (mg/l) y otros parámetros de algunas Tecnologías Intensivas significativas (Fuente: elaboración propia a partir de datos aportados por el Tutor académico).....	38
Tabla 6. Matriz DAFO de Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades comparando distintos aspectos de Sistemas Convencionales intensivos y Sistemas Extensivos (Fuente: Elaboración propia a partir de: Nuevo, 2020; Sierra-Pech et al., 2014; Ortega et al., 2010; Ruiz, 2022).	I

ABREVIATURAS

- **DAFO:** Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades
- **DBO:** Demanda Biológica de Oxígeno
- **DQO₅:** Demanda Química de Oxígeno
- **EDAR:** Estación Depuradora de Aguas Residuales
- **FBA™:** Humedales de Aireación Forzada “Forced Bed Aeration”
- **FH:** Flujo Horizontal
- **FHS:** Flujo Horizontal Superficial
- **FHSS:** Flujo Horizontal Subsuperficial
- **FSS:** Humedales de Flujo Subsuperficial
- **FV:** Flujo Vertical
- **FVS:** Flujo Vertical Superficial
- **FVSS:** Flujo Vertical Subsuperficial
- **FWS/FS:** Humedal de Flujo Libre o superficial
- **h.e.:** Habitante Equivalente
- **L:** litro
- **MBBR:** Reactores de Lecho Móvil.
- **MBR:** Reactores Biológicos de Membranas.
- **MES:** Materia en Suspensión
- **mg:** miligramo
- **NTK:** Nitrógeno Total Kjeldahl
- **O₂:** oxígeno
- **OTR:** Tasa de Tránsito de Oxígeno
- **R.D.:** Real Decreto
- **S.S.:** Sólidos en Suspensión
- **SBR:** Reactor Biológico Secuencial.
- **SUDS:** Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

RESUMEN

Debido al crecimiento demográfico actual y al desarrollo de nuevos hábitos de vida, industriales y urbanos hay gran preocupación por la presión que se ejerce hacia los recursos hídricos, siendo los más significativos del planeta. En los últimos años, debido a esta situación, y a la gran importancia de la calidad de las aguas se ha dado el desarrollo de sistemas de tratamiento alternativos de depuración como los humedales artificiales que basan su tecnología en el tratamiento del agua residual de una forma más natural integrándose en el paisaje, con menores requerimientos energéticos y de personal en cuanto a operación y mantenimiento y por tanto siendo una mejor alternativa medioambiental, aunque requieran mayores superficies de terreno. Dentro de estos humedales, se han desarrollado sistemas híbridos de depuración intensiva como los Humedales de Aireación Forzada, que cuentan con menores demandas de terreno, y son muy eficaces en eliminación de materia orgánica, nutrientes y patógenos.

Este trabajo tiene como objetivo realizar una recopilación y análisis de los diferentes sistemas de humedales artificiales construidos y de sus posibles aplicaciones y rendimientos de forma genérica y concretamente de los Humedales con Aireación Forzada para la depuración de aguas residuales, haciendo hincapié en los vertidos agroganaderos (purines). También se hará un balance de las ventajas e inconvenientes y de la aplicabilidad de estos sistemas frente a los sistemas convencionales.

Tras el análisis de los diferentes humedales se ha comprobado que los tratamientos extensivos tienen mejores rendimientos que los intensivos para pequeñas aglomeraciones urbanas de menos de 2.000 habitantes equivalentes.

Como conclusión principal de este trabajo se destaca la necesaria la implementación de sistemas extensivos para el tratamiento de aguas residuales y la gestión y manejo de técnicas alternativas en nuestro país y alrededor del mundo que cuentan con numerosas ventajas frente a los sistemas intensivos.

Palabras Clave: Humedales artificiales, Depuración, Tratamiento de aguas residuales, Humedales de Aireación Forzada, Vertidos agroganaderos.

ABSTRACT

Due to the current demographic growth and the development of new industrial and urban living habits, there is great concern about the pressure exerted on water resources, which are the most significant on the planet. In recent years, due to this situation and the great importance of water quality, alternative treatment systems have been developed, such as artificial wetlands, whose technology is based on treating wastewater in a more natural way, integrating into the landscape, with lower energy and personnel requirements in terms of operation and maintenance, and therefore being a better environmental alternative, although they require larger areas of land. Within these wetlands, hybrid intensive treatment systems have been developed, such as forced aeration wetlands, which have lower land requirements and are very effective in the elimination of organic matter, nutrients and pathogens.

The aim of this work is to compile and analyse the different constructed artificial wetland systems and their possible applications and performance in a generic way and, specifically, forced aeration wetlands for wastewater treatment, with emphasis on agricultural livestock discharges (slurry). An assessment of the advantages and disadvantages and the applicability of these systems compared to conventional systems will also be made.

After the analysis of the different wetlands, it has been shown that extensive treatments have better performance than intensive treatments for small urban agglomerations of less than 2,000 equivalent inhabitants.

The main conclusion of this work is that it is necessary to implement extensive systems for wastewater treatment and the management and management of alternative techniques in our country and around the world that have numerous advantages over intensive systems.

Key Words: Artificial Wetlands, Wastewater Treatment, Forced Aeration Wetlands, Agricultural and livestock Discharges.

1 Introducción

En los últimos años, ante el incremento de las cifras de población, ha habido un aumento progresivo de la generación de aguas residuales y con ello una búsqueda para encontrar y aplicar nuevas alternativas de técnicas de tratamiento de depuración, al margen de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) convencionales (Arias et al., 2003; Montenegro-Rosero et al., 2019). En España, al ser miembro de la Unión Europea, hay que cumplir la normativa comunitaria de la Directiva 98/15/CE que establece los requerimientos mínimos para la recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales. Se contemplan dos destinos de las aguas residuales una vez sean tratadas, se puede reutilizar (RDL 1620/2007, de 7 de diciembre) o bien eliminar como vertido (RDL 509/1996 de 15 de marzo) (Martínez, 2014).

Los humedales artificiales se utilizan para mejorar la calidad de las aguas residuales que pueden proceder de fuentes puntuales o difusas de contaminación. Las aguas residuales pueden ser: urbanas, industriales, provenientes de explotaciones mineras, agrícolas, lixiviados de vertederos, lodos de depuración, agua de escorrentía y pluvial, provenientes de refinerías de petróleo, Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), hoteles, campings, viviendas aisladas, entre otras. La depuración mediante este sistema puede ser el único tratamiento de las aguas o puede ser una parte del proceso completo del tratamiento, en cualquier caso, la depuración de las aguas debe ser eficiente autónoma y económicamente viable, ya que se necesita un bajo coste de inversión para su desarrollo y bajo consumo de energía en su explotación y mantenimiento. Una de las aplicaciones más comunes de los humedales artificiales es el tratamiento de las aguas domésticas primarias o secundarias, aunque actualmente se están desarrollando nuevas aplicaciones a otros campos como el tratamiento de las altas cargas orgánicas que acaban en el agua residual proveniente de la agricultura y ganadería. Tanto es así que ante ese problema añadido han adquirido conocimientos para el diseño, rendimiento, operación y mantenimiento de los humedales artificiales haciendo que sean sistemas sólidos y eficaces convirtiéndose mundialmente en una alternativa a los sistemas convencionales de depuración, aunque deben construirse, operar y mantener de manera cuidadosa (Davis, 1995).

1.1 ¿Qué son los humedales artificiales?

Los humedales artificiales para el tratamiento del agua son sistemas complejos e integrados de agua, plantas, animales, microorganismos y el medio ambiente, por tanto, son “sistemas de tratamiento naturales y sostenibles”. La acción biológica de estos seres vivos integrados en las aguas residuales hace que se eliminen ciertos nutrientes, materia orgánica, metales pesados y o agentes patógenos. Esto tiene gran interés debido a su utilidad y los beneficios medioambientales con respecto a otras técnicas de tratamiento de aguas residuales. (Davis, 1995; Lahora, 2003; Mena et al., 2009).

Por tanto, los humedales artificiales son sistemas vivos que quedan retenidos en un terreno donde surgen procesos físicos, químicos y biológicos por la interacción del agua residual con el sustrato, ciertas especies de plantas, especies de microorganismos, y la atmósfera. En estos sistemas se dan procesos naturales como: la sedimentación de partículas suspendidas, filtración, precipitación química a través del contacto del agua con el sustrato, adsorción e intercambio iónico en las superficies de las plantas, absorción y transformación de contaminantes por microorganismos y plantas, degradación biológica, descomposición y transformación de contaminantes por microorganismos y plantas, la fotosíntesis, la depredación y extinción natural de patógenos entre otros. Los humedales construidos tienen una serie de ventajas y de inconvenientes principales. Entre las ventajas de estos sistemas destacan su rentabilidad debido a los bajos gastos de construcción, operación (personal y suministros) y mantenimiento, ya que por ejemplo este último lo requieren de forma periódica y no continua. Además, los humedales facilitan la reutilización y reciclaje del agua, proporcionan un hábitat a muchos organismos de los humedales, mejorando la vida silvestre y la estética de los espacios abiertos lo que los hace encajar en armonía en el paisaje. En la mayoría de los humedales hay un crecimiento de plantas vasculares adaptadas a condiciones saturada, la cual ralentiza el agua, creando microambientes dentro de la columna de agua lo que proporciona sitios de unión para la comunidad microbiana. La basura que se acumula a medida que las plantas mueren en el otoño crea material adicional y sitios de intercambio, y proporciona una fuente de carbono, nitrógeno y fósforo para alimentar los procesos microbianos (Davis, 1995; Mena et al., 2009).

Por otro lado, algunas limitaciones de los humedales son que estos sistemas requieren mayores superficies de terreno con respecto a los sistemas tradicionales y generalmente se dan caudales lentos y aguas poco profundas o saturadas permitiendo que los sedimentos se asienten a medida que el agua pasa a través del humedal, por lo que están recomendados para pequeñas aglomeraciones urbanas a pequeña escala. Al intentar “imitar a la naturaleza” los procesos ocurren de forma más lenta con una velocidad de degradación de la materia orgánica muy baja, por tanto, el rendimiento de los mismos es menor y no es constante a lo largo de las estaciones, ya que puede no cumplir los estándares de descarga requeridos en todo momento. Además, los componentes biológicos pueden reducir temporalmente su eficacia con un aumento repentino de los contaminantes ya que son sensibles a ciertos tóxicos como el amoníaco o los pesticidas, asimismo necesitan siempre estar húmedos requiriendo un aporte continuo de agua. El desarrollo de estos humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales es un desarrollo bastante reciente y todavía no se ha llegado a un acuerdo sobre el óptimo diseño de los sistemas de humedales ni información sobre su desempeño a largo plazo (Davis, 1995; Mena et al., 2009).

1.2 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es recopilar toda la información existente acerca de los tipos de humedales y las posibles aplicaciones y rendimientos de la tecnología de humedales artificiales de manera genérica y concretamente de Humedales con Aireación Forzada construidos para la depuración de aguas residuales, haciendo hincapié en los vertidos agroganaderos (purines).

Los objetivos específicos son:

- Evaluar la aplicabilidad de estos sistemas a futuro en el entorno en el que nos encontramos.
- Evaluar el rendimiento de eliminación de contaminantes y otros parámetros para ver las diferencias en sistemas extensivos e intensivos.
- Hacer un balance de las ventajas e inconvenientes y de su aplicabilidad en distintos niveles a través de una matriz DAFO en el que se analicen estos sistemas de humedales con respecto a los sistemas más convencionales.

2 Metodología

En la realización de este trabajo de revisión bibliográfica acerca de los tratamientos de aguas residuales mediante humedales, y centrado en los Humedales de Aireación Forzada se ha accedido a la información a partir de los recursos electrónicos disponibles en catálogos de biblioteca, bases de datos y buscadores académicos online y páginas web oficiales.

Para llevar a cabo la búsqueda bibliográfica del trabajo se han buscado bases de datos relevantes y fiables como “*e_Bu@h*” (Biblioteca Digital de la Universidad de Alcalá), “*Web of Science*” y el “*Scopus*”. Por otro lado, como buscador académico se ha “*Google Scholar*”.

Inicialmente se parte de los documentos como guías y manuales aportados por los tutores académicos de este trabajo y por documentos aportados por los profesores del Máster de Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos a lo largo del curso. Se realizó una primera revisión bibliográfica que pone en contexto los temas principales a tratar para establecer el tema del trabajo de forma global. En la primera búsqueda se buscaron los documentos con las siguientes palabras clave (1): “humedales, artificiales”, “humedales, depuración, artificiales”, “tratamiento, aguas, humedales, artificiales”, “tratamiento, aguas, residuales”, “tipos, humedales, artificiales”.

Se han utilizado numerosos artículos científicos, manuales, capítulos de libros, trabajos académicos, tesis doctorales, legislación española y europea, revistas y recursos digitales. Con el fin de garantizar que los datos estén actualizados las fuentes documentales a partir del año 2015 en adelante son las que se han priorizado, aunque para profundizar en algunos temas como la depuración mediante humedales o los residuos ganaderos algunos documentos anteriores a este año siendo posteriores a 2010.

A continuación, se realizan otras búsquedas bibliográficas más concretas que se centran en temas específicos como los sistemas de humedales construidos con aireación forzada y las aplicaciones y rendimientos de vertidos agroganaderos (purines). Para ello, se utilizaron términos más específicos de búsqueda como pueden ser (2): “artificial OR wetlands AND wastewater”, “wastewater, treatment”

AND “forced aeration wetlands”, “humedales, aireación, forzada”, “residuos, ganaderos”, “vertidos, purines”.

Otras formas de buscar han sido títulos de trabajos completos encontrados en el buscador académico, incluyendo estudios que se encuentran en la bibliografía de otros artículos. Una vez descrita la metodología de búsqueda y tras la selección y recopilación de fuentes bibliográficas tras las dos búsquedas, se procede a organizar la información para elaborar todos los puntos que se tratan en el trabajo.

Por último, se realizan dos tablas de elaboración propia centradas en: (1) las Aplicaciones y Rendimientos de varios contaminantes y otros parámetros de diferentes tratamientos de aguas residuales extensivos e intensivos. Se realiza un análisis utilizando datos aportados por el tutor académico y (2) un análisis DAFO final de elaboración propia mediante bibliografía donde se desarrollan las principales Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades de los tratamientos extensivos tales como los humedales frente a los tratamientos intensivos convencionales como una EDAR. La búsqueda realizada de bibliografía se realiza entre los años 1995 y 2022.

3 Diseño general de humedales construidos y principios de funcionamiento

Los humedales artificiales como sistemas construidos son bastante complejos, ya que integran varios componentes esenciales como son el sustrato donde se localizan, las especies vegetales de macrófitos que se utilizan, los animales y microorganismos que habitan y se desarrollan en la zona y el flujo de agua residual que entra, así como el agua de lluvia aportada. Por tanto, es un sistema donde se van a dar procesos químicos, físicos, biológicos y microbiológicos simultáneamente (Mena et al., 2009). Para la eliminación de los contaminantes y la depuración de las aguas residuales que ingresan en el sistema, se van a dar procesos de descontaminación como pueden ser la adsorción, transformación y retención de contaminantes, filtración, reacciones de reducción-oxidación, reacciones de degradación, descomposición por parte de los microorganismos, acumulación de residuos o la adsorción de nutrientes (Lahora, 2003; Montenegro-Rosero et al., 2019).

En un humedal artificial hay diferentes mecanismos de eliminación de contaminantes, dependiendo de los que se encuentren en las aguas residuales a tratar. Principalmente se tratan altos niveles de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos en Suspensión (SS), Nitrógeno, Fósforo, Metales pesados, Elementos traza y Patógenos (Mena et al., 2009). A continuación, se muestran los procesos que tienen lugar en un humedal para eliminar estos compuestos (Tabla 1):

Tabla 1. Principales contaminantes que se encuentran en el agua residual y principales mecanismos de eliminación (Fuentes: Elaboración propia a partir de Lahora, 2003; Kadlec et al., 2008; Mena et al., 2009; Azcoitia, 2012 y Martínez, 2014).

Contaminantes que se encuentran en el agua residual	Mecanismos de eliminación
Sólidos en Suspensión (SS)	Sedimentación discreta y floculación
	Filtración e interceptación
	Resuspensión
Materia orgánica (disuelta, coloidal, aceites y grasas DBO ₅ , DQO)	Procesos físicos en la separación de materia orgánica: absorción, adsorción y volatilización (soluble).
	Procesos bioquímicos y biológicos en la separación de la materia orgánica: Procesos de oxidación-reducción, hidrólisis, fotólisis. Degradación microbiana aerobia y anaerobia hasta productos gaseosos (con grandes procesos de colmatación en los humedales).
Nitrógeno (amoníaco, nitratos y nitritos)	Descomposición y mineralización del nitrógeno: amonificación, nitrificación y desnitrificación microbiana (Nitrógeno → Amonio).
	Asimilación y fijación por las plantas mediante adsorción.
	Volatilización del amoníaco.
Fósforo (fosfatos orgánicos y polifosfatos)	Adsorción a través del sustrato.
	Eliminación mediante grandes áreas (grava con hierro y aluminio) o tratamientos alternativos de eliminación de P.
	Asimilación por las plantas mediante Adsorción.
Metales pesados	Asimilación por las plantas mediante Adsorción.
	Intercambio iónico.
Patógenos (coliformes totales y fecales, protozoos, helmintos, hongos, bacterias y virus)	Sedimentación, Interceptación y Sorción.
	Filtración.
	Muerte natural.
	Irradiación ultravioleta.

En los humedales artificiales se distinguen distintos componentes básicos (Figura 1) para entender su funcionamiento: (a) una capa impermeable para

evitar infiltraciones del agua sin tratar en el sustrato y posterior contaminación del mismo (normalmente la impermeabilización se lleva a cabo de manera artificial), (b) el sustrato que necesitan las especies macrófitas y los microorganismos para su correcto desarrollo donde se van almacenar los contaminantes eliminados. Los más utilizados suelen ser de tierra, arena, grava o materia orgánica para dar soporte y materia inorgánica. El tamaño del sustrato va a afectar tanto al flujo como al caudal de agua que hay que tratar y al desarrollo de microorganismos en el mismo. Un material arcilloso-limoso tendrá mayor capacidad de absorción y filtración, elevada resistencia hidráulica y velocidad de flujo baja, así como mayor cantidad de biopelícula que podrán albergar los microorganismos (pero mayor probabilidad de que se produzca la obturación de los poros); por el contrario, si el sustrato es de mayor tamaño (gravas y arenas) se reduce la capacidad de absorción y filtración y aumentará la resistencia hidráulica y la velocidad. Otras funciones importantes que tiene el sustrato en los humedales son: el almacenamiento y precipitación química de contaminantes, actúa como barrera primaria de tamizado, actúa como soporte para las especies vegetales y superficie para el desarrollo de microorganismos, facilitan mecanismos de adsorción y también los procesos de intercambio iónico entre el agua a tratar y los minerales que conforman el sustrato, la acumulación de materia vegetal como fuente de carbono para el intercambio de energía o el papel que tiene afectando al movimiento debido a la permeabilidad del mismo (Davis, 1995; Mena et al., 2009; Martínez, 2014; Montenegro-Rosero et al., 2019).

(c) Las especies vegetales de macrófitas adaptadas a medios muy húmedos o acuáticos. (d) El agua residual que consiste en una mezcla de materia orgánica e inorgánica, que proviene del sistema de abastecimiento de aguas bien sean agrícolas, industriales, domésticas o comunitarias y en su mayor proporción se encuentran residuos de alimentos, heces, restos vegetales, jabón o grasas y aceites. Es importante tener en cuenta que el agua del humedal es fundamental ya que cualquier cambio en su composición o caudal puede tener cambios en la efectividad del tratamiento y en el mantenimiento estructural y funcional del humedal. El agua tratada (e) y, por último, (d) los microorganismos que incluyen principalmente bacterias, hongos y protozoos y que mayoritariamente se

encuentran formando una biopelícula alrededor del lecho (bien en el sustrato o en las raíces de las especies vegetales). Estos ayudan a depurar el agua residual utilizando nutrientes y carbono como fuente de energía o transformándolo en biomasa microbiana, que crecerá en función de las condiciones ambientales y de la disponibilidad de sustrato (Davis, 1995; Mena et al., 2009; Martínez, 2014; Montenegro-Rosero et al., 2019).

En el medio del humedal es donde se van a dar la mayoría de reacciones que tienen lugar en la depuración, y afectaran tanto factores abióticos como bióticos. Entre los factores abióticos destacan el estado de lecho, la disponibilidad de nutrientes o la salinidad que determinaran los seres vivos que sean capaces de desarrollarse en el humedal. Los factores bióticos alteraran la hidrología o las características fisicoquímicas del humedal, ambos factores (abióticos y bióticos) interactuaran activamente en el agua como una única unidad ecológica. Hay que recalcar que al tener tan poca profundidad va a ser muy importante la interacción del agua con la atmósfera, así como la densidad de la vegetación que puede afectar al agua modificando su movimiento o impidiendo la exposición al sol y al viento (Davis, 1995; Mena et al., 2009; Martínez, 2014; Montenegro-Rosero et al., 2019).

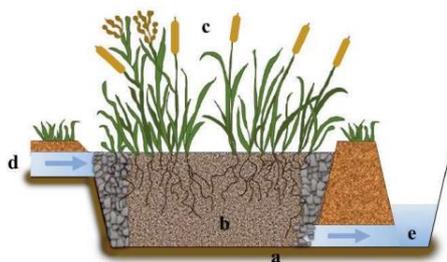


Figura 1. Componentes básicos de un humedal. (a) capa impermeable, (b) sustrato, (c) especies macrófitas, (d) agua residual y (e) agua tratada (Fuente: Montenegro-Rosero et al., 2019).

A pesar de su investigación en los últimos años, no se ha dado con un diseño de humedal óptimo para diversas aplicaciones. Dependiendo de las características específicas (tipo de lecho y plantas), del tipo de contaminación y de la clase de agua residual que se desea tratar será más conveniente usar un tipo u otro de humedal, ya que se obtendrán mejores rendimientos a la hora de depurar las aguas. Esto sucede siempre y cuando el humedal se adecue a estas necesidades en cuanto a su diseño y operación, así como las características

climáticas de la zona (ubicación geográfica, tiempo y variabilidad estacionaria diaria) (Davis, 1995; Arias et al., 2003).

En cualquier caso, se deberá imitar todo el funcionamiento de un humedal en la naturaleza haciendo que se trate de un humedal lo más natural y sencillo posible, ya que la complejidad de los sistemas suele fracasar y es beneficio el uso de energías naturales como el flujo por gravedad. Es conveniente que se den procesos naturales integrando el diseño con la naturaleza del paisaje y un buen control de la hidrología del sistema, adaptando un flujo lento y poco profundo con sustratos saturados que permitan una mayor permanencia de contacto entre el agua residual y el sustrato. A esto hay que darle tiempos de retención hidráulica suficientes para que llegue a alcanzar niveles óptimos de rendimiento, lo cual puede llevar varios años (Davis, 1995; Lahora, 2003; Montenegro-Rosero et al., 2019).

A la hora de diseñar un humedal, hay que tener en cuenta una serie de consideraciones para su construcción y planificación inicial donde se recoja información acerca de: la cantidad y calidad de las aguas residuales a tratar, la descarga de agua a cumplir, la localización, los habitantes equivalentes a los que se va a someter el tratamiento, el tipo y configuración del sistema, presupuesto económico entre otros. Este último incluye la superficie, control y transporte de agua o la vegetación aprovechando al máximo las características naturales del lugar e intentando minimizar la perturbación, orientando el diseño a un sistema funcional biológica e hidrológicamente (Davis, 1995).

La construcción implica una previa excavación (no muy profunda, entorno a los 6 cm) e impermeabilización (mediante revestimientos) del terreno, el diseño de flujo de entrada y de salida para garantizar una trayectoria, caudal y altura del agua adecuados. También hay que tener en cuenta aspectos como la elección del sustrato, el relleno que se va a colocar (en función de la composición y del tamaño), el establecimiento de la vegetación teniendo en cuenta la elección de especies (en función de la difusión, cobertura, densidad, profundidad radicular y ambiente), la siembra (enteras, rizomas o tubérculos) y la plantación (clima, época del año, separación). Todos estos pasos hay que adecuarlos dependiendo de las necesidades antes mencionadas (Martínez, 2014).

Hay que recordar que para la mayoría de los humedales es recomendable un tratamiento preliminar de las aguas residuales en la depuración. Este tratamiento reducirá los sólidos orgánicos en el agua residual para evitar atascamientos, mal olor o efectos negativos sobre las plantas. Lo principales son: fosa/tanque séptico, tanque Imhoff, lombifiltros, lagunas, reactor anaeróbico o tratamientos convencionales (Martínez, 2014).

Además, hay que tener en cuenta que en el tratamiento de depuración de las aguas, los humedales deben ser seguros protegiendo la salud pública y la salud ambiental, reduciendo los principales contaminantes que afectan a estos dos campos como son: (1) el nitrógeno que provoca el síndrome del bebé azul en niños y eutrofización de las aguas, (2) el fósforo que produce eutrofización en las aguas, (3) los patógenos que afectan al agua de abastecimiento y de los cultivos y se bioacumula en el suelo afectando a muchas especies , (4) los metales que afectan al abastecimiento y cultivos y hacen daño a largo plazo siendo tóxicos para muchas especies de plantas y animales y (5) los elementos traza que también están presentes en la cadena alimenticia a través de los cultivos y el agua de abastecimiento y se bioacumulan en el suelo (Martínez, 2014).

4 Papel de las plantas en la depuración

El papel de las plantas en la depuración con humedales es muy importante ya que ayudan a estabilizar el sustrato (dotando al lecho de estabilidad) y el flujo de agua, de manera que ralentizan su velocidad favoreciendo la sedimentación de los sólidos que queden suspendidos en el agua aumentando el tiempo de contacto entre el agua y la vegetación. Las plantas influyen en la conductividad hidráulica del terreno, son capaces de oxigenar el medio, absorben el carbono y nutrientes y forman parte de la reducción de los contaminantes del agua residual y de los elementos traza. Esto último lo realizan mediante la incorporación de los contaminantes a los tejidos de la planta. También minimizan el gradiente de temperatura lo que actúa protegiéndolas del frío en invierno. Además, las raíces son capaces de eliminar sustancias disueltas en el agua, así como actuar como superficie para la formación de biopelículas (Mena et al., 2009; Martínez, 2014; Montenegro-Rosero et al., 2019).

A depurar las aguas mediante plantas acuáticas se le denomina fitodepuración. Para llevarla a cabo, se emplean plantas macrófitas. Este término se refiere a plantas acuáticas visibles que incluyen plantas vasculares, musgos, algas y helechos (Martínez, 2014; Montenegro-Rosero et al., 2019).

Tienen una función de manera simultánea con la comunidad de microorganismos presentes (bacterias, hongos, protozoos, algas, levaduras) que transforman la materia orgánica e inorgánica del medio en sustancias menos contaminantes y perjudiciales o insolubles. Los microorganismos dentro de un humedal responsables de la descomposición de materia contaminante son principalmente bacterias, hongos y algas. Dentro de las bacterias destacan las unicelulares procariotas: (1) bacterias heterótrofas que utilizan carbono orgánico, (2) bacterias fotótrofas heterótrofas del azufre y autótrofas fotosintéticas y (3) bacterias quimiótrofas heterótrofas o autótrofas (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*) (Martínez, 2014; Montenegro-Rosero et al., 2019).

Por tanto, las plantas son capaces de modificar el medio mejorando la conductividad hidráulica, proporcionando nichos microbianos mediante el intercambio gaseoso y el soporte físico. Además, la masa de raíces de las especies vegetales va a filtrar y retener los sólidos suspendidos. En cuanto a los contaminantes, son capaces de inyectar O₂ en la raíz y que los microorganismos sean capaces de metabolizar los contaminantes del agua del humedal. Con respecto a los metales pesados, se absorben por las raíces donde quedan retenidos formando complejos con aminoácidos (Martínez, 2014; Montenegro-Rosero et al., 2019; Ecolagunas 2021).

Las plantas también tienen un papel muy importante en el ciclo de nutrientes del carbono y del nitrógeno. Están adaptadas a crecer en un sustrato inundado y conforman “fitosistemas” al utilizar la energía solar mediante la fotosíntesis para transformar la energía del sol en química y usarla en su metabolismo (Martínez, 2014; Montenegro-Rosero et al., 2019; Ecolagunas 2021).

Las plantas que más se utilizan en los humedales artificiales son en su mayoría plantas emergentes persistentes como los juncos, la caña común o las espadañas. Normalmente no todas las especies sirven para todo tipo de humedales, sino que dependiendo del uso de los humedales y de las aguas que

se tengan que tratar se usaran una u otra especie. Las plantas de tratamiento de aguas de humedales deben soportar la combinación de aguas residuales con concentraciones de contaminantes elevadas, inundaciones continuas o lluvias que hacen que el caudal de tratamiento sea muy variable. Por ejemplo, para el tratamiento de aguas residuales urbanas, la selección de especies es menos importante siempre y cuando haya una vegetación suficientemente densa. Sin embargo, en humedales de aguas pluviales se eligen comunidades de plantas emergentes similares a los humedales naturales cercanos a la zona. En ambos casos se recomienda el uso de especies nativas, adaptadas al clima de la zona y a su ecosistema (Davis, 1995). Algunos ejemplos de plantas macrófitas que se utilizan en los humedales construidos (asumiendo condiciones óptimas de germinación, pH y penetración de raíces) son *Thypha*, *Phragmites*, *Juncus*, *Scirpus* y *Carex*. Dentro del grupo de macrófitas emergentes destacan *Typha latifolia* (espadaña o enea), *Phragmites australis* (carrizo), *Glyceria maxima* (Gliceria acuática) y *Schoenoplectus lacustris* (junco de laguna). En el grupo de especies basadas en macrófitas de hojas flotantes destaca *Ipomoea acuatic*, en las macrófitas sumergidas es característica *Potamogeton perfoliatus* y por último dentro de las flotantes destaca *Eichornia Crassipes* (Ecolagunas, 2021).

Los humedales que tratan aguas residuales domésticas, agrícolas u otras aguas que tengan un alto contenido en materia orgánica, utilizan en gran medida juncos (aproximadamente el 40% de los sistemas FHSS operativos) ya que es una especie que tolera altos niveles de nutrientes y son capaces de establecerse en el medio con relativa facilidad sin ser invasivos. Las espadañas y la caña común se utilizan también con frecuencia, ya que son muy tolerantes a muchos tipos de aguas residuales, pero tienen desventajas, ya que las espadañas pueden ser dañadas por algunas especies de roedores como las ratas almizcleras, o a algunos insectos como las lombrices por lo que no siempre son la mejor opción en humedales de aguas residuales agrícolas. La caña común tiene como principal desventaja ser una especie muy agresiva en competencia con otras especies que habiten en la zona, tiene gran facilidad de asentamiento en los humedales naturales próximos debido a la gran cantidad de semillas que transporta por el viento (Davis, 1995; Martínez, 2014).

En humedales de tratamiento de aguas residuales agrícolas, hay que considerar la tolerancia de la vegetación a algunas sustancias como el amoníaco (presente en este tipo de aguas en gran cantidad). Esta aclimatación o tolerancia al amoníaco se produce más eficientemente cuando las plantas se aclimatan lentamente a este compuesto, ya que pueden variar la capacidad para tolerar el amoníaco. En el caso de los humedales pluviales, el objetivo principal es una mayor densidad y diversidad de especies, para que haya más probabilidades de resistencia ante especies invasoras, así como una rápida recuperación de perturbaciones o plagas atrayendo a su vez gran cantidad de vida silvestre y acuática (Davis, 1995).

5 Tecnologías de depuración de aguas. Tipos de humedales

La clasificación general de los humedales puede ser muy diversa, ya que se pueden clasificar en función de las características de la vegetación que se vaya a utilizar, en función de la dirección de flujo de agua que circula, o dependiendo de las Tecnologías que se utilicen para hacer funcionar ese humedal.

En cuanto a la primera clasificación (Figura 2), en los humedales artificiales construidos se utilizan plantas macrófitas, y hay una clasificación en función de las características de esta vegetación en (Arias et al., 2003; González, 2004; Martínez, 2014; Montenegro-Rosero, 2019):

- Humedales con macrófitas emergentes (a): Se encuentran enraizadas en un suelo inundado, crecen con profundidades superiores a 0,5 metros. Ejemplo: *Phragmites australis* o *Thypha latifolia*.
- Humedales basados en macrófitas de hoja flotantes o arraigadas flotantes (b): se enraizan en los sedimentos con unas hojas flotantes y ligeramente aéreas (nenúfar), el agua tiene una profundidad de entre 0,5-3 metros. Ejemplos: *Nymphaea alba*, *Nymphaea odorata* o *Potamogeton gramineus*.
- Humedales con macrófitas sumergidas (c): están completamente sumergidas, crecen con alto contenido en oxígeno. Ejemplos: *Potamogeton crispus* o *Ceratophyllum demersum*.

- Humedales basados en macrófitas flotantes (d): flotan por la superficie del agua, eliminan N (desnitrificación), P y sólidos en suspensión. Ejemplos: *Eichhornia crassipes*, *Lemna sp.*, o *Spirodela polyrhiza*.

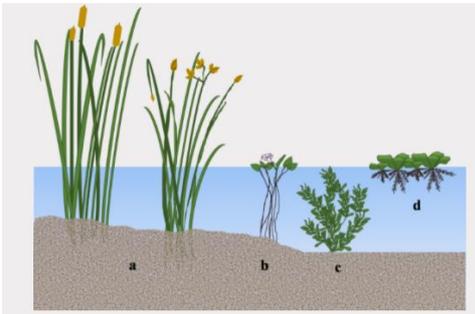


Figura 2. Tipos de humedales según las especies de macrófitas: (a) emergentes, (b) de hoja flotante, (c) sumergidas y (d) flotantes (Fuente: Montenegro-Rosero et al., 2019).

En cuanto a la segunda clasificación de los humedales (Figura 3), se distinguen en función de la dirección del flujo que circula de manera general: (a) Humedales de Flujo Horizontal Superficial (FHS), (b) Humedales de Flujo Horizontal Subsuperficial (FHSS), (c) Sistemas de Flujo Vertical (FV) y Sistemas Híbridos que incorporan humedales de flujo superficial y subterráneo. Los sistemas de humedales artificiales también se pueden combinar con tecnologías de tratamiento convencionales (Davis, 1995; Arias, 2003; González, 2004; Kadlec et al., 2008).

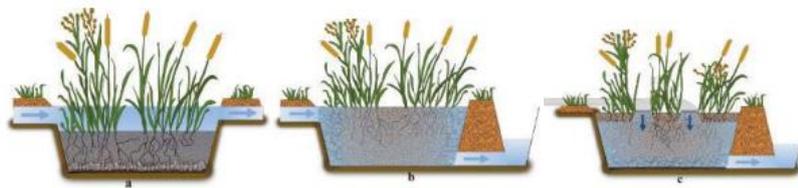


Figura 3. Tipos de humedales artificiales. (a) FHS, (b) FHSS y (c) FV.

Además de la clasificación anterior, para el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales, se pueden usar Tecnologías Extensivas o Tecnologías Intensivas (Figura 4) (Río et al., 2015).

- ✓ **Las Tecnologías Extensivas** son las más tradicionales en cuanto a humedales ya que son las que más se han implementado, utilizan muy poca energía en su funcionamiento (incluso nula), pero requieren mucha superficie para su implementación, del orden de más de 1 m²/habitante equivalente (h.e.). Por tanto, se dan en países que disponen de muchas hectáreas libres de superficie.

- ✓ **Las Tecnologías Intensivas** son las más innovadoras en cuanto a humedales, en las cuales se introduce una gran cantidad de energía al sistema, permitiendo airearlo de manera que la depuración de las aguas se produzca más rápidamente y con menos superficie de territorio, necesitando un espacio menor a $1 \text{ m}^2 / \text{h.e.}$. Estas últimas tienen la capacidad de responder ante alteraciones en las condiciones operativas como un aumento del caudal o de la contaminación de las aguas a tratar.

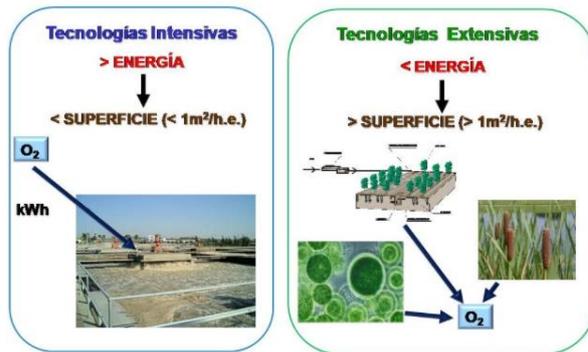


Figura 4. Comparación de pros y contras: Tecnologías Intensivas y Extensivas (Fuente: Río et al., 2015; Salas, 2018b).

Por tanto, recopilando todo lo anterior, un esquema más completo de los tipos de humedales sería el siguiente (Ecolagunas, 2021):

- Humedales Extensivos o Pasivos:
 - De flujo horizontal → Flujo horizontal superficial (FHS) o Flujo Horizontal Subsuperficial (FHSS).
 - De flujo vertical → Flujo Vertical Saturado (FV) o Flujo Vertical no saturado o intermitente.
- Humedales Intensivos:
 - Humedales de Aireación Forzada (Forced Bed Aeration™ o FBA™)
 - Sistema francés (Phragmifiltre™)

5.1 Humedales Extensivos o pasivos. Humedales de aireación natural

Los sistemas de tratamientos extensivos pueden ser de aplicación superficial y subsuperficial. En general, entre los sistemas extensivos se distinguen: (1) humedales artificiales, que pueden ser de flujo superficial (vertical y horizontal) y del flujo subsuperficial (vertical y horizontal), (2) el lagunaje, (3) los filtros verdes, (4) filtros intermitentes de arena (sin recirculación y con recirculación), (5) infiltración-percolación y (6) filtros de turba (Ortega et al., 2009; Ortega et al., 2010; Ortega et al., 2013; Río et al., 2015; Salas, 2021).

A continuación, se van a desarrollar más en profundidad los Humedales con Tecnología Extensiva más relevantes:

I. Humedales de Flujo Superficial (FS)

Aparentemente son muy parecidos a los humedales naturales, los Humedales de Flujo Superficial son balsas con vegetación arraigada al fondo del sustrato a un nivel no demasiado profundo ($< 0'4-0'5$ m), el agua entra a través de estas plantas exponiéndose a la atmósfera. Suelen tener varias hectáreas, ya que se emplean para el tratamiento procedente de tratamientos secundarios para reutilizar las aguas tratadas. Estos humedales son beneficiosos para crear zonas húmedas de restauración, potenciando la vida salvaje, así como la educación ambiental (Martínez, 2014; Salas, 2021; Kadlec et al., 2008; Mena et al., 2009).

a. Los Humedales de Flujo Horizontal Superficial (FHS)

En estos humedales el agua se vierte en superficie en un extremo y avanza al otro extremo del lecho de manera horizontal, evacuándose por una tubería como se ve en la imagen (Figura 5) (Arias et al., 2003; Arias et al., 2010; Ruiz et al., 2017).

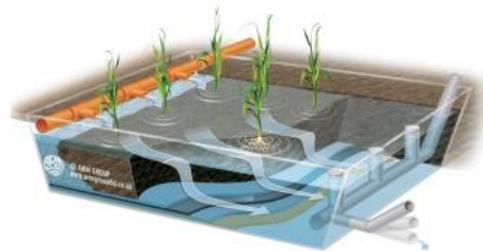


Figura 5. Humedales de Flujo Horizontal Superficial (FHS) (Fuente: Ecolagunas, 2021).

b. Los Humedales de Flujo Vertical Saturado (FVS) o no Saturado.

En los Humedales de Flujo Vertical (FV), el agua fluye de forma descendente, de arriba abajo percolando directamente en el humedal. El agua se distribuye por todo el sustrato del humedal, y entre las capas del material filtrante, la profundidad debe ser de 1m o superior. El agua se recoge en el fondo y sale por una tubería. En estos humedales el agua se puede introducir de manera continua o intermitente y son capaces de nitrificar el agua igual que un tratamiento secundario o terciario de una EDAR tradicional (Figura 6) (Arias et al., 2003).

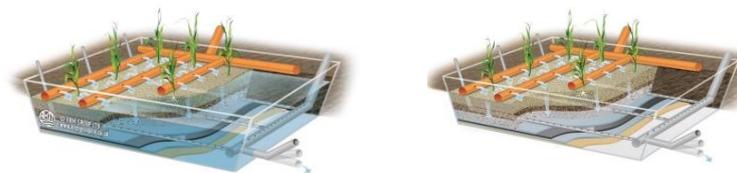


Figura 6. Humedales de Flujo Vertical Saturado a la izquierda y no Saturado o intermitente a la derecha (Fuente: Ecolagunas, 2021).

II. Humedales de Flujo Subsuperficial (SSF)

Estos humedales aparentemente no son semejantes a los humedales naturales, ya que el agua no se ve a simple vista como en los anteriores. Los Humedales de Flujo Subsuperficial constan de un sustrato (que puede ser de pequeñas piedras, grava, arena o tierra) que es esencial en el sistema de tratamiento. Hay que colocarlo de manera adecuada y seleccionar el sustrato correcto, normalmente gravilla de 6-12 mm con un espesor de 0,6m para garantizar su buen funcionamiento evitando la colmatación. Sobre este sustrato se plantan las especies macrófitas emergentes. (Martínez, 2014; Salas, 2021; Mena et al., 2009).

a. Los Humedales de Flujo Horizontal Subsuperficial (FHSS):

El agua entra en el sistema atravesándolo mediante un flujo horizontal, se infiltra a través del sustrato granular, el agua se recoge en el fondo y se evacúa mediante una tubería. La profundidad no es superior a 0,6 metros (Figura 7) (Arias et al., 2003; Martínez, 2014; Ruiz et al., 2017).

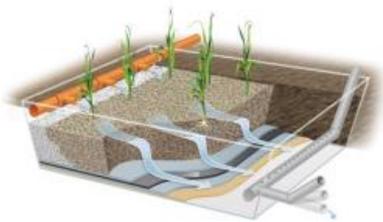


Figura 7. Humedales de Flujo Horizontal Subsuperficial (FHSS) (Fuente: Ecolagunas, 2021).

b. Los humedales de Flujo Vertical Subsuperficial (FVSS)

En este tipo de humedales el espesor del sustrato es de 1 m aproximadamente, el fondo del humedal está compuesto por varias capas, una capa de arena gruesa superficial de 10 cm, una de gravilla de 3-8 mm de 70 cm de espesor y una capa de grava de 25-40 mm de 20 cm de espesor. También se incluyen en el fondo tuberías de drenaje-ventilación. El agua entra por la parte de arriba y atraviesa el humedal mediante un flujo vertical y se recoge en las tuberías de drenaje (Figura 8) (Ruiz et al., 2017; Salas, 2021).

Figura 8. Humedales de Flujo Vertical Subsuperficial (FVSS) (Fuente: Salas, 2021).



5.2 Humedales Intensivos

Dentro de las Tecnologías Intensivas, destacan la Aireación Prolongada, los Filtros Percoladores, los Lechos Bacterianos y otras tecnologías como el MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor o Reactores de Lecho Móvil), SBR (Sequencing Batch Reactor o Reactor Biológico Secuencial), o el MBR (Membrane Bioreactor o Reactores Biológicos de Membranas) (Ecolagunas, 2021).

Los humedales extensivos descritos anteriormente se pueden combinar y hacer pequeñas modificaciones de manera que se obtienen sistemas híbridos que cuenten con las ventajas específicas de cada humedal de manera independiente. De manera que mediante la combinación de humedales de flujo subsuperficial horizontal y vertical se obtienen los sistemas híbridos más estudiados y extendidos. Esto ayudará a mejorar el rendimiento y la calidad de las aguas depuradas ya que serán capaces de mejorar la eliminación de ciertos compuestos debido a la presencia de ambientes tanto aeróbicos como anaeróbicos (Martínez, 2014). Este trabajo se va a centrar en el desarrollo en mayor profundidad de los humedales con Tecnología Intensivos, haciendo especial hincapié en los Humedales Artificiales Aireados (Aireación Forzada), dentro de todos los existentes.

5.2.1 Humedales de Aireación Forzada (Forced Bed Aeration™ o FBA™)

El desarrollo de los humedales construidos en Europa surgió por primera vez gracias a Käthe Seidel que experimentó con macrófitas acuáticas para mejorar la calidad de las aguas a principios de 1950. Esto lo fue ampliando en las décadas de 1950 y 1960 en aguas residuales de fenol, aguas residuales lácteas y aguas residuales ganaderas. Posteriormente, este sistema fue evolucionando hasta llegar a los lechos filtrantes de hoy en día tanto verticales como subsuperficiales, que fueron la base de los sistemas de humedales “híbridos”. El estudio de estos sistemas se reactivó a finales del siglo XX (Kadlec et al., 2008).

El sistema de Humedales de Aireación Forzada (FBA™) se desarrolla en Estados Unidos en los años 90, se implementó por primera vez en Europa en el año 2009 y desde entonces su uso se ha extendido en Europa y en el resto del mundo (Salas, 2018b).

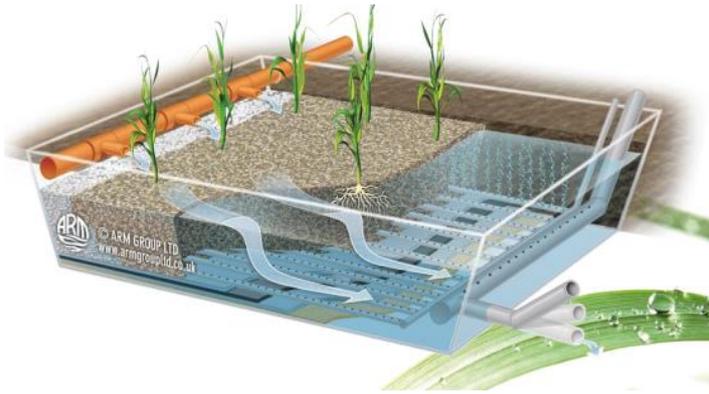


Figura 9. Humedales de Aireación Forzada (FBA™) (Fuente: Ecolagunas, 2021).

Los FBA™ (Figura 9), es un humedal de flujo horizontal subsuperficial, pero con una descarga propia de los humedales de flujo vertical sin las intermitencias de descarga características de los humedales de flujo vertical (la combinación del flujo vertical y horizontal sirve para optimizar la eliminación del nitrógeno). El agua se distribuye por toda la superficie donde hay unas tuberías que se colocan sobre soportes. El agua se deja caer sobre unas placas donde salpica haciendo que se distribuya y que descienda verticalmente por la placa base sobre el sustrato. Las tuberías de drenaje del humedal están en el fondo, y sacan el agua fuera (Salas, 2018b).

Los sustratos filtrantes que se usan en este tipo de humedales son muy similares a los de humedales tradicionales, cambia un poco el diámetro ya que es inferior, pero se utilizan gravas de canto rodado (silíceo y calcáreo). La profundidad en otros humedales suele ser de unos 0,6 metros, en este tipo de humedales es algo mayor, cerca del 1-1,5 metros. Esto se debe a que hay que tener en cuenta la implantación de aireadores de oxígeno en el fondo (Figura 10) (Salas, 2018b).



Figura 10. Profundidad y construcción de un Humedal de Aireación Forzada (Fuente: Salas, 2018b).

Son humedales donde se introduce un aporte externo de oxígeno inyectado en forma de burbujas de aire por la base del humedal. Esto va a conseguir aumentar la Tasa de Tránsito de Oxígeno (OTR) con respecto a otros humedales, ya que supera con creces los valores de OTR de otros sistemas como los de flujo horizontal o vertical como se puede ver en la Figura 11. Esto va a permitir un aumento en el desarrollo radicular, aportando todo el oxígeno necesario a los microorganismos del medio (ARI, 2015; Salas, 2018a; Ecolagunas, 2021).

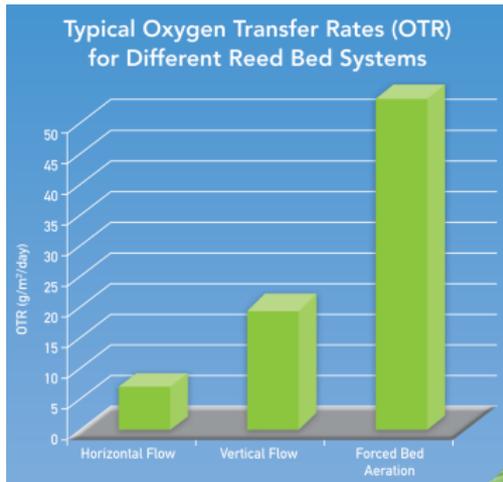


Figura 11. Gráfico comparativo de la OTR en distintos tipos de humedales (FHS, FV y FBA™) (Fuente: Ecolagunas, 2021).

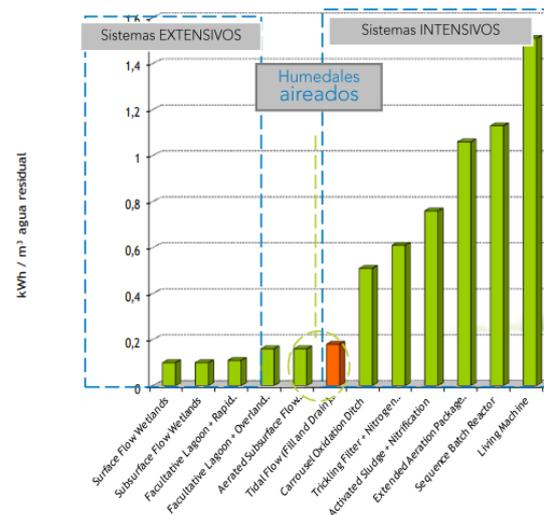


Figura 12. Gráfico comparativo del consumo energético en kWh/ m³ de agua residual de las diferentes tecnologías de tratamiento (Fuente: Ecolagunas, 2021).

Como se puede observar en el gráfico comparativo de los distintos tipos de humedales extensivos e intensivos (Figura 12), los sistemas extensivos consumen rangos de energía (potencia) inferiores a 0,2 kWh/ m³ de agua residual, mientras que los sistemas intensivos requieren mucha más energía (potencia) llegando a superar valores de 1,4 kWh/ m³ de agua residual. Sin embargo, se puede observar que los humedales aireados a pesar de ser sistemas intensivos, no tienen un consumo energético tan elevado, es superior a muchos sistemas extensivos, pero en menor medida (Ecolagunas, 2021).

En el caso de que hubiera una necesidad de eliminación de gran cantidad de nutrientes en el tratamiento del humedal, no se requeriría implementar ninguna otra instalación complementaria. En el caso del nitrógeno, se produce la nitrificación y la desnitrificación en el mismo humedal debido a la intermitencia de la entrada de oxígeno en el sustrato. En el caso del fósforo, es necesaria la adición de un floculante que permita la precipitación como lodo (Salas, 2018a).

La depuración de las aguas residuales con este tipo de tratamientos normalmente está recomendada para pequeñas aglomeraciones urbanas, que son “zonas conformadas por uno o varios municipios, o por parte de uno o varios de ellos, que por su población o actividad económica constituya un foco de generación de aguas residuales que justifique su recogida y conducción a una instalación de tratamiento o a un punto de vertido final”. Estas aglomeraciones urbanas están definidas por las Comunidades Autónomas y los Ayuntamientos afectados, tienen menos de 2.000 h.e. y se exige un tratamiento adecuado. En la actualidad se habla de aglomeraciones menores a 5.000 h.e. (RDL 11/1995, de 28 de diciembre; Salas, 2021).

En España, el tratamiento de las aguas residuales de las pequeñas aglomeraciones urbanas tiene gran relevancia debido a que cerca de 6.000 municipios de un total de 8.131 tienen una población menor a 2.000 habitantes. Esto significa que hay un gran número de pequeños municipios, con una alta dispersión demográfica. Hay más de 6.000 aglomeraciones, muchas de ellas menores a 500 h.e., y destaca que hay entre 3-4 Millones de h.e. sin depurar sus aguas. Por lo que se debería tomar conciencia de la depuración de pequeñas aglomeraciones con un enfoque más exigente tanto desde el punto de vista técnico como de la gestión (Ortega et al., 2009; Ortega et al., 2010; Ortega et al., 2013; Salas, 2021).

El límite poblacional para implantar esta tecnología de tratamiento no siempre depende exclusivamente de la capacidad de purificación de los contaminantes sino también de la disponibilidad de superficie y la capacidad económica para su amortización y rentabilidad a largo plazo. La planta más grande que cuenta con un sistema de tratamiento FBATM opera con una población de 16.000 h.e. (Salas, 2018a).

Entre las ventajas de este tipo de humedal destacan (Salas, 2018b: Ecolagunas, 2021):

- Menor superficie que un sistema extensivo como tal: se produce un ahorro significativo del espacio de hasta el 80%. Una población de 200 h.e. con un humedal tradicional requerirían de aproximadamente unos 550-700 m², mientras que un FBATM requiere de unos 125-150 m².

- Tratamiento de aguas residuales de forma más Eficiente (rápida, efectiva y adaptable): es un sistema donde se dan los procesos de nitrificación y de desnitrificación en un solo reactor, operan por gravedad, tratan los vertidos de alta demanda con mejores datos de rendimiento.
- Menor coste: de inversión en construcción, operación y mantenimiento, principalmente si se consideran los costes de amortización que tiene el sistema durante la vida útil de la planta. Para la implantación de las instalaciones, el coste con respecto a un humedal tradicional suele ser de un 10-50% menor (teniendo en cuenta el terreno necesario para la implantación). Por ejemplo, en una población de unos 500 h.e. el presupuesto es de unos 160.000-180.000€. El coste de operación y mantenimiento es reducido ya que no necesita personal especializado y los materiales de construcción son de adquisición local, en el ejemplo anterior rondaría los 0,14 €/m³.
- Tratar más contaminantes: soporta cargas más altas de contaminantes en el agua residual, tiene la capacidad de adaptarse a las fluctuaciones y variaciones del caudal y la calidad de cada vertido sin que se produzcan colmataciones. Esto se debe a la capacidad de ajuste de los sistemas de soplado lo que permite modular la intensidad de procesos de remoción.
- Facilita una actuación con respecto a las EDAR existentes (que tienen un funcionamiento insuficiente).
- Cumplimiento de requisitos de Certificación ambiental (como los estándares de cumplimiento de la UE) y responsabilidad social corporativa. Son una solución sostenible desde el punto de vista ecológico. Se integra fácilmente en el medio siendo estéticamente agradable, y evita los malos olores o la proliferación de insectos.
- Es un sistema muy versátil y se adapta a nuevas condiciones. Facilita la reutilización de agua para usos terciarios.

5.2.2 Humedales Sistema francés (Phragmifiltre™)

Es un modelo de humedales que se compone de un Flujo Subsuperficial Vertical. Este innovador sistema permite el tratamiento completo de las aguas residuales.

El agua residual va a un pozo de bombeo y se envía al humedal de forma discontinua, esto permite que el sustrato filtrante se airee.

Se compone de dos etapas, una primera etapa, compuesta por tres pequeños humedales en paralelo con una fase de alimentación de un único filtro y una fase de reposo. Esto hace que con respecto a la segunda etapa haya una alternancia en la alimentación y una mineralización de los lodos en superficie manteniendo la estabilidad del nivel bacteriano. El sistema en esta etapa tiene varias capas de gravas, y cuenta en el fondo con una red de drenaje que recoge el agua tratada, enviándola a la segunda etapa de tratamiento (Salas, 2018c).

La segunda etapa se compone de dos humedales en paralelo y cuenta con una fase de alimentación y una de reposo, alimentando también de forma alterna. Estos humedales cuentan con una capa de arena en su superficie que permite afinar el tratamiento (Figura 13) (Salas, 2018c).

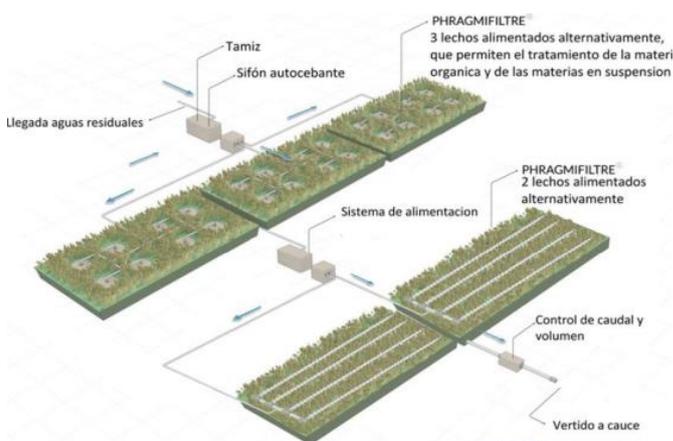


Figura 13. Humedales Sistema Francés (Phragmifiltre™) (Fuente: Ecolagunas, 2021).

Estos están ampliamente distribuidos en Francia donde cuentan con hasta 4.000 instalaciones, en concreto en núcleos rurales que van desde los 150 a los 6.000 h.e. La superficie total de tratamiento ronda los $3/4 \text{ m}^2 / \text{h.e.}$ aunque el límite siempre lo condiciona el espacio disponible y el terreno (Salas, 2018c; Salas, 2021).

Una de las ventajas de este sistema es que no necesitan un tratamiento primario, únicamente una reja de desbaste inicial lo que simplifica el mantenimiento de los mismos evitando la eliminación de lodos de manera periódica y reduciendo los costes. Este método integra gestión y tratamiento de lodos que se dan en la superficie y que facilitan su mineralización (Salas, 2018c).

Con esta técnica se da la nitrificación, pero no la desnitrificación al ser un medio aerobio, por tanto, se dan concentraciones de nitrógeno menores a 10 mg/l. Para reducir las concentraciones de nitrógeno y fósforo habría que implementar un sistema en una zona aerobia que complemente el tratamiento. Por tanto, el objetivo de depuración de este sistema en cuanto a rendimiento es de MES (Materia en Suspensión) < 15mg/l, DBO₅ < 15 mg/l, DQO < 70 mg/l y NTK (Nitrógeno Total Kjeldahl: suma de nitrógeno orgánico en sus diversas formas) < 10 mg/l. Al igual que el anterior sistema, cuenta con alta tolerancia a las cargas orgánicas, funcionan con menos energía si hay un desnivel en el terreno y se integran bien en el paisaje. Los humedales que cuentan con un sistema de flujo vertical como este caso permiten acumular los lodos en superficie, evitando la colmatación de los mismos a lo largo del tiempo y la acumulación de materia en suspensión, facilitando así su extracción. La extracción de lodos se lleva a cabo aproximadamente cada 15 años (Salas, 2018c).

6 Resultados / Discusión

6.1 Aplicaciones de la tecnología de Humedales de Aireación Forzada para la depuración de aguas. Casos de éxito.

En la actualidad, el tratamiento de aguas residuales no es exclusivamente de aguas domésticas (que son las más habituales). Entre las ventajas que tienen los sistemas intensivos de aireación forzada está la posibilidad de tratar aguas residuales con carácter más exigente, con cargas contaminantes más altas y provenientes de fuentes de contaminación muy variadas. Hay instalaciones de tratamiento para numerosos fines y aplicaciones. A continuación, se va a proceder a describir las aplicaciones de estas tecnologías más significativas, así como una posterior revisión de los casos prácticos de éxito de tratamiento alrededor del mundo (Salas, 2018a).

- Aguas residuales urbanas.
- Aguas residuales industriales: de procesado de frutas, lecherías, destilerías, bodegas, etc.
- Aguas residuales procedentes de hoteles, campings o viviendas aisladas.
- Aguas procedentes de explotaciones mineras: lavado de minerales.
- Aguas procedentes de lixiviados de vertederos.

- Aguas procedentes de lodos de depuración.
- Aguas procedentes de SUDS.
- Aguas procedentes de vertidos agroganaderos (purines).

En España, con respecto al agua reutilizada como destino, se corresponde con un 75% del agua regenerada proveniente del uso agrícola, un 12% del uso recreativo, un 6% del uso urbano, un 4% del uso ambiental y un 3% del uso industrial (Martínez, 2014).

Los casos prácticos de éxito en depuración de aguas residuales aplicadas a las fuentes de contaminación anteriores son (Salas, 2018a):

- Aeropuerto de Heathrow (Londres): EDAR que trata aguas de escorrentía contaminada con glicoles que riegan mecánica de aviones. El vertido tiene 20.000 mg/l de DQO a 1°C, se trata un caudal de 3.500 m³/ día.
- Aeropuerto de Buffalo (EEUU): humedal aireado que trata aguas de escorrentía contaminada con glicoles.
- Humedales en España: hay quince instalaciones de humedales aireados, ocho funcionan con éxito: núcleos rurales, polígono industrial, quesería, matadero, hostales, etc.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de humedales híbridos (Tabla 2) con sistemas similares a los humedales FBATM, ya que combinan el flujo horizontal y el flujo vertical, que tratan aguas residuales provenientes de distintas fuentes bien sean procedentes de lixiviados de vertederos, queserías, granjas porcinas, hospitales, acuicultura, industriales, bodegas, etc.

Tabla 2. Listado con ejemplos de humedales híbridos para el tratamiento de aguas residuales procedentes de distintos orígenes (Fuente: Martínez, 2014).

Humedal	País	Tipo de aguas residual	
VF-HF	Reino Unido	Residuales	*VF-HF (Humedal de flujo Vertical que descarga sobre uno de flujo Horizontal); HF-VF (Humedal de flujo Horizontal que descarga sobre uno de flujo Vertical); FWS-HF(Humedal de flujo libre que descarga sobre un humedal de flujo horizontal); HF-FWS (Humedal de flujo Horizontal que descarga sobre un Humedal de flujo libre); HF-VF-HF (Humedal de flujo horizontal que descarga sobre uno de flujo vertical y otro de flujo horizontal); VF-HF-FWS-P (Humedal de flujo Vertical sobre humedal de flujo horizontal y sobre un humedal de flujo libre que descarga sobre una balsa o estanque que se sitúa al final de los sistemas) (Martínez, 2014).
VF-HF	EE.UU.	Residuales	
VF-HF	Eslovenia	Lixiviados de vertedero	
VF-HF	Francia	Queserías	
VF-HF	Tailandia	Granjas porcinas	
HF-VF	Dinamarca	Residuales	
HF-VF	Polonia	Residuales	
HF-VF	Nepal	Hospital	
HF-VF	México	Residuales	
FWS-HF	Taiwán	Acuicultura	
FWS-HF	China	Industrial	
HF-FWS	Canadá	Lixiviados de vertedero	
HF-FWS	Italia	Bodegas	
HF-FWS	Noruega	Lixiviados de vertedero	
HF-FWS	Kenia	Residuales	
HF-VF-HF	Polonia	Residuales	
VF-HF-FWS-P	Italia	Bodegas	
VF-HF-FWS-P	Estonia	Residuales	

Actualmente, hay proyectos como el proyecto H2O-OP que han implantado varios humedales de depuración mediante Aireación Forzada (FBA™) y que están mejorándolos (Figura 14). Estos humedales se encuentran en funcionamiento por toda España (Galicia, Albacete, Salamanca, Sevilla, etc.). El objetivo principal del fundado en el Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA) en Sevilla, es diseñar, definir y evaluar la integración de arcillas expansivas para eliminar fósforo en un humedal de este tipo. Los proyectos están financiados por empresas como ECOLAGUNAS o Filtralite (Salas, 2021; Ecolagunas, 2021).



Figura 14. Humedales de Aireación Forzada contruidos en funcionamiento (Fuente: Elaboración propia a partir del Proyecto H2O-OP en La fundación CENTA, Carrión de los Céspedes (Sevilla).

6.2 Vertidos agroganaderos (purines)

Precedentemente se ha llevado a cabo una revisión general de las diferentes aplicaciones de tratamiento de aguas residuales, que presentan características únicas que pueden influir en el diseño de los humedales. A continuación, se va a indagar específicamente en las aguas residuales procedentes de vertidos agroganaderos, ya que los humedales y entre ellos los de aireación forzada son compatibles con las explotaciones agrícolas y ganaderas típicas (Kadlec et al., 2008).

En las últimas décadas el sistema de producción ganadera ha cambiado considerablemente en los países desarrollados donde se produce de forma intensiva y extensiva (mayoritariamente en España). Esto ha hecho que la producción de residuos ganaderos cambie con un aumento en la cantidad y la concentración de los mismos y que con ello cambie la capacidad que tiene la

tierra para absorberlos de manera natural, ya que se pueden utilizar para el abono de las tierras. Por todo esto, es interesante realizar una planificación de la gestión de los residuos de vertidos agroganaderos acorde con las necesidades actuales de sostenibilidad e importancia ambiental de los mismos. Así mismo se ha intensificado la producción ganadera mediante condiciones artificiales en las que se pretende obtener el máximo beneficio en el menor tiempo posible donde se concentra gran cantidad de ganado en espacios reducidos y donde diariamente se acumulan grandes cantidades de vertidos agroganaderos y purines (Agencia Extremeña de la Energía, 2013). Una alternativa de tratamiento de estos vertidos son los humedales artificiales.

6.2.1 Definición y características de las aguas procedentes de vertidos agroganaderos

Las aguas residuales de vertidos agroganaderos son el resultado de la cría de ganado, dentro de estos residuos destacan: (1) Estiércoles y purines, (2) Residuos Zoonosanitarios y (3) Subproductos de origen animal no destinados al consumo. Nos vamos a centrar en los Estiércoles y Purines que se tratan en humedales construidos (Agencia Extremeña de la Energía, 2013).

El tratamiento de aguas residuales procedentes vertidos agroganaderos de animales consiste en tratar agua de descarga y lluvia mezclada con estiércoles y purines (procedente de aves de corral, cerdos, etc.). Los estiércoles se forman a partir de las deyecciones sólidas y líquidas, aunque a veces también se compone de material de cama para el ganado como paja y restos de pienso (Rufete, 2015). Los purines son el líquido procedente de las orinas del ganado en estabulación con los líquidos procedentes del estercolero (líquido que escurre del estiércol) y, por tanto, el agua residual en sí son estos últimos (Kadlec et al., 2008; Arias et al., 2010; Agencia Extremeña de la Energía, 2013).

Hay una media diaria de deyecciones sólidas y líquidas correspondientes al 7% de peso vivo del animal (bovinos, vacas, ovinos, cerdos, pollos, gallinas, pavos, caballos, etc.) (Agencia Extremeña de la Energía, 2013). Esto se suele diluir con una cantidad de agua superior al estiércol, en cerdos las cantidades de purines son de unos 60-95 litros/día por animal adulto y en vacas de unos 160-200 litros/día por animal (Kadlec et al., 2008). Los animales domésticos en general

generan el 85% de toda la materia fecal del mundo, una cantidad superior a la que generan los seres humanos (ICL N° 210, 2019).

Normalmente los desechos y lodos tienen concentraciones muy elevadas de nutrientes lo que en muchos casos es un buen fertilizante para el suelo y fomenta la producción de cultivos, pero en muchos casos no es fácil contener todos los desechos de animales ya que actualmente el volumen de residuos orgánicos generados debido a la ganadería intensiva es muy elevado y hay que tratarlos (Arias et al., 2010; Rufete, 2015).

Se utilizan gran variedad de métodos para el tratamiento de estas aguas residuales ya que se requiere de estrategias innovadoras hacia una gestión sostenible de purines. Estas técnicas incluyen lagunas, estanques, estructuras de almacenamiento, áreas de compostaje o filtros y depósitos de sedimentos, aunque también mediante humedales. Los humedales construidos son una opción de tratamiento previa a su reciclado como agua de descarga o se descarguen a los ríos. Hay que evitar que los purines descarguen en las aguas receptoras y aguas subterráneas, ya que promueven el crecimiento de algas y el agote de oxígeno promoviendo procesos como la eutrofización y la contaminación del 25% de los acuíferos españoles (Kadlec et al., 2008; Arias et al., 2010; Smasa, 2015).

Dentro de la Base de Datos de Aguas Residuales Ganaderas (1998) se incluyen un total de 68 lugares en Norteamérica en los que se implantan 135 sistemas de Humedales para el tratamiento de este tipo de vertidos residuales (Kadlec et al., 2008).

A rasgos generales estas aguas se caracterizan por tener una mayor fuerza que las aguas residuales urbanas municipales, ya que cuentan con niveles de DBO, Sólidos Suspendidos Totales y Amoníaco superiores a los 100 mg/L y gases de efecto invernadero como CO₂ o metano con fuertes olores que afectan de forma negativa a la calidad de vida de la zona (Smasa, 2015). El tratamiento en humedales tolera concentraciones relativamente altas de nutrientes, pero no el vertido de desechos puros a los mismos (Kadlec et al., 2008).

En 1990 se comenzó a popularizar el uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales provenientes de desechos de animales. El sistema más antiguo encontrado en América del Norte fue en 1930 (Kadlec et al., 2008).

A continuación, se realiza una recopilación de las principales características físicas, químicas y biológicas de este tipo de aguas, aunque varían dependiendo de su composición determinada por el tipo de animal (raza, especie, edad), su alimentación, tipo de producción, etc. De manera general (Arias et al., 2010; Rufete, 2015; ICL N° 210, 2019):

- Características físicas de las aguas procedentes de vertidos agroganaderos: color, olor desagradable e intenso. La orina se estima en 45% y las heces en 55% aproximadamente. El contenido de materia húmeda es del 88% frente a un 12% de materia seca. El pH es de 6-8.
- Características químicas de las aguas procedentes de vertidos agroganaderos:
 - Componentes orgánicos: materia seca, macronutrientes, micronutrientes, fármacos veterinarios, residuos de drogas, hormonas, **nitrógeno total (N)**, amoníaco, **fósforo (P)**, **DBO₅** (se ha estimado una producción de 0,25 kg por cada 100 kg de peso vivo del animal), **DQO** (se ha estimado una producción de 0,75 kg por cada 100 kg de peso vivo del animal), **potasio (K)**, magnesio.
 - Componentes inorgánicos: **metales pesados** (zinc, cobre), aditivos para los forrajes, sales solubles.
 - Componentes gaseosos: metano, óxido nitroso y dióxido de carbono, amoníaco.
- Características biológicas de las aguas procedentes de vertidos agroganaderos: incluyen patógenos como bacterias y virus que pueden originarse en el ganado como, por ejemplo: *Giardia*, *Cryptosporidium*, *Campylobacter*, *Salmonella* (que puede sobrevivir largos periodos sobre el estiércol) *Yersinia enterocolitica* y *Escherichia coli* O157, cianobacterias, fitoplancton, bacterioplancton.

Debido a estas características en este tipo de aguas, y a la intensificación de la producción ganadera en los últimos años hay que realizar una correcta gestión y tratamiento de las aguas residuales agroganaderas, ya que un vertido de purines sin un tratamiento adecuado puede ser perjudicial para el medio ambiente. Se puede filtrar en acuíferos y producirse la contaminación difusa del agua subterránea por nitratos, eutrofización de aguas superficiales como manantiales o redes de abastecimiento de agua potable, acidificación del agua por amoníaco, emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero (metano, óxido nitroso y dióxido de carbono), dispersión de metales pesados y pesticidas o la degradación física química y biológica del suelo y su contaminación, problemas sanitarios (patógenos), contaminación de la cadena trófica (metales pesados, xenobióticos, etc.) (Kadlec et al., 2008; Martínez, 2014; Rufete, 2015).

6.2.2 Principales contaminantes, parámetros a controlar y necesidad de depuración

Los humedales construidos son sistemas complejos capaces de separar y transformar contaminantes cuando el agua atraviesa el sistema. Los mecanismos que predominan en el humedal dependen del agua que entra al sistema (en este caso los vertidos agroganaderos) de las interacciones internas y características del humedal (Martínez, 2014; Schierano et al., 2020).

Contaminantes a eliminar en el proceso de depuración de vertidos de purines por Humedales Artificiales de Aireación Forzada (Rufete, 2015; Schierano et al., 2020):

- **Sólidos en suspensión:** como materias fecales, desechos alimenticios o paja.
- **Oxígeno:** DBO₅ y DQO.
- **Nitrógeno:** su proceso de mineralización es muy lento y la mayoría se encuentra en forma de amoníaco. Este amoníaco puede acumularse en el suelo y contaminar las aguas por lixiviación de nitratos, y también es capaz de volatilizarse a la atmósfera.
- **Fósforo:** se hidroliza rápidamente así que se encuentra en gran medida en el estiércol de animales en dosis altas.
- **Potasio y Magnesio:** procedente de la orina de los animales.

- **Sales solubles:** se excretan por la orina, alta salinidad al agua que causa salinización.
- **Metales pesados:** Zinc y cobre son altos debido a la adición de compuestos con estos componentes como reguladores del crecimiento y fungicidas.
- **Agentes patógenos:** virus, bacterias, protozoos y hongos.

Por todo esto existe una necesidad de depuración de las aguas provenientes de los vertidos agroindustriales. De no ser depuradas se producen efectos negativos en el medio sobre el suelo, en el agua superficial y subterránea y en la atmósfera por dosis elevadas de algunos compuestos de las aguas residuales agroindustriales como los mencionados anteriormente (Andrés, 2022).

Los efectos negativos sobre el suelo son: (1) salinización por exceso de minerales, (2) acidificación progresiva por el amoníaco, (3) asfixia de la fauna por el aporte excesivo de materia orgánica al suelo produciendo un déficit de oxígeno en el suelo, (4) riesgos sobre la salud (brucelosis o salmonelosis), (5) efectos debido al exceso de nitrógeno sobre la flora como el retraso en la maduración de los frutos, micosis en raíces o la lixiviación, (6) efectos debidos al exceso de fósforo, en forma orgánica, inorgánica que genera problemas cuando hay agua, (7) metales pesados (principalmente Zinc y Cobre) los cuales su acumulación en el suelo genera un efecto tóxico, bioacumulación en la cadena alimentaria. En el Zinc por ejemplo hay gran riesgo de toxicidad, inhibe la amonificación (formación de amonio), afecta a los microorganismos del suelo retrasando la humificación de la materia orgánica, produce clorosis, necrosis y alteración del sistema radicular. En cuanto al cobre se puede producir fitotoxicidad en las plantas y puede afectar a las cianobacterias que son fijadoras del nitrógeno atmosférico (Andrés, 2022).

Los efectos negativos sobre las aguas superficiales y subterráneas son: debidos a un exceso de materia orgánica en el agua como (1) baja calidad de las aguas, (2) alteraciones de los organismos acuáticos, (3) destrucción del hábitat, (4) producción de sustancias tóxicas, (5) problemas digestivos en aguas para consumo, o (6) condiciones anóxicas del agua. (7) Las producidas por un exceso de nitratos como enfermedades en humanos como la metahemoglobinemia o cianosis por exceso de nitratos en el agua (es especialmente grave en niños),

(8) diarreas, (9) efectos cancerígenos, y (10) toxicidad en peces. Por exceso de fosfatos debidos a su poca solubilidad y al arrastre por suspensión cuando hay lluvias intensas producen (11) la eutrofización (crecimiento excesivo de algas y plantas), o la (12) descomposición de la roca madre que produce mal sabor en el agua. La presencia de amoniaco y metales en el agua producen (13) formación de nitratos y (14) coloración y problemas digestivos en el agua de consumo (Andrés, 2022).

Los efectos negativos sobre la atmósfera son: (1) la producción de metano que tiene un tiempo de residencia muy alto en la atmósfera, (2) la producción de dióxido de carbono, (3) las emisiones de amoniaco que producen acidificación, lluvia ácida, volatilización por degradación bacteriana de la urea. (4) Las emisiones de óxido nitroso que contribuye al efecto invernadero, (5) la producción de malos olores y (6) la formación de nubes de polvo en días secos y su posterior deposición en aguas superficiales, así como las enfermedades respiratorias que conllevan (Andrés, 2022).

6.2.3 Rendimientos de la tecnología de humedales para la depuración de aguas en vertidos agroganaderos y otros parámetros

A continuación, se va a realizar un análisis comparativo indicando los rendimientos para la depuración de vertidos agroganaderos de diferentes tecnologías extensivas de humedales con tecnologías intensivas. Cabe destacar que las tecnologías intensivas se refieren a las más comunes y a las que se utilizan más habitualmente. En este caso son los más extendidos actualmente en España.

Para realizar el análisis, se van a tener en cuenta los parámetros propios de las aguas de vertidos agroganaderos (Sólidos en suspensión-**S.S.**, Oxígeno-**DBO₅**-**DQO**, Nitrógeno total- **N_t**, Fósforo total- **P_t**), y las concentraciones máximas de los parámetros permitidas en vertidos de aguas residuales aplicadas al cumplimiento de la Directiva 91/271/CEE (que siguen todas las aguas residuales) (Tabla 3). Es necesario el cumplimiento de los valores máximos permitidos en esta normativa tanto para Zonas Normales (zn) como para Zonas Sensibles (zs) dependiendo de cuál sea el medio receptor. Ya que en este último caso se necesitará un tratamiento más riguroso de las aguas debido al vertido

de aguas con alto contenido en nitratos como las que provienen de vertidos agroganaderos y que se vierten en lagos u otros medios de agua dulce que puedan llegar a ser eutróficos (Directiva 91/271/CEE; Letón, 2022).

Tabla 3. Concentraciones máximas permitidas en los vertidos de aguas residuales urbanas para zonas Normales y el P y N para zonas Sensibles, según la Directiva 91/271/CEE (Fuente: Elaboración propia a partir de Directiva 91/271/CEE).

CONCENTRACIONES MÁXIMAS PERMITIDAS		
Parámetro	Concentración (mg/l)	% Mínimo de reducción
S.S. totales	35 mg/l	70/90%
DBO₅ (mg/l)	25 mg/l O ₂	75%
DQO (mg/l)	125 mg/l O ₂	90%
N_{total} (mg N/l)	10 (zs) 15 (zn)* mg/l	80%
P_{total} (mg P/l)	1(zs) o 2 (zn)* mg/l	70-80%

*En el caso del N y el P, el valor de concentración máxima es distinto para zonas normales (zn) y zonas sensibles (zs) según el cuadro 2 del Anexo I de la Directiva 91/271/CEE.

Para ver las diferencias entre las tecnologías extensivas e intensivas se dispone de los datos de cada uno de los parámetros descritos y se indica el límite superior de ese parámetro en las aguas depuradas, el rendimiento de eliminación de cada tecnología por separado. Los parámetros que se han tenido en este estudio son los Sólidos en Suspensión, la DBO₅, la DQO, la superficie requerida, el consumo eléctrico, el coste de implantación, el coste de operación y la generación de lodos. Los datos han sido proporcionados por el tutor académico y pertenecen a un estudio sobre un caso teórico planteado por el CENTA, para diferentes tecnologías extensivas e intensivas. Hay que tener en cuenta en todas ellas hay una entrada de caudal de 115 m³, y una población de 850 habitantes equivalentes. En todas las tecnologías tanto extensivas como intensivas de este estudio se tendrá en cuenta, siempre que sea necesario, una eliminación de Nitrógeno y Fósforo. La eliminación de Nitrógeno, se realizará mediante un sistema BiHofiltre con una zona anaerobia en el fondo del filtro donde el rendimiento de eliminación es del 35% en el caso de las tecnologías intensivas y del 60-90% en el caso de las extensivas. En cuanto a la eliminación de fósforo se hace mediante un filtro de piedra apatita donde se da adsorción y precipitación

del fósforo con un rendimiento del 35% en sistemas intensivos y del 20-50% en sistemas extensivos.

Las comparaciones entre diferentes sistemas y tecnologías son complicadas, ya que hay que realizarlas en casos completos y no se pueden mezclar datos de varios estudios para su análisis. Se tienen que dar las mismas condiciones de vertido (caudales y habitantes equivalentes) así como tener en cuenta que los rendimientos dependen de factores externos como la calidad del vertido (no solo los contenidos de los diferentes contaminantes, sino la relación entre ellos) y la temperatura tanto del agua como del aire, siendo esta última uno de los factores que más afectan al rendimiento de los humedales, ya que están directamente expuestos a los cambios ambientales bajo los que operan (Ortega et al., 2010). También depende de otros factores internos como el tiempo de retención, el tipo de plantas, y sustrato o la profundidad del humedal. Por todo esto, los rendimientos deben compararse cuando nos encontramos con casos en los que todas estas condiciones se den al mismo tiempo.

Se van a comparar los humedales tecnologías extensivas (1. Humedales de Flujo Superficial + INHOFF, 2. Macrófitas en flotación, 3. Humedales del sistema francés y 4. Ecolagunas) con los humedales de tecnologías intensivas (5. Planta de Aireación Prolongada, 6. Pozo de bombeo con tamiz, desarenador, desengrasador, tratamiento biológico y canal, 7. Vermifiltro y 8. Biodiscos).

1. Humedales de Flujo Superficial + IMHOFF: Humedal Horizontal de aireación natural antes descrito y Tanque IMHOFF que es un tanque desarrollado como tecnología de tratamiento de aguas residuales, es un tratamiento primario y se compone de sedimentación y digestión del lodo en la misma unidad (Letón, 2022).
2. Macrófitas en flotación: humedales extensivos antes descritos.
3. Humedales del Sistema Francés: humedales antes descritos.
4. Ecolagunas: Comprende los datos de las tecnologías extensivas en general.
5. Planta de Aireación Prolongada: Planta compacta de tratamiento biológico por aireación prolongada, decantación y recirculación de fangos activos, con posterior tratamiento de desinfección por ozonización.

6. Pozo de bombeo: Implantación de un Pozo de bombeo, con un pretratamiento mediante tamiz Tornillo, Desarenador / desengrasador, para eliminar áreas, objetos, aceites y grasas y un tratamiento Biológico (donde se eliminan el Nitrógeno, Fósforo y la Materia Orgánica) y Canal (Letón, 2022).
7. Vermifiltro: sistema biológico de tratamiento de aguas residuales a la vez que degrada la contaminación retenida en la depuración. Se compone por un sustrato donde actúa una población de lombrices de tierra (Bideatek, 2022).
8. Biodiscos: Son sistemas biológicos rotativos de contacto, se compone de una rueda que va girando en una balsa donde circula agua y el giro permite la mezcla del agua residual con los macroorganismos. Puede operar mediante aireación natural o forzada (Letón, 2022).

Se tendrán en cuenta los diferentes rendimientos y límites superiores estimados de cada parámetro de los sistemas de humedales antes descritos (tanto los extensivos como los intensivos) que se calculan con los datos de partida en el sistema y los rendimientos de eliminación en porcentaje a la salida del mismo. Los datos de partida del sistema son 425 mg/l de S.S., 450 mg/l de DBO₅ y 680 mg/l de DQO. En el caso de los valores de rendimiento que se dan como un rango entre dos valores se tomará el porcentaje más bajo, para que el límite sea lo más alto posible en cada sistema de depuración y así ver si se cumple la legislación en la peor situación de rendimiento posible.

Estos datos se compararán con los rendimientos y límites superiores que tendría una un agua residual máximos permitidas en los vertidos de aguas residuales urbanas para Zonas Normales y el P y N para Zonas Sensibles, según la Directiva 91/271/CEE. En cualquier caso, se puede considerar que alguno de los parámetros presentes en las aguas residuales procedentes de purines supere los límites superiores de la presencia en aguas depuradas, en ese caso se debe de cumplir un mínimo de eliminación con un rendimiento mucho mayor.

Tabla 4. Tabla comparativa de los Rendimientos de eliminación (%) y Límites superiores estimados (mg/l) y otros parámetros de algunas Tecnologías Extensivas significativas (Fuente: elaboración propia a partir de datos aportados por el Tutor académico).

TECNOLOGÍAS EXTENSIVAS								
Parámetro	FHS + IMHOFF		Macrófitas en flotación		Humedales del sistema francés		ECOLAGUNAS	
	Límite superior estimado (mg/l)	Rendimiento de eliminación (%)	Límite superior estimado (mg/l)	Rendimiento de eliminación (%)	Límite superior estimado (mg/l)	Rendimiento de eliminación (%)	Límite superior estimado (mg/l)	Rendimiento de eliminación (%)
S.S. (mg/l)	4.25	99	34	>92	21.25	>95	38.25	91
DBO5 (mg/l)	9	98	22.5	>95	22.5	>95	22.5	95
DQO (mg/l)	34	95	68	>90	68	>90	68	90
Superficie requerida (m ² / h.e.)	0,75		1,99		2 m ² /h.e. de filtros		1,05	
Consumo eléctrico (Kwh/m ³)	0,52		0,4		0,13		0,28	
Coste de implantación por h.e. (€)	296		240		400		258	
Coste de operación (€/m ³)	0,23		0,4		0,12		0,07	
Generación de lodos (m ³ /año)	85,78		24,3		15,3		15,95	

Tabla 5. Tabla comparativa de los Rendimientos de eliminación (%) y Límites superiores estimados (mg/l) y otros parámetros de algunas Tecnologías Intensivas significativas (Fuente: elaboración propia a partir de datos aportados por el Tutor académico).

TECNOLOGÍAS INTENSIVAS								
Parámetro	Planta de Aireación Forzada (FBA), decantación, recirculación de fangos y desinfección.		Pozo bombeo, tamiz, desarenador, desengrasador, biológico y canal.		Vermifiltro		Biodiscos	
	Límite superior estimado (mg/l)	Rendimiento de eliminación (%)	Límite superior estimado (mg/l)	Rendimiento de eliminación (%)	Límite superior estimado (mg/l)	Rendimiento de eliminación (%)	Límite superior estimado (mg/l)	Rendimiento de eliminación (%)
S.S. (mg/l)	25.5	94	29.75	93	21.25	95	21.25	95
DBO5 (mg/l)	27	94	27	94	45	90-95	22.5	95
DQO (mg/l)	115.6	83	136	80	34	95	68	90
Superficie requerida (m ² / h.e.)	0,1		0,3		0,5		0,5	
Consumo eléctrico (Kwh/m ³)	1,43		-		0,1-0,15		0,45	
Coste de implantación por h.e. (€)	186		81		307		41,91	
Coste de operación (€/m ³)	0,23-0,27		0,42		0,46		0,45	
Generación de lodos (m ³ /año)	3		No menciona		40-60 Humus		255	

En las tablas (Tabla 4 y Tabla 5) se puede observar que los rendimientos tanto en tecnologías extensivas como intensivas son bastante parecidos superando en su mayoría el 95%. El rendimiento de eliminación más bajo corresponde con el segundo tipo de tecnologías intensivas compuesto por un desarenador, desengrasador y un tratamiento biológico entre otros para la eliminación de la DQO. Los rendimientos de eliminación más altos corresponden con los sistemas extensivos (siempre que estudiemos pequeñas aglomeraciones urbanas como este caso 850 h.e.) y entre ellos destaca la primera de las tecnologías compuesta por un humedal horizontal superficial y un tanque Imhoff donde el rendimiento de eliminación de los S.S alcanza el 99%. En algunas tecnologías destacan parámetros donde el límite superior estimado supera los niveles de la legislación, esto se puede deber a que estos datos se han estimado y puede haber en la estimación de estos parámetros calculados y por lo tanto sería necesario el cumplimiento de un mínimo de eliminación con un rendimiento algo mayor.

En cuanto al resto de parámetros destaca que la superficie requerida es mucho menor en las tecnologías intensivas llegando a estar entre 0,1-0,5 m²/h.e. y en tecnologías extensivas es de hasta 2 m²/h.e. Se puede observar que el consumo eléctrico es muy superior en las tecnologías intensivas siendo máximo en la Planta de Aireación Forzada (por el aporte de oxígeno). En cuanto a la comparación de los costes, el coste de implantación por h.e. es superior en la mayoría de tecnologías extensivas y en el Vermifiltro dentro de las intensivas; con respecto al coste de operación es superior en las tecnologías intensivas de Vermifiltros y Biodiscos. La generación de lodos es superior en tecnologías intensivas de Vermifiltros y Biodiscos.

Normalmente, el rendimiento es menor en los sistemas extensivos, esto es debido a los kg de carga residual que entran, los sistemas extensivos no son capaces de eliminar correctamente grandes caudales de agua o grandes concentraciones de DQO y por ello están pensados para pequeñas aglomeraciones urbanas de hasta 2.000 h. e. como máximo (preferentemente de 1.000 h. e.), lo que limita su rango de aplicación. Estos sistemas reciben el efluente de un sistema previo de tratamiento si las cargas son muy elevadas o en combinación con otras tecnologías, tanto intensivas como extensivas, ya que de esta manera se varía el rango de aplicación indicado pudiendo ampliarse.

La eliminación de S.S en Humedales de Aireación Forzada suele ser efectiva. En cuanto al nitrógeno, normalmente en humedales tradicionales se dan condiciones anaerobias para la eliminación del nitrógeno al no haber suficiente oxígeno para que se lleve a cabo la nitrificación y desnitrificación, en este caso se obtienen reducciones gracias al aporte continuo de oxígeno al sistema. Para la eliminación del fósforo, la vegetación es capaz de fijarlo, aunque no suelen ser un método muy efectivo. En cuanto a los patógenos los humedales sí que pueden reducir los coliformes fecales con valores de iguales o menores a 200UFC/100ml (Lahora, 2003).

6.3 Matriz DAFO de ventajas e inconvenientes

Se va a realizar una matriz DAFO para evaluar las debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades de los tratamientos de depuración de aguas residuales más convencionales intensivos como puede ser una EDAR con respecto a los tratamientos naturales extensivos de humedales en cuanto a tecnologías más avanzadas e innovadoras de depuración. Los aspectos más relevantes que se van a tener en cuenta para ver las diferencias entre ambos tipos de sistemas de tratamiento son: el personal, la integración paisajística, la energía, la gestión de los residuos, los productos químicos, los olores, los equipos, el plan analítico, el tiempo de vida de las instalaciones, el impacto acústico, los costes y el programa de trabajo (Anexo 1, Tabla 6).

En cuanto al resultado de este análisis DAFO, destacan aspectos en las tecnologías intensivas como los altos costes de la depuración convencional donde los que tienen más peso el de personal y el consumo de energía. Después los costes más altos son los de la Gestión de Residuos y el Consumo de Químicos. Cuando el caudal sea más alto en la EDAR los costes bajarán. Sin embargo, la implantación de una EDAR, en pequeñas poblaciones que suelen tener caudales bajos de agua residual a tratar, normalmente es una inversión y coste de mantenimiento muy alta en comparación con sistemas de humedales intensivos. Se calcula que 1 m³ de agua cuesta 1€ depurarlo y verterlo al cauce público. Esto depende mucho de la eficiencia energética que hay en cada zona y de si fuera o no necesario elevar el agua bruta mediante una bomba (Ruiz, 2022). También destaca un menor uso de la superficie con un mantenimiento y mano de obra más complejos, así como una menor integración paisajística al

tener un aspecto artificial. Los procesos que se dan en estos sistemas son mayoritariamente muy acelerados y artificiales con una baja adaptabilidad a posibles cambios de caudal y donde se generan grandes cantidades de lodo.

Por el contrario, en los sistemas extensivos de humedales, los costes son mínimos o nulos en gasto de energía, se requiere una mayor superficie y el mantenimiento de las instalaciones es sencillo donde es fácil prevenir los posibles problemas que se den en la explotación. Además, estos sistemas se integran muy bien en el paisaje y los procesos que se dan tienen lugar a la velocidad natural (no se aceleran). Estos sistemas son capaces de someterse a una gran adaptabilidad en cuanto a cambios de caudal y carga y se generan cantidades de lodo muy pequeñas o nulas.

7 Conclusiones

En la actualidad, el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales construidos en países como Estados Unidos u otros países europeos está más que consolidada. Sin embargo, en España es una técnica novedosa, ya que se estima que el 80% de los humedales artificiales que se han construido en los últimos para el tratamiento de las aguas residuales urbanas, ha sido en los últimos 5 años (siendo los humedales de flujo horizontal los más extendidos), por no hablar de la lenta expansión de los humedales artificiales con otros usos en nuestro país.

Es necesaria una correcta depuración de las aguas residuales ya que muchas veces se supera la capacidad de autodepuración y dilución en los cauces y se produce el deterioro de la calidad de las aguas. Independientemente de su origen, las aguas residuales deben ser tratadas antes de que sean vertidas a los cauces de los ríos o a su depuración para proteger el estado ecológico de los mismos. Se debe evitar por ejemplo la aparición de fangos y flotantes, producir efluentes que tengan características físicas, químicas y microbiológicas óptimas para poder reutilizar las aguas, evitando por ejemplo el agotamiento del oxígeno presente en el agua, procesos de eutrofización de las mismas por excesos de nutrientes (nitrógeno y fósforo) así como evitar un posible riesgo para la salud pública humana.

Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales innovadoras como los sistemas de Humedales de Aireación Forzada, a menudo, se ven perjudicados con su reducida implantación. Esto se puede deber a varias causas, en primer lugar, por errores en el diseño previo y funcionamiento de las instalaciones que se siguen cometiendo a día de hoy, así como las malas experiencias con algunos humedales implantados. Esto puede derivar en una falta de interés de los técnicos organismos de cuencas, técnicos municipales, consultorías, alcaldes, concejales, etc. a la hora de proponer una EDAR de sistemas extensivos/intensivos y sostenibles. En segundo lugar, la falta de información, desconocimiento y desconfianza, así como los prejuicios hacia la ingeniería verde creyendo que tiene poca base científica sumado a el desconocimiento en nuestro país de estas técnicas.

Este nuevo sistema FBA al combinar aspectos de tecnologías extensivas de humedales e intensivas además de evitar emisiones de aguas residuales y lodos contaminantes al medio, reducirá las emisiones de efecto invernadero y con ello la huella de carbono reduciendo también el impacto de los usuarios sobre el cambio climático contribuyendo a la resiliencia al mismo.

Entre las ventajas de los sistemas extensivos frente a los intensivos destacan: una gran facilidad de mano de obra y sencillez en el funcionamiento, buena integración visual y paisajística, menor consumo energético, disminución de la producción de residuos y olores. Su programa de mantenimiento es más fácil al ser más sencillos y por tanto tienen un menor coste de construcción y mantenimiento, a la vez que mayor facilidad de explotación. Por otro lado, tienen un tiempo de vida más largo con un menor impacto acústico y un mayor rendimiento y eficacia en el tratamiento de aguas residuales en aglomeraciones urbanas de hasta 2.000 habitantes equivalentes.

En este trabajo se ha demostrado que una correcta implantación de estos sistemas, junto a una buena gestión y manejo de los mismos es fundamental para la expansión de estas técnicas alternativas en nuestro país. Con estos sistemas se pretende generar beneficios económicos contribuyendo a realzar la desarrollo sostenible y social, así como mejorar el saneamiento y con ello la salud humana.

8 Bibliografía

- Agencia Extremeña de la Energía (2013) *Los residuos ganaderos*. Extremadura: Programa emplea Verde, Unión Europea. Fondo Social Europeo, Fundación Biodiversidad, EAE<, Fórmate Bio.
- Aguas Residuales Info (ARI) (2015) *Humedales con Aireación Forzada FBA™, 2ª generación de humedales para el tratamiento de aguas residuales* [en línea] disponible en <<https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/humedales-con-aireacion-forzada-fba-2-generacion-de-humedales-para-el-tratamiento-de-zbzf3>> [consulta: 18 marzo 2022].
- Andrés, A. J. (2022) *Apuntes de la asignatura de Residuos Agrarios*. Documento inédito. Salamanca: Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales, Universidad de Salamanca.
- Arias I., Carlos A., y Brix, Hans (2003) *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (13),17-24.
- Arias Martínez, S.A., Betancur Toro, F.M., Gómez Rojas, G., Salazar Giraldo, J.P., y Hernández Ángel, M.L. (2010) *Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas*. *Informador Técnico* 74.
- Azcoitia, E. (2012) *Efecto de sobrecargas hidráulicas en el rendimiento de humedales contruidos para la depuración de aguas*. Tesis doctoral no publicada. Barcelona: Escuela Técnica Superior de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Bidatek (2022) *Tratamiento de aguas residuales. Vermifiltro BIDATEK*. España: Bidatek.
- Davis, L. (1995). *A handbook of constructed wetlands: A guide to creating wetlands for: agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater. In the Mid-Atlantic Region. Volume 1: General considerations*. USDA-Natural Resources Conservation Service.

- Directiva 91 / 271 / CEE, del 21 de mayo de 1991 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, núm. L 135, de 30 de mayo de 1991, pp. 40-52.
- Ecolagunas (2021) *Ecolagunas. Soluciones sostenibles para la depuración de aguas. Depuramos Agua Naturalmente*. Documento inédito. Ourense, Galicia: Empresa de Ecolagunas S.L.
- España. Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. *Boletín Oficial del Estado*, 30 de diciembre de 1995, núm. 312, pp. 1-5.
- España. Real Decreto-ley 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. *Boletín Oficial del Estado*, 8 de diciembre de 2007, núm. 294, pp. 1-22.
- España. Real Decreto-ley 509/1996, de 15 de marzo, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. *Boletín Oficial del Estado*, 29 de marzo de 1996, núm. 77, pp. 1-7.
- González, J. F. (2004) Humedales artificiales para depuración. *Fundación Global Nature*, 79-89.
- Kadlec, R. H., y Wallace, S. D. (2008) *Treatment wetlands*. Second Edition. Florida, Estados Unidos: CRC press.
- La Industria Cárnica Latinoamericana (ICL) N° 210 (2019) Ganadería y sustentabilidad. *Ganadería y Manejo Sustentable del Agua. Argentina: Publitec*, 12-17.
- Lahora, A. (2003) Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). *Ecología, manejo y conservación de los humedales. Instituto de Estudios Almerienses*. (pp. 99-112).
- Letón, P. (2022) *Apuntes de la asignatura de Tecnología del Agua. Depuración*. Documento inédito. Comunidad de Madrid: Estudios Universitarios de Posgrado en Hidrología, Universidad de Alcalá-Universidad Rey Juan Carlos.

- Martínez, P. A. (2014). *Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas*. Tesis doctoral. Murcia: Universidad de Murcia.
- Mena, J., Rodríguez, L., Núñez J., y Villaseñor, J. (2009) Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Alquimia Soluciones Ambientales. *Castilla La-Mancha, España: CONAMA*.
- Montenegro-Rosero, K., Fernández, L., Villamar-Ayala, C., y Espinoza-Montero, P. (2019) Humedales artificiales y celdas de combustibles microbianas como sistemas individuales y combinados para el tratamiento de aguas residuales: una revisión. *infoANALÍTICA*, Julio 2018, 7(2), 15-37.
- Nuevo, D. (2020) Humedales artificiales en depuración de agua residual. *Blog TECPA. Ingeniería de aguas* [Blog] 14 de mayo. Disponible en <<https://www.tecpa.es/humedales-artificiales-en-depuracion-de-agua-residual/>> [consulta: 1 mayo 2022].
- Ortega, E., Ferrer, Y., Salas, J. J., Aragón, C., y Real, A. (2010) Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. *España: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino*.
- Ortega, E., Ferrer, Y., Salas, J.J., Aragón, C., y Real, A. (2009) *La depuración de las aguas residuales para pequeñas poblaciones. Tema C: Agua y Ciudad*. España: CEDEX y CENTA.
- Ortega, E., Ferrer, Y., y Salas, J.J. (2013) *Presentación del Manual para la Implantación de Sistemas de Depuración en pequeñas poblaciones*. [PowerPoint]. Disponible <<https://www.chduero.es/documents/20126/426165/4-Presentacion-Manual-Depuracion.pdf/c4dc8e77-dbe6-9209-b3ba-8861a8fee4c0?t=1563250189351>> [consulta 14 de marzo de 2022].
- Río, I., y Ortega E. (2015) *Sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Jornada sobre depuración en pequeños núcleos urbanos Confederación Hidrográfica del Tago*. [PowerPoint]. Disponible en <

http://observatoriagua.uib.es/repositori/sa_río-ortega.pdf > [consulta 12 de marzo de 2022].

Rufete Sáez, A. B. (2015). *Caracterización de Residuos Ganaderos del Sureste Español: Implicaciones Agronómicas y Medioambientales*. Tesis Doctoral. Elche: Universidad Miguel Hernández de Elche, Escuela Técnica Superior de Orihuela.

Ruiz, O., Acero, A., Lorén, J., Russo, B., y Lapuente, M. (2017) Planta Piloto para el análisis del rendimiento de la depuración de aguas fecales mediante macrófitas. *V Jornadas de Ingeniería del Agua*, (1), 1-15.

Ruiz, S. (2022) Extensivos Vs Intensivos [correo electrónico] a Fernández, L. [8 marzo 2022].

Salas, J. J. (2018a) Humedales Aireados: intensificando lo extensivo (y II) *Blog Juan José Salas iAgua* [Blog] 29 de octubre. Disponible en <<https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/humedales-airados-intensificando-lo-extensivo-y-ii>> [consulta: 12 marzo 2022].

Salas, J. J. (2018b) Humedales Artificiales Aireados: como intensificar lo extensivo. *Blog Juan José Salas iAgua* [Blog] 22 de octubre. Disponible en <<https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/humedales-artificiales-airados-como-intensificar-lo-extensivo>> [consulta: 12 marzo2022].

Salas, J. J. (2018c) Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales: el Sistema Francés (I) *Blog Juan José Salas iAgua* [Blog] 30 de julio. Disponible en <<https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/tratamiento-aguas-residuales-mediante-humedales-artificiales-sistema-frances-i>> [consulta: 2 abril 2022].

Salas, J.J. (2021) *Seminario: Depuración de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas. Máster Universitario en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos*. Documento inédito. Madrid: Universidad de Alcalá y Universidad Rey Juan Carlos.

- Schierano, M. C., Panigatti, M. C., Maine, M. A., Griffa, C. A., y Boglione, R. (2020) Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: Removal efficiencies and plant uptake. *Journal of Environmental Management*, 272, 111094.
- Sierra-Pech, O. M., y López-Ocaña, G. (2014) Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. Revista de Divulgación. *División Académica de las Ciencias Biológicas. México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*, 19(36).
- Smasa (2015) Sistemas de Depuración. La gestión de purín en grandes explotaciones ganaderas y su impacto ambiental. *Blog Soluciones Medioambientales y Aguas, S.A. (SMA)* [Blog] 29 de octubre. Disponible en <<https://www.smasa.net/gestion-de-purin-explotaciones-ganaderas/>> [consulta: 4 abril 2022].

9 Anexo

Tabla 6. Matriz DAFO de Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades comparando distintos aspectos de Sistemas Convencionales intensivos y Sistemas Extensivos (Fuente: Elaboración propia a partir de: Nuevo, 2020; Sierra-Pech et al., 2014; Ortega et al., 2010; Ruiz, 2022).

	Debilidades		Amenazas	
	Sistemas convencionales intensivos (EDAR)	Sistemas extensivos (Ej.: humedales)	Sistemas convencionales intensivos (EDAR)	Sistemas extensivos (Ej.: humedales)
1. Personal	Se necesita personal cualificado con conocimiento del mantenimiento de las instalaciones de la depuradora y para el proceso de tomar decisiones ante cambios.	No da trabajo para tener ocupación durante varias horas al día y, por lo tanto, pocos sueldos.	Dificultades para encontrar operarios con formación específica para la explotación y mantenimiento de las instalaciones	No encontrar personal que quiera trabajar pocas horas. Dificultad de hacer una jornada completa laboral gestionando varios humedales al tratarse de sistemas para núcleos de pequeñas poblaciones distantes entre sí.
2. Integración paisajística	Las depuradoras rompen en general el entorno paisajístico, no se integran las instalaciones al entorno	-	-	Por muy integradas que estén en el paisaje, hay que impedir que los animales se alimenten de las especies evitando que accedan al interior de la parcela. Pueden aparecer mosquitos y plagas que afecten a la vegetación.
3. Energía	El coste energético es elevado, suele tener procesos aerobios que necesitan de turbinas, rotores, soplantes...equipos de mucha potencia y alto consumo energético y tienen que estar en continuo funcionamiento.	En el caso de que sea necesario y el agua no pueda discurrir por gravedad, habrá que implantar una bomba de alimentación intermitente para el bombeo del agua, aunque el consumo energético no es elevado.	Riesgo de cero eléctrico que inutilice la EDAR hasta reponer la energía eléctrica	-

4. Gestión de residuos	Se estima que 1 mg/l de DQO depurada genera 1mg/l de lodos, estos biológicos se gestionan externamente con un elevado coste de transporte y valorización y/o destino al vertedero	-	Puede que sea necesario gestionar residuos peligrosos que se generan en el mantenimiento, envases contaminados, aceites usados, etc.	La presencia de finos en el material filtrante puede provocar una rápida colmatación del sistema provocando un empeoramiento en el efluente final.
5. Productos químicos	Hay que tomar muestras y analizar el agua con frecuencia para el mantenimiento de la EDAR. Los costes de consumo de productos químicos son superiores en EDAR convencionales debido a la necesidad de estos en muchos procesos (cal, coagulante, floculante, cloruro férrico, etc.).	Al no usar productos químicos convencionales, ante un vertido externo demora más tiempo el volver a cumplir parámetros de vertido.	Riesgo de no tener productos químicos en stock, debido a causas externas como huelga de transportes, carreteras inutilizadas...que, al no poder disponer de ellos, provocan un efluente final deficiente.	Se pueden dar pérdidas de agua por evapotranspiración e incrementar la salinidad de los efluentes. Al no utilizar productos químicos un incumplimiento en el vertido final puede demorar más tiempo en corregirse.
6. Olores	Generan emisiones odoríferas tanto focalizadas como difusas, es necesario un equipo de desodorización con coste de productos químicos específicos.	En los sistemas de flujo superficial es necesaria la aplicación de efluentes secundarios de aguas tratadas para que el potencial de emisión de olores sea bajo.	Quejas vecinales ante emisiones odoríferas de los residuos que tardan en ser gestionados.	Una mala gestión de un sistema extensivo puede llegar a generar olores. Si funciona con normalidad esta amenaza es nula.
7. Equipos / Funcionamiento	Se necesitan numerosos equipos eléctricos de gran potencia para distintos procesos de depuración, entre ellos fangos activos, biodiscos, filtros, sedimentadores, sistemas de absorción, fotooxidación, etc.	Es un sistema natural que necesita que las plantas adquieran cierto grado de madurez. Se tarda más tiempo en lograr el régimen óptimo de funcionamiento del equipo. Requiere grandes conocimientos en el diseño, porque después tiene pocas posibilidades de regulación.	Riesgo de parada de equipos por no tener recambios en stock.	Los humedales están expuestos a cambios en las condiciones ambientales bajo las que operan. La temperatura es el factor que más afecta a su rendimiento, disminuye la efectividad de depuración de nitrógeno.

8. Plan analítico	Es más extenso ya que hay que controlar muchos parámetros intermedios que exige la administración.	Hay pocos factores de control regulables durante la operación, es muy importante que los humedales estén bien dimensionados y construidos.	-	Puede haber anomalías en algún parámetro del humedal y son señales de alarma en el mismo.
9. Tiempo de vida de las instalaciones	El Tiempo de vida de las instalaciones es menor.	Hay que llevar un mantenimiento suficiente para evitar que en los humedales de flujo subsuperficial se produzca la colmatación del sustrato.	El tiempo de vida útil se puede ver mermado por un plan de mantenimiento deficiente	Se puede dar la compactación y colmatación del sistema produciéndose la saturación del mismo, reduciendo considerablemente su vida útil
10. Impacto acústico	El impacto acústico es más alto debido a los motores y soplantes.	Aumenta en el caso de que haya que implantar una bomba o un sistema de pretratamiento.	Quejas vecinales ante el impacto acústico	-
11. Costes	Elevados costes de mano de obra, operación y mantenimiento (gestión de residuos) y de energía, generan el 70% de gastos de una EDAR	Requiere una mayor superficie que los sistemas de depuración convencionales. Por tanto, tiene limitaciones en cuanto al tamaño de las aglomeraciones urbanas y al ser para menos habitantes se incrementan los costes.	Incremento del ratio de costes de depuración vs. Metro cubico depurado, por incrementos de precios de energía en el mercado.	Puede que sean necesarias limpiezas de los sistemas de distribución de manera continua que conlleven el buen funcionamiento de los mismos. Se pueden incrementar si el material de implantación no es el adecuado.
12. Programa de trabajo	Llevar un plan de mantenimiento exhaustivo de prevención, corrección y contención de todos los equipos	Muchas veces requieren pretratamientos para para eliminar el exceso de sólidos suspendidos y evitar la colmatación del lecho.	Errores en el programa de trabajo ya que es muy específico y que requiere conocimientos técnicos del personal.	Hay que tener en cuenta el estado vegetativo de las plantas con el fin de evitar plagas y enfermedades. Sería necesario una detección precoz de los mismos.

	Fortalezas		Oportunidades	
	Sistemas convencionales intensivos (EDAR)	Sistemas extensivos (Ej.: humedales)	Sistemas convencionales intensivos (EDAR)	Sistemas extensivos (Ej.: humedales)
1. Personal	Suelen ser procesos automatizados por lo que, para sistemas de pequeñas poblaciones, no necesitan personal las 24h.	La mano de obra es mínima debido a que la operación y funcionamiento es menos complicada y menos peligrosa.	-	Puede que se permita la creación de zonas de recreo, restauración y educación ambiental en las proximidades al humedal.
2. Integración paisajística	Se necesita una menor superficie que en un sistema extensivo.	Al imitar sistemas naturales, buena integración visual y paisajística. Se dan hábitats para la fauna (aves). Bajo riesgo de exposición de las personas. Se usa vegetación propia de la zona, no se da el riesgo de invasión por especies exóticas.	No es viable la construcción de EDAR convencionales en zonas protegidas ni paisajes ya que no se integra bien con el mismo. No es un sistema sostenible de depuración. Oportunidad de integrar paisajísticamente siendo una depuradora con obra civil, como la EDAR Lagares (Vigo)	Mejora del estado de los ríos y ecosistemas fluviales. Gran aceptación social. Se generan espacios naturales protegidos y Parques Naturales incrementando el número de visitantes y el interés por la zona.
3. Energía	Al estar automatizado el sistema de depuración mediante automatismos y equipos eléctricos le genera una gran robustez.	Consumo energético nulo/bajo, ya que el proceso de depuración lo llevan a cabo las plantas.	Oportunidad de aprovechar la energía eléctrica para valorizar residuos o regenerar aguas para baldeos, jardines, etc.	Favorece los criterios de sostenibilidad y de economía circular No es necesario la implantación de una bomba siempre que el agua pueda discurrir por gravedad.
4. Gestión de residuos	No se suelen producir colmataciones en el sistema.	La producción de residuos es menor. No generan fangos. En muchos casos se produce agua reutilizable.	Generar energía eléctrica con la valorización de residuos, con un digestor de fangos.	Los fangos se acumulan y se retiran una vez mineralizados, después de unos 10 años. Puede que sea posible el aprovechamiento de la biomasa vegetal generada (ej.: alimentación animal).

5. Productos químicos	Un episodio puntual puede ser amortiguado rápidamente mediante productos químicos, por ej. un escape de sólidos puede ser minimizado con cloruro férrico.	Permiten complementar y solucionar déficits que no cubren las instalaciones convencionales. No es necesario el uso de productos químicos en la mayoría de los procesos ya que suceden de manera natural.	-	El buen funcionamiento de humedal implicará un rendimiento adecuado de DBO, DQO y sólidos en suspensión. Estos sistemas pueden generar aguas residuales ricas en materia orgánica y ajustarse a las necesidades de cada terreno. Ayuda a los municipios a tener una mayor calidad del agua
6. Olores	-	Disminución de olores, por ejemplo, en los humedales de FSS el agua no entra en contacto con el aire y por tanto se reduce la generación de olores y mosquitos.	La generación de olores es principalmente provocada por el almacenamiento de residuos durante un tiempo elevado. Surge la oportunidad de valorizar esos residuos en la misma planta sin tener que ser almacenados.	Puede ser instalada cerca de los núcleos urbanos, ya que no generan olores ni proliferación de insectos
7. Equipos / Funcionamiento	Los equipos de depuradoras convencionales se amortizan a largo plazo, normalmente antes de que termine la vida útil de la instalación. El tratamiento de las aguas residuales es más eficiente.	Son más sencillos, el programa de mantenimiento es más fácil de seguir. Los humedales de flujo subsuperficial minimizan el impacto de las bajas temperaturas sobre los rendimientos de depuración. Tienen capacidad de adaptación frente a las puntas diarias de caudal y de contaminación. Es un sistema respetuoso con la naturaleza.	Estos equipos pueden ser reutilizados en otra instalación.	Las plantas emergentes proporcionan superficie para la formación de películas bacterianas, facilitan la filtración y la adsorción de los contaminantes, oxigenación del sustrato, eliminación de nutrientes y controlan el crecimiento de algas. Protección térmica debido a la acumulación de restos vegetales. Capacidad de adaptación frente a variaciones estacionales.

8. Plan analítico	Tiene grandes posibilidades de regulación en la operación de la estación depuradora. Trazabilidad en cada parte del proceso, siendo más sencillo encontrar el problema y la solución.	Hay mayor facilidad en la explotación, no hay apenas averías ni equipos mecánicos. Se realizan lecturas analíticas de afluente y del efluente para evaluar el buen comportamiento del humedal.	-	-
9. Tiempo de vida de las instalaciones	-	Tiempo de vida mayor.	Obra civil que aproveche las pendientes y características del terreno para que la planta funcione por gravedad	-
10. Impacto acústico	-	El impacto acústico es mucho menor, prácticamente inexistente.	-	-
11. Costes	-	Menor coste de construcción por unidad de superficie, mantenimiento en su punto óptimo.	Aprovechamiento de aguas regeneradas. Generación de energía mediante residuos, además del ahorro de transporte y gestión externa de los mismos.	-
12. Programa de trabajo	La EDAR es capaz de tratar más contaminantes diferentes en el agua residual, y soporta una carga contaminante más alta.	El tratamiento de las aguas residuales es eficaz en aglomeraciones urbanas menores a 2.000 h.e., por lo que no tienen asociado un plan de trabajo complicado.	-	Pueden estar combinadas con otras tecnologías, tanto intensivas como extensivas, de esta manera varían el rango de aplicación indicado.