

# Trabajo Fin de Máster

## *DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL MUNICIPIO ARCOS DE LAS SALINAS (TERUEL)*

**Intensificación:** *TRATAMIENTOS DE AGUAS*

**Autor:**

*ADRIÁN RODRÍGUEZ LATORRE*

**Tutor:**

*DR. MIGUEL MARTÍN MONERRIS*

**Cotutor/es:**

*DRA. CARMEN HERNÁNDEZ CRESPO*

**SEPTIEMBRE 2017**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto
<b>Título del TFM en español:</b> Diseño de un Humedal Artificial para el municipio de Arcos de las Salinas (Teruel).
<b>Título del TFM en inglés:</b> Design of an artificial wetland for the township of Arcos de las Salinas (Teruel)
<b>Título del TFM en Valenciano:</b> Disseny d'un aiguamoll artificial per al municipi d'Arcs de las Salinas (Terol)
<b>Alumno:</b> ADRIÁN RODRÍGUEZ LATORRE.
<b>Tutor:</b> DR. MIGUEL MARTÍN MONERRIS
<b>Cotutor/es:</b> DRA. CARMEN HERNÁNDEZ CRESPO
<b>Fecha de Lectura:</b> SEMPTIEMBRE 2017

Resumen
<b>En español (máximo 5000 caracteres)</b>
<p>El objetivo principal de este trabajo es diseñar un humedal artificial para la depuración de aguas residuales urbanas producidas en el municipio de Arcos de las salinas (Teruel). En la actualidad, una gran cantidad de municipios españoles vierten sus aguas directamente a los ríos sin un tratamiento previo, entre los que se encuentra Arcos de las Salinas. Esto es debido a la gran cantidad de recursos económicos que se necesitan para las instalaciones que tradicionalmente se han estado implantando en nuestro país tanto para su ejecución como para su mantenimiento. Así pues, este proyecto intenta buscar una alternativa efectiva a la depuración de aguas tradicional con bajos costes económicos y un mantenimiento muy sencillo.</p> <p>Por otro lado, es importante señalar que la Directiva Marco del Agua (DMA) de la Unión Europea, adoptada en el año 2000, cuya trasposición en España se realizó mediante la Ley 62/2003 fijaba 2015 como año límite para conseguir el buen estado y la adecuada protección</p>

de las aguas continentales, costeras y de transición. Algo que si los pequeños municipios no realizan un tratamiento del agua previo a su vertido es imposible conseguir. Esto significa que a pesar de ser un proyecto focalizado para un municipio en concreto, podría ser extrapolado a otros que se encuentren en situaciones similares.

En cuanto al diseño del humedal artificial para tratar las aguas residuales, uno de los principales puntos a tener en cuenta es la gran variación de población que sufre el pueblo. Entre los meses de noviembre y mayo cuenta con una población de unas 100 personas mientras que entre junio y octubre alcanza en ocasiones los 1500 habitantes. Por esa razón realizar un proyecto que tuviese en cuenta esta población generaría un diseño ineficiente puesto que se busca encontrar un equilibrio entre los costes de inversión-explotación y los rendimientos, y esta situación sólo ocurre unas semanas al año.

Por lo mencionado anteriormente el diseño a adoptar para este sistema de depuración será aquel que satisfaga las necesidades de ambos periodos teniendo en cuenta las variaciones de población funcionando con rendimientos similares en ambos casos.

Es interesante remarcar que son numerosos los beneficios que pueden aportar los humedales artificiales a las zonas de implantación. Son destacables la mejora en la calidad de las aguas tras el tratamiento, en comparación con otras instalaciones de depuración de aguas tienen menor impacto visual y se pueden integrar fácilmente en el paisaje y pueden servir como lugares de interés para el estudio de flora y fauna característica de estos ambientes.

En definitiva, se trata de considerar que la finalidad de este proyecto no es sólo la depuración del agua vertida por este municipio sino una sinergia que pretende mejorar la calidad del estado del agua del río tras el paso por el municipio, establecer un punto de referencia para futuras actuaciones en otras poblaciones con características similares e integrar de tal modo la infraestructura en el pueblo de manera que hasta los residuos producidos puedan ser aprovechados para las actividades agrarias de la zona.

#### **En valenciano (máximo 5000 caracteres)**

L'objectiu principal d'aquest treball és dissenyar un aiguamoll artificial per a la depuració d'aigües residuals urbanes produïdes en el municipi d'Arcs de les Salines (Terol). En

l'actualitat, una gran quantitat de municipis espanyols aboquen les seues aigües directament als rius sense un tractament previ, entre els que es troba Arcs de les Salines. Açò és degut a la gran quantitat de recursos econòmics que es necessiten per a les instal·lacions que tradicionalment s'han estat implantant al nostre país tant per a la seua execució com per al seu manteniment. Així, doncs, aquest projecte intenta buscar una alternativa efectiva a la depuració d'aigües tradicional amb baixos costos econòmics i un manteniment molt senzill.

D'altra banda, és important assenyalar que la Directiva Marco de l'Aigua (DMA) de la Unió Europea, adoptada l'any 2000, la transposició de la qual a Espanya es va realitzar per mitjà de la Llei 62/2003 fixava com a any límit 2015 per a aconseguir el bon estat i l'adequada protecció de les aigües continentals, costaneres i de transició. Quelcom que si els xicotets municipis no realitzen un tractament de l'aigua previ al seu abocament és impossible aconseguir. Açò significa que a pesar de ser un projecte focalitzat per a un municipi en concret, podria ser extrapolat a altres que es troben en situacions semblants.

Quant al disseny de l'aiguamoll artificial per a tractar les aigües residuals, un dels principals punts a tindre en compte és la gran variació de població que patix el poble. Entre els mesos de novembre i maig compta amb una població d'unes 100 persones mentres que entre juny i octubre aconseguix de vegades els 1500 habitants. Per eixa raó realitzar un projecte que tinguera en compte esta població generaria un disseny ineficient ja que es busca trobar un equilibri entre els costos d'inversió-explotació i els rendiments, i esta situació només ocorre unes setmanes a l'any.

Pel que menciona anteriorment el disseny a adoptar per a este sistema de depuració serà aquell que satisfaga les necessitats d'ambdós períodes tenint en compte les variacions de població funcionant amb rendiments semblants en ambdós casos.

És interessant remarcar que són nombrosos els beneficis que poden aportar els aiguamolls artificials a les zones d'implantació. Són destacables la millora en la qualitat de les aigües després del tractament, en comparació amb altres instal·lacions de depuració d'aigües tenen menor impacte visual i es poden integrar fàcilment en el paisatge i poden servir com a llocs d'interés per a l'estudi de flora i fauna característica d'estos ambients.

En definitiva, es tracta de considerar que la finalitat d'este projecte no és només la depuració de l'aigua abocada per este municipi sinó una sinergia que pretén millorar la

qualitat de l'estat de l'aigua del riu després del pas pel municipi, establir un punt de referència per a futures actuacions en altres poblacions amb característiques semblants i integrar de tal manera la infraestructura en el poble tot així que fins als residus produïts puguin ser aprofitats per a les activitats agràries de la zona.

**En inglés (máximo 5000 caracteres)**

The main objective of this work is to design an artificial wetland for the purification of urban wastewater produced in the municipality of Arcos de las salinas (Teruel). At present, a large number of Spanish municipalities pour their waters directly into the rivers without a previous treatment, among which is Arcos de las Salinas. This is due to the large amount of economic resources that are needed for the facilities that have traditionally been implemented in our country both for its execution and for its maintenance. Thus, this project seeks to find an effective alternative to traditional water purification with low economic costs and very simple maintenance.

On the other hand, it is important to point out that the European Union Water Framework Directive (DMA), adopted in 2000 and transposed into Spain by Law 62/2003, established 2015 as the limit year for achieving good and adequate conditions Protection of inland, coastal and transitional waters. Something that if the small municipalities do not realize a treatment of the water previous to its pouring is impossible to obtain. This means that despite being a focused project for a specific municipality, it could be extrapolated to others who find themselves in similar situations.

As for the design of the artificial wetland to treat wastewater, one of the main points to take into account is the great variation of population that suffers the town. Between November and May it has a population of about 100 people, while between June and October it reaches 1500 inhabitants. For this reason, carrying out a project that takes into account this population would generate an inefficient design since it seeks to find a balance between investment-operating costs and yields, and this situation only occurs a few weeks a year.

As mentioned above, the design to be adopted for this purification system will be the one that satisfies the needs of both periods taking into account the variations of population working with similar yields in both cases.

It is interesting to note that there are numerous benefits that artificial wetlands can bring to the areas of implementation. The improvement in the quality of the water after the treatment is remarkable, as compared to other water purification facilities have less visual impact and can be easily integrated into the landscape and can serve as places of interest for the study of characteristic flora and fauna of these environments.

In short, it is a question of considering that the purpose of this project is not only the purification of the water poured by this municipality but a synergy that seeks to improve the quality of the water state of the river after the passage through the municipality, establish a reference point For future actions in other towns with similar characteristics and to integrate the infrastructure in the village so that even the waste produced can be used for agricultural activities in the area.

**Palabras clave español (máximo 5):** humedal, depuración, agua.

**Palabras clave valenciano (máximo 5):** aiguamoll, depuració, aigua.

**Palabras clave inglés (máximo 5):** wetland, purification, wáter.

## ÍNDICE

1.	Introducción.....	10
2.	Objetivos.....	13
3.	Conceptos previos.....	14
3.1.	Agua residual y pluvial.....	14
3.2.	Cargas contaminantes de las aguas residuales.....	14
3.3.	Tratamientos de aguas residuales.....	15
3.4.	Humedales artificiales.....	18
3.4.1.	Definición de humedal artificial.....	18
3.4.2.	Tipos de humedales artificiales.....	20
3.4.2.1.	Humedales artificiales de flujo superficial.....	20
3.4.2.2.	Humedales artificiales de flujo subsuperficial.....	21
3.4.3.	Elementos de un humedal artificial.....	25
3.4.4.	Ejemplos de aplicaciones de humedales artificiales.....	31
3.5.	Ventajas e inconvenientes de los humedales artificiales.....	39
3.5.1.	Ventajas.....	39
3.5.2.	Inconvenientes.....	40
4.	Marco legislativo.....	41
5.	Características de la zona.....	42
5.1.	Geografía.....	42
5.2.	Demografía.....	44
5.3.	Climatología.....	44
5.4.	Ecología.....	47
6.	Dimensionamiento del sistema de tratamiento.....	49
6.1.	Caudales de entrada.....	49
6.2.	Aliviadero.....	51
6.3.	Pretratamiento.....	54
6.3.1.	Rejas.....	54
6.3.2.	Tanque Imhoff.....	58
6.3.3.	Depósito de regulación.....	65
6.4.	Dimensionamiento biológico.....	65
6.5.	Deshidratación del fango.....	73
7.	Definición de la opción seleccionada.....	77
7.1.	Situación del sistema.....	77
7.2.	Proceso de construcción.....	79
7.2.1.	Trabajos previos.....	79

7.2.2.	Explotación y operaciones de mantenimiento.....	81
7.2.2.1.	Puesta en marcha.....	81
7.2.2.2.	Plagas.....	81
7.2.3.	Estructuras.....	82
7.2.4.	Vegetación.....	83
8.	Costes de operación estimados.....	84
9.	Conclusiones.....	86
	Bibliografía.....	89



## I.MEMORIA

## 1. Introducción.

La descarga de aguas residuales en cursos naturales de agua (arroyos, ríos, humedales) es una práctica antigua, surgida de la necesidad de evacuar dichas aguas fuera de los núcleos urbanos.

El impacto ambiental que tales descargas causan obligó a considerar que la depuración previa era imprescindible, particularmente para núcleos urbanos de gran población. Sin embargo, esta toma de conciencia es relativamente reciente en España, y como ejemplo se puede mencionar que en Madrid, hasta la década de 1970 se vertían directamente las aguas residuales al río Manzanares.

En el año 1991, se publica la Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas que tenía por objeto la recogida, el tratamiento y el vertido de las aguas residuales urbanas; y el tratamiento y vertido de las aguas residuales procedentes de determinados sectores para proteger el medio ambiente de los efectos negativos de los vertidos.

Esta Directiva 91/271/CEE establecía las medidas necesarias que los Estados miembros, entre los que se encuentra España, debían adoptar para garantizar que las aguas residuales urbanas reciben un tratamiento adecuado de su vertido y el plazo en el que se debían adoptar esas medidas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

La trasposición de la Directiva 91/271/CEE al Derecho español está contenida en el Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas.

Tabla 1. Tratamiento exigido según el Real Decreto Ley 11/1995 para Vertidos en Aguas Continentales. (Fuente: Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones, CHD).

TRATAMIENTO EXIGIDO SEGÚN EL REAL DECRETO LEY 11/1995 PARA VERTIDOS EN AGUAS CONTINENTALES		
Tamaño de población	Tipo de tratamiento	Fecha límite
– 2.000 h-e	Tratamiento adecuado	31/12/2005
2.000 – 15.000 h-e	Tratamiento secundario	31/12/2005
> 15.000	Tratamiento secundario*	31/12/2000

\*en poblaciones de más de 10.000 h-e en zonas sensibles se exige tratamiento terciario.

Los programas de aplicación de la Directiva 91/271/CEE, en España, se introdujeron mediante la aprobación del Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales 1995-2005. El Plan desarrollaba los objetivos, instrumentos y principales Líneas de Actuación sobre la gestión del dominio público hidráulico en relación con los vertidos de aguas residuales urbanas, así como el establecimiento de un calendario de inversiones para el decenio que abarcaba, y por último, una declaración de una serie de actuaciones y obras como de interés genial. Mediante este plan se pretendía alcanzar la conformidad de los sistemas de depuración de las aglomeraciones urbanas mayores de 2.000 habitantes equivalentes.

El Ministerio de Medio Ambiente, en colaboración con las Comunidades Autónomas, redactó el presente Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración 2007-2015, que da respuesta tanto a los objetivos no alcanzados por el anterior plan, como a las nuevas necesidades planteadas por la Directiva Marco del Agua y por el Programa A.G.U.A. (Actuaciones para la gestión y el uso del agua). Uno de los objetivos principales de este Plan Nacional es la depuración de aglomeraciones menores de 2.000 h-e en aguas continentales y estuarios, y menos de 10.000 h-e en aguas costeras, ya que el Plan 1995-2005 no lo abordó directamente debido a que ciudades importantes de todo el territorio nacional no contaban con sistemas de depuración.

Se presenta un reto en la depuración en pequeñas poblaciones (menos de 2.000 h-e) y sobre todo en las que sufren grandes variaciones de población entre verano e invierno, para elegir la solución adecuada en tratamiento de aguas residuales. Las tecnologías empleadas en los sistemas de depuración en pequeñas poblaciones deben ser adecuadas a los recursos técnicos y económicos, ser capaces de autorregularse de forma eficaz en un amplio rango de caudal y carga para obtener un efluente con una calidad suficiente y que se integren en el entorno. Las tecnologías de depuración de aguas residuales urbanas que reúnen estas características se conocen bajo el nombre genérico de "Tecnologías no convencionales de bajo coste".

La diferencia entre las tecnologías de bajo coste y de un sistema convencional es la velocidad de los procesos de depuración, ya que los sistemas de bajo coste trabajan a velocidad natural propia de los procesos, sin apenas gasto energético ni de reactivos. (Huertas et al., 2013).

Un ejemplo de estas tecnologías de bajo coste son los humedales artificiales. Las observaciones realizadas por naturalistas, ecólogos y otros investigadores sobre la capacidad depuradora de los humedales naturales incentivó el desarrollo de los sistemas de depuración basados en humedales artificiales, que en Europa se remonta a los años “50” del siglo XX, y en Estados Unidos a la década de los “60” del mismo siglo.

## 2. Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo de fin de máster es proponer una solución viable para depurar las aguas residuales urbanas producidas por el municipio de Arcos de las Salinas (Teruel) que actualmente son vertidas al río Arcos sin ningún tipo de tratamiento previo.

Se ha optado por el diseño de un humedal artificial ya que éste es capaz de eliminar los contaminantes del agua de manera relativamente sencilla y económica, esperando tras la implantación de este sistema numerosos beneficios entre los que destacan:

- La mejora de la calidad del agua del río Arcos aguas abajo del punto de vertido.
- Mejora de la biodiversidad de la zona.
- Aprovechamiento de los fangos producidos para las actividades agrarias del municipio.
- Establecer un punto de referencia para futuras actuaciones en municipios de características similares.
- Crear un espacio aprovechable para la educación ambiental.

Previamente a la realización del diseño del humedal artificial, se han planteado otros objetivos necesarios para el correcto cumplimiento del objetivo principal:

- Recopilar y analizar la normativa vigente en España en relación al saneamiento y tratamiento de aguas residuales.
- Estudiar las características físicas y ambientales de la zona donde se va a implementar el sistema de depuración de aguas residuales.
- Conocer el funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales, especialmente de tecnologías no convencionales de bajo coste como son los humedales artificiales.
- Dimensionar cada unidad del proceso de depuración siguiendo los criterios de diseño establecidos.
- Realizar unas pautas de recomendación de cómo gestionar tanto el humedal artificial como los lodos que genere el sistema.

### 3. Conceptos previos

#### 3.1. Agua residual y pluvial.

El *Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas* define como aguas residuales urbanas *“aquellas aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial”*.

Del mismo modo define las aguas residuales domésticas como *“aquellas aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas”*. Estas, además, se pueden subdividir en:

- Aguas negras: agua que se encuentra contaminada con sustancia fecal y orina provenientes del inodoro.
- Aguas grises: se caracterizan por ser aguas jabonosas, las cuales pueden contener grasas, provenientes de la ducha, lavabos, lavavajillas, lavadoras...

Por otro lado, las aguas pluviales procedentes de la precipitación la cual genera escorrentía superficial directa que arrastra residuos sólidos y líquidos depositados en la superficie de las calles, techos, vías terrestres entre otras. Se debe destacar como característica de este tipo de aguas que implican grandes aportaciones intermitentes de caudal y que producen un aumento de la concentración y presencia de contaminantes en el agua residual, principalmente en las primeras escorrentías generadas.

#### 3.2. Cargas contaminantes de las aguas residuales.

Los principales compuestos a controlar de las aguas residuales urbanas pueden resumirse en los siguientes (M. García et al, 2006):

- Sólidos gruesos: plásticos, maderas, trapos...
- Arenas
- Grasas y aceites.
- Sustancias oxidables: materia orgánica y compuestos inorgánicos que puede oxidarse fácilmente.

- Nutrientes: nitrógeno (N) y fósforo (P) que intervienen en los procesos de eutrofización.
- Agentes patógenos: bacterias, virus, protozoos... que pueden transmitir enfermedades.
- Contaminantes emergentes: nuevos contaminantes derivados de los nuevos hábitos de consumo y que a menudo, son muy difíciles de eliminar.

En general, esta carga contaminante de los vertidos urbanos supera la capacidad de autodepuración de los medios receptores, por ello, se plantea la necesidad de realizar un tratamiento de las mismas previo a su vertido, para evitar el deterioro progresivo de los ecosistemas.

### 3.3. Tratamientos de aguas residuales.

Una instalación de depuración de aguas residuales tiene como objetivo reducir los contaminantes presentes en el agua hasta cumplir con los límites de vertido que establece la legislación. Para lograr la eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual se utilizan determinados procesos que se pueden clasificar en:

#### - Procesos físicos

Los procesos físicos son aquellos en los que predomina la aplicación de fuerzas físicas para modificar las características y propiedades del agua. Algunas de las operaciones más comunes que se utilizan en el tratamiento de agua residual urbana son: desbaste, sedimentación primaria y secundaria, floculación, filtración...

#### - Procesos químicos

Mediante los procesos químicos se logra la transformación o eliminación de contaminantes mediante reacciones químicas. Este objetivo se consigue con el uso de aditivos químicos (coagulantes) para lograr la precipitación de fosfatos o desinfectantes para lograr la eliminación de patógenos.

- Procesos biológicos

El tratamiento biológico se lleva a cabo mediante una serie de procesos que tienen en común la utilización de microorganismos para llevar a cabo la eliminación de componentes solubles en el agua. Estos procesos aprovechan la capacidad de los microorganismos de asimilar la materia orgánica y los nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) disueltos en el agua residual para su propio crecimiento. Cuando se reproducen, se agregan entre ellos y forman unos flóculos macroscópicos con suficiente masa crítica como para decantar en un tiempo razonable.

Estos procesos se combinan a lo largo de la línea de aguas, que principalmente está compuesta por las siguientes etapas: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario. Existen varias alternativas para cada una de las fases, entre las que se encuentran los Humedales artificiales (Tabla 2)

Tabla 2. Tratamientos de la línea de aguas (Fuente: Martí, 2014).

<b>Pretratamiento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Desbaste</li> <li>-Desarenado-desengrasado</li> <li>-Homogeneización y regulación de caudales</li> <li>-Preaireación</li> </ul>		
<b>Tratamientos primarios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Decantación primaria</li> <li>-Flotación</li> <li>-Tratamiento Físico-Químico</li> <li>-Fosas sépticas y decantadores-digestores.</li> </ul>		
<b>Tratamientos secundarios</b>	Aerobios	Fangos activados	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alta carga</li> <li>-Medio carga</li> <li>-Aireación prolongada</li> <li>-Contacto-Estabilización</li> <li>-Doble etapa</li> <li>-Sistemas secuenciales</li> <li>-Bioreactores con membranas</li> </ul>



		Procesos de película fija	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Lechos bacterianos</li> <li>-Biodiscos</li> <li>-Biofiltros aireados</li> <li>-Lechos aireados sumergidos</li> <li>-Sistemas de biomasa fija sobre lecho móvil</li> </ul>
	Procesos no convencionales	Lagunaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Lagunas anaerobias</li> <li>-Lagunas aerobias</li> <li>-Lagunas facultativas</li> <li>-Lagunas aireadas</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Infiltración-percolación</li> <li>-Lechos de turba</li> <li>-Humedales artificiales</li> <li>-Filtros verdes</li> </ul>
	Procesos anaerobios		
<b>Tratamientos secundarios con eliminación de nutrientes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Tratamientos con eliminación de nitrógeno</li> <li>-Tratamientos con eliminación de fósforo</li> <li>-Tratamientos con eliminación de nitrógeno y fósforo</li> </ul>		
<b>Tratamientos terciarios</b>	Reducción de DBO <sub>5</sub>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Tratamiento físico-químico</li> <li>-Filtración</li> <li>-Micro filtración</li> <li>-Ultrafiltración</li> </ul>
	Desinfección		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cloro gas</li> <li>-Hipoclorito sódico</li> <li>-Dióxido de cloro</li> <li>-Ozono</li> <li>-Rayos ultravioleta</li> </ul>
	Reducción de sales		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Ósmosis inversa</li> <li>-Electrodialisis reversible</li> <li>-Intercambio iónico.</li> </ul>

A continuación, los lodos de la purga del decantador primario y secundario conocidos como fangos primarios y fangos secundarios reciben un tratamiento en la línea de fangos. Estos lodos se caracterizan por contener un elevado contenido de agua ocupando grandes

volúmenes, por esta razón, es necesario una serie de tratamientos para modificar sus características y permitir unas condiciones tales que su evacuación y disposición final se puedan gestionar eficazmente. Algunos de estos tratamientos son el espesamiento de fangos, la estabilización, el acondicionamiento o la deshidratación de fangos.

### 3.4. Humedales artificiales.

#### 3.4.1. *Definición de humedal artificial.*

El Convenio de Ramsar (Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas), define los humedales como: “Extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Ramsar Convention, 1971).

Los humedales son por tanto complejas estructuras formadas por el agua, la vegetación tanto sumergida como la flotante o emergente y el suelo. En los humedales se desarrollan especies vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a este medio. Estos seres vivos, con la ayuda de procesos físicos y químicos, tienen la capacidad de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo e incluso, en algunos casos, productos químicos tóxicos.

Con la intención de aprovechar el gran potencial depurador de estos humedales para tratar las aguas residuales, se han diseñado instalaciones que recrean estas características típicas de los humedales naturales. Los humedales están dentro de la clasificación de sistemas de depuración natural del agua. Están basados en la recreación de ecosistemas acuáticos con el objetivo de aprovechar los procesos de eliminación de contaminantes que se dan en los mismos (Salas, Pidre y Cuenca, 2007), sin requerir energía externa ni aditivos químicos (García y Corzo, 2008).

Los humedales específicamente contruidos con el propósito de controlar la contaminación del agua han recibido gran cantidad de nombres en las distintas partes del mundo donde han sido usados (Crites *et al.*, 2000). La denominación más extendida es la de “Humedales

Artificiales” o “Humedales Construidos” (“Constructed Wetlands”; U.S Environmental Protection Agency, 1998).

Es importante mencionar que en la depuración de aguas residuales, se considera que un humedal artificial es aquel sistema que utiliza macrófitos (plantas que se ven a simple vista), en contraposición a los micrófitos (generalmente microalgas), ya que estos sistemas se consideran lagunajes y no humedales. Los sistemas naturales pueden clasificarse en dos categorías según el tratamiento tenga lugar mayormente en el terreno o en la masa de agua (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de los Sistemas Naturales de Tratamiento de Aguas Residuales. (Fuente: García y Corzo, 2008)

Sistemas Naturales de Tratamiento de Aguas Residuales				
Basados en la aplicación del agua en el terreno		Basados en los procesos que suceden en la masa de agua		
Aplicación subsuperficial	Aplicación superficial	-Sistemas con plantas flotantes	-Lagunaje natural	-Humedales artificiales flujo superficial
-Zanjas y lechos filtrantes -Humedales artificiales flujo subsuperficial	-Filtros verdes -Infiltración-Percolación -Filtros de arena			

Como se explicaba anteriormente, los humedales son sistemas de depuración en los que se reproducen los procesos de eliminación de contaminantes que tienen lugar en las zonas húmedas naturales. El carácter artificial de este tipo de humedales viene definido por las siguientes peculiaridades (Salas et al., 2007):

- El confinamiento del humedal se construye mecánicamente y se impermeabiliza para evitar pérdidas de agua al subsuelo.
- Se emplean sustratos diferentes al terreno original para el enraizamiento de las plantas.
- Se elige el tipo de plantas que van a colonizar el humedal.

La depuración de las aguas residuales tiene lugar al hacerlas circular a través de estas zonas húmedas artificiales, en las que se desarrollan procesos físicos, químicos y biológicos. La tecnología de humedales artificiales actúa pues, como un complejo ecosistema en el que participan los siguientes elementos (Vymazal, 2008; Kadlec et al., 2009):

- El agua a tratar, que circula a través del sustrato filtrante y/o de la vegetación.
- El sustrato, que tiene las finalidades de servir de soporte a la vegetación y de permitir la fijación de la población microbiana (en forma de biopelícula), que va a participar en la mayoría de los procesos de eliminación de los contaminantes presentes en las aguas a tratar.
- Las plantas emergentes acuáticas (macrófitas), que proporcionan superficie para la formación de películas bacterianas, facilitan la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, contribuyen a la oxigenación del sustrato y a la eliminación de nutrientes y controlan el crecimiento de algas, al limitar la penetración de la luz solar. Por otro lado esta vegetación produce una amortiguación térmica lo cual es muy importante para la supervivencia de las bacterias en invierno. Asimismo, la vegetación permite la integración paisajística de estos dispositivos de tratamiento.

#### 3.4.2. Tipos de humedales artificiales.

En cuanto a los tipos de humedales artificiales tradicionalmente se han clasificado en dos tipos según la forma en que circule el agua: superficial o subterránea. Los de *Flujo Superficial* o también conocidos de *Flujo Libre* (en inglés reciben el nombre de Surface Flow Wetlands, SFW, o Free Water Surface Wetlands, FWS), en este tipo de humedales artificiales el agua circula por encima del sustrato, por otro lado en los *Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial* (en inglés Subsurface Flow Wetlands, SSFW), el agua circula por el humedal entre los espacios intersticiales del lecho filtrante, es decir, de forma subterránea.

##### 3.4.2.1. Humedales artificiales de flujo superficial.

En los humedales artificiales de flujo superficial, el agua que circula en lámina libre entre las plantas, está expuesta directamente al sol y la atmosfera. El calado de esta lámina de agua está comprendida entre 30 y 40cm (García y Corzo, 2008).

La capa más superficial es aeróbica y las más profundas son normalmente anaeróbicas si no existe aireación mediante medios auxiliares, por lo que se dan unas condiciones muy favorables para la eliminación del nitrógeno mediante procesos de nitrificación y desnitrificación.

Se considera que las reacciones biológicas se dan por la actividad de los microorganismos adheridos a la parte sumergida de las plantas, el detritus vegetal y la zona béntica del suelo. Además, las partes sumergidas de las hojas y los tallos muertos se degradan y se convierten en sustrato para el crecimiento de la película microbiana.

Estos sistemas se pueden considerar como una variedad del lagunaje clásico, con la diferencia de que en los humedales artificiales de flujo superficial el calado de la lámina de agua es menor y la vegetación está compuesta por macrofitos los cuales están enraizados al fondo (Ortega et al, 2010).

Principalmente se utilizan en tratamientos de afinación de la calidad del agua; como tratamientos terciarios (García y Corzo, 2008) y también para la creación y restauración de ecosistemas acuáticos, donde la depuración es un valor añadido (Salas et al. 2007).

En la siguiente figura se puede ver la sección tipo de estos humedales artificiales descritos:

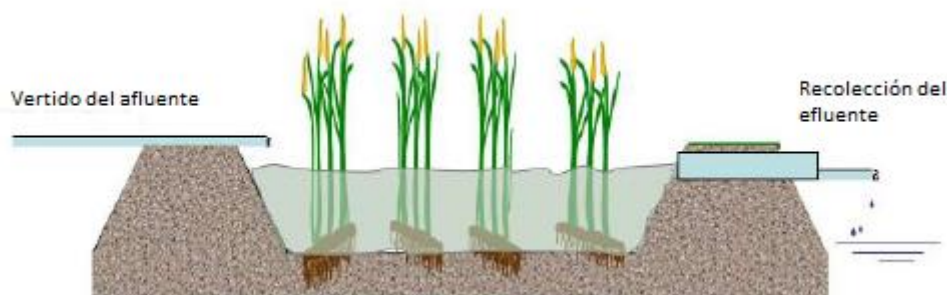


Figura 1. Humedal artificial de flujo superficial. (Fuente: García y Corzo, 2008).

#### 3.4.2.2. Humedales artificiales de flujo subsuperficial.

En los humedales artificiales de flujo subsuperficial, el agua no está expuesta directamente a la atmosfera; tiene una circulación de tipo subterránea por un medio granular, en contacto directo con las raíces y los rizomas de las plantas. En estos casos el calado de la lámina de agua está comprendida entre 30 y 90 cm (García y Corzo, 2008). En este tipo de humedales artificiales la biopelícula que crece adherida al medio granular, a las raíces y a los rizomas

juega un papel fundamental en los procesos de descontaminación del agua desarrollándose principalmente en condiciones de anoxia.

Los sistemas de flujo subsuperficial tienen una mayor capacidad de tratamiento que los sistemas de flujo superficial, es decir, requieren menor superficie para tratar una determinada carga, ya que la porosidad del medio aumenta considerablemente la superficie de contacto. Por otro lado, al circular el agua subsuperficialmente, desaparece el riesgo de aparición de olores y mosquitos, además de evitar el posible riesgo de que el personal de mantenimiento tenga contacto con el agua residual parcialmente tratada.

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial se utilizan habitualmente como unidad clave en la depuración de aguas residuales generadas en poblaciones de menos de 2000 habitantes, para el tratamiento de aguas que solo han sido pretratadas (Salas et al, 2007).

Dentro de los humedales artificiales de flujo subsuperficial se puede establecer otra clasificación según el sentido de circulación del agua: de flujo horizontal o de flujo vertical.

- Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal

La alimentación de estos sistemas es continua y el agua circula horizontalmente a través del medio granular, los rizomas y las raíces. Se caracterizan por trabajar permanentemente inundados -con unas cargas alrededor de  $6 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2 \text{ día}$  (García y Corzo, 2008). En la siguiente ilustración se puede apreciar un esquema de este tipo de humedal artificial.

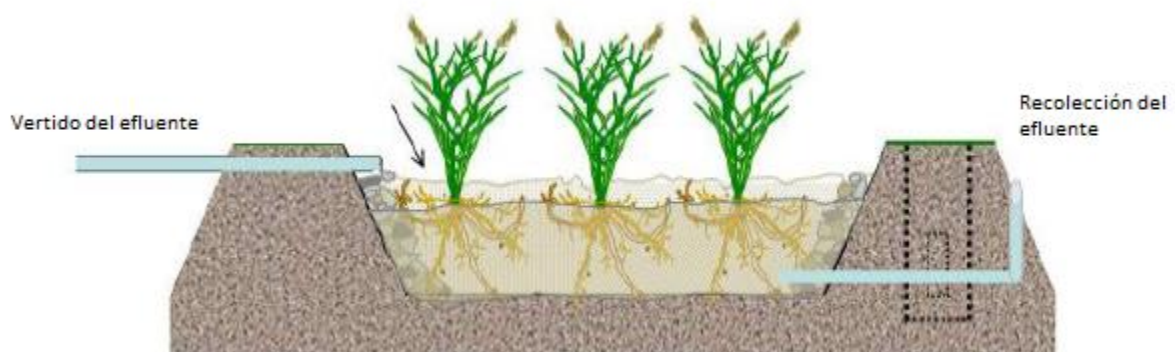


Figura 2 Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal. (Fuente: García y Corzo, 2008).

- Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical

Esta variación de los humedales de flujo subsuperficial se caracteriza principalmente, por tener una circulación del agua de tipo vertical con una alimentación discontinua, de tal manera que no se encuentra permanentemente inundado. La corriente en sentido descendente del agua crea una corriente de aire ascendente que produce efluentes más oxigenados. Esto hace posible tratar una mayor carga orgánica y que tengan lugar los procesos de nitrificación y desnitrificación. Estos humedales tienen una mayor capacidad de tratamiento que los de flujo horizontal pero, son más susceptibles a sufrir la saturación del material granular. En la siguiente figura se aprecia un esquema de este tipo de sistemas.

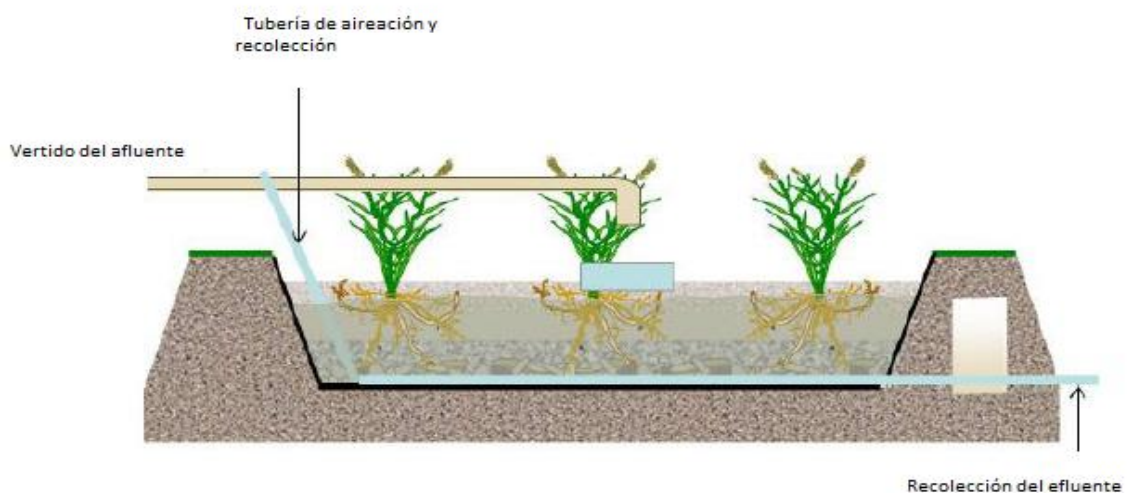


Figura 3. Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical. (Fuente García y Corzo, 2008).

A continuación, se muestra un resumen comparativo de las características de funcionamiento de estos dos tipos de humedales artificiales de tipo subsuperficial.

Tabla 4 Características de funcionamiento de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y vertical. (Fuente: Delgadillo et al, 2010)

Humedales artificiales subsuperficiales		
	Horizontal	Vertical
<b>Funcionamiento</b>	Continuo	Discontinuo
<b>Estado de oxidación</b>	Más reducido	Más oxidado
<b>Eficiencia</b>	Más superficie	Menor superficie
<b>Carga superficial (DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>d)</b>	4-6	20-40
<b>Nitrificación</b>	Compleja	Se consigue

<b>Operación</b>	Sencilla	Más compleja
------------------	----------	--------------

Igualmente, se presenta en la Tabla 5 las características principales de los dos tipos de humedales (flujo superficial y subsuperficial) así como una comparación entre ambos.

Tabla 5 Resumen de las características de los humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial. (Fuente: Delgadillo et al, 2000).

Humedales artificiales		
	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
<b>Tratamiento</b>	Tratamiento de flujos secundarios	Tratamiento de flujos primarios
<b>Carga orgánica</b>	Opera con baja carga orgánica	Opera con alta carga orgánica
<b>Olor</b>	Puede darse el caso	No da problemas
<b>Insectos</b>	Control más caro	No aparecen
<b>Protección térmica</b>	Mala, las bajas temperaturas afectan a los procesos	Buena, por la protección que ejerce la vegetación y el flujo subterráneo mantiene su temperatura constante
<b>Superficie</b>	Requieren superficies de mayor tamaño	Requieren superficies de menor tamaño
<b>Coste</b>	Menor gasto	Mayor coste por el material granular
<b>Valor como ecosistema</b>	Mayor valor como ecosistema para la vida salvaje, el agua es accesible	Menor valor debido a que el agua es difícilmente accesible
<b>Usos generales</b>	Restauración y creación de nuevos ecosistemas	Tratamiento principal de las aguas residuales
<b>Operación</b>	Tratamiento adicional a sistemas convencionales	Tratamiento secundario

A causa de que en el municipio no existe ningún tratamiento previo, se debe tener en cuenta el diseñar un tratamiento primario que reduzca las concentraciones de los contaminantes en el agua. Por lo tanto, el tipo de humedal que se considera más adecuado es el de flujo subsuperficial con las ventajas de que requiere menor espacio y no da problemas de olores.



Dentro de los humedales subsuperficiales, se ha optado por el de flujo horizontal, ya que requiere una menor inversión y menor operación a pesar de ser menos eficiente.

#### 3.4.3. Elementos de un humedal artificial.

Como se mencionaba anteriormente los humedales artificiales son ecosistemas diseñados, contruidos y mantenidos como una alternativa viable y sustentable, que permite la reducción, transformación o eliminación de los contaminantes presentes en las aguas residuales. Su diseño, está basado en los elementos y procesos que tienen lugar en los humedales naturales: aeróbicos-anaeróbicos, columna de agua, vegetación adaptada a la inundación temporal o permanente y los que generan los microorganismos y la fauna. Además cuentan con base, generalmente asfáltica, impermeable que evita las fugas de agua.

##### - Agua

Debido a que es el elemento que se pretende tratar y ejerce de conector entre todas las partes del humedal es el elemento más significativo de los humedales artificiales. De acuerdo con J. Lara (1999) la hidrología es el factor más importante en el diseño de los humedales artificiales, llegando a ser un factor decisivo en el éxito o el fracaso de este.

Como también menciona J. Lara en su trabajo *“Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales”*, el humedal debe ser verificado periódicamente para asegurarse de que el agua se está moviendo a través de todas las partes del humedal, que el aumento de residuos no ha bloqueado caminos de flujo y que no se han desarrollado áreas de estancamiento que aumenta la probabilidad de mosquitos. Además debido a que se ha decidido que el sistema adecuado a instalar es el de flujo subsuperficial es importante verificar que el flujo con los cambios de niveles del agua no se desarrolla en la superficie.

##### - Sustrato

El sustrato de los humedales artificiales está compuesto principalmente por la grava aportada para la construcción del mismo. Tras la puesta en marcha y su continuo funcionamiento su composición comienza a tener restos de los sedimentos arrastrados por

el agua que quedan retenidos en la grava y la vegetación muerta que se pueda ir acumulando.

Como se mencionaba anteriormente, el sustrato ofrece el soporte adecuado para el crecimiento de microorganismos que serán los responsables de las transformaciones biológicas dentro del humedal. El modelo desarrollado por Kadlec y Knight (1996), considera que en los humedales artificiales la proliferación de los microorganismos da lugar a la producción de nueva materia orgánica, parte de la cual quedará retenida en el propio humedal mientras que el resto saldrá del sistema, empeorando la calidad final de los efluentes. Esto quiere decir que para cada parámetro existirá una concentración umbral mínima por debajo de la cual será imposible mejorar la calidad del agua tratada. Dichas concentraciones se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 6. Valores umbrales para los distintos contaminantes. (Fuente: Kadlec, 2000)

Parámetros	Concentraciones umbral (mg/l)
<b>Sólidos en suspensión</b>	1-6
<b>DBO<sub>5</sub></b>	1-10
<b>Nitrógeno amoniacal</b>	< 0,5
<b>Nitrógeno nítrico</b>	< 0,1
<b>Fósforo total</b>	< 0,1

#### - Vegetación

Las plantas emergentes acuáticas (macrófitas), al igual que el sustrato, proporcionan superficie para la formación de películas bacterianas, ayudan a la filtración y la adsorción de los contaminantes del agua residual, contribuyen a la oxigenación del sustrato y a la eliminación de nutrientes y controlan el crecimiento de algas, al limitar la penetración de la luz solar. Asimismo, la vegetación permite la integración paisajística de estos dispositivos de tratamiento.

Si bien con todo lo anterior expuesto es innegable el gran valor que tiene la vegetación en los humedales algunos estudios (Young et ali., (2000); Brown et ali., (2000) Liehr et ali. (2000)) indican que la vegetación no tiene un gran impacto en el rendimiento de los sistemas de flujo subsuperficial. En contraposición, en los humedales artificiales de flujo superficial, la vegetación constituye uno de los factores más importantes en el rendimiento del sistema. Su

presencia distribuye (evitando caminos preferentes) y ralentiza la velocidad del agua, aumentando el tiempo de residencia del agua y favoreciendo la sedimentación.

Tabla 7. Funciones generales de las diferentes partes de las macrófitas. (Fuente: Brix, 1997).

Zona de la macrófita	Función en el proceso de tratamiento
<b>Parte aérea</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Atenuación de la luz reduciendo el crecimiento del fitoplancton</li> <li>-Influencia al microclima produciendo un aislamiento durante el invierno</li> <li>-Reduce la velocidad del viento, reduciendo el riesgo de resuspensión de partículas</li> <li>-Mejora la estética</li> <li>-Almacena nutrientes</li> </ul>
<b>Parte sumergida</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Efecto filtrante de residuos</li> <li>-Reduce la velocidad del agua facilitando la sedimentación y reduciendo la resuspensión de partículas</li> <li>-Proporciona superficie para el biofilm,</li> <li>-Excreción de oxígeno fotosintético favoreciendo la degradación y la nitrificación</li> </ul>
<b>Raíces</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Estabiliza la superficie del sedimento</li> <li>-Libera oxígeno favoreciendo la degradación y la nitrificación</li> </ul>

A la hora de escoger una vegetación para los humedales artificiales se recurre a emular los humedales naturales, por tanto la vegetación empleada es la misma que se encontraría en el medio natural. Son plantas acuáticas emergentes (eneas, juncos, carrizos, etc.) helófitos que aparecen aguas poco profundas, sus tallos y hojas emergen fuera del agua y están arraigados al suelo. Este tipo de plantas toleran bien las condiciones de falta de oxígeno, que se producen en suelos encharcados, al contar con canales internos o zonas de aireación (aerénquima), que facilitan el paso del oxígeno desde las partes aéreas hasta la zona radicular (Tanner et al., 2003; Crites et al., 2006). Asimismo, presentan una elevada productividad (50-70 toneladas de materia seca/ha.año) (Martín, 1989).

Tabla 8. Características de las macrófitas más utilizadas en los sistemas de depuración. (Fuente: J. Lara (1999), Cooper et al. (1996), Kadlec et al. (2000), Guillem et al. (2016)).

	Gramíneas	Tifáceas	Ciperáceas	Iridáceas	Juncáceas
<b>Nombre en latín</b>	Phragmites australis	Typha spp	Scirpus lacustris L.	Iris spp	Juncus spp
<b>Nombre común</b>	Cañizo	Enea	Carrizo	Iris	Junco
<b>Profundidad radicular (m)</b>	>0.6	0.3 - 0.4	-	-	0.6 - 0.9
<b>Profundidad de inundación</b>	<0.05 - 0.50	0.10 – 0.75	-	< 0.05 – 0.20	< 0.05 – 0.25
<b>Duración de la inundación (%)</b>	70 – 100	70 – 100	-	50 – 100	50 – 100
<b>Temperatura deseable</b>	12 – 23	10 - 30	18 – 27	-	16 - 26
<b>Rango efectivo de pH</b>	2 – 8	4 – 10	4 – 9	-	5 – 7.5
<b>Crecimiento</b>	Rápido	Rápido	Rápido	Rápido	-
<b>Predación</b>	Poco atractiva para las aves	Muy atractiva para las aves	Poco atractiva para las aves	Poco atractiva para las aves	-
<b>Supervivencia</b>	Alta	Alta	Media	Alta	-

- Microorganismos

Una característica fundamental de los humedales artificiales es que sus funciones están muy reguladas por los microorganismos y su metabolismo (Wetzel, 1993). El papel de estos seres vivos es fundamental en la depuración de las aguas dentro del sistema de tratamiento, ya que, la eficiencia de los humedales artificiales depende de la actividad microbiológica. Por lo tanto en el diseño, se tienen en cuenta las necesidades de estos microorganismos adecuando el sustrato y la vegetación para servir como elemento de fijación. La actividad microbiana incluye:

- La transformación de gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
- Modifican las condiciones de reducción/oxidación del sustrato modificando la capacidad del humedal.
- Están involucrados en el reciclaje de los nutrientes.

Mientras que algunas de las transformaciones son aérobicas otras son anaeróbicas. Sin embargo existen muchas bacterias que son facultativas anaerobias capaces de funcionar en ambas condiciones según las condiciones en el humedal artificial.

Las poblaciones de microorganismos se ajustan a los cambios de las características del agua a tratar. Estas poblaciones pueden aumentar rápidamente cuando las relaciones de energía-contaminantes en el agua son óptimas para ellos. Cuando estas condiciones pasan a ser desfavorables gran parte de los microorganismos pasan a estar en un estado latente y pueden permanecer en este estado durante años (Hilton, 1993).

Los microorganismos presentes en los humedales artificiales son:

- Bacterias

Las bacterias presentes en los humedales artificiales en su mayoría son heterótrofas pero, también se pueden encontrar autótrofas y son el componente principal del flóculo. Las bacterias se encargan de la degradación de la materia orgánica y de la eliminación de los nutrientes para liberar después compuestos gaseosos del carbono a la atmósfera (anhídrido carbónico, metano). Tienen un papel clave en el ciclo del nitrógeno ya que son las responsables de la nitrificación/desnitrificación y transforman formas insolubles de fósforo a formas solubles fácilmente asimilables por las plantas.

- Hongos

De manera general estos organismos se encargan de descomponer la materia orgánica. Mayoritariamente los que se pueden encontrar en los humedales artificiales son organismos saprotíficos, es decir, se nutren de restos de organismos (restos de alimentos, residuos de las plantas...), ayudando así a reducir la carga orgánica del sistema.

- Protozoos

Los protozoos son organismos unicelulares cuyo ciclo de vida incluye una forma vegetativa y una forma resistente conocida como quiste. Estos organismos son muy abundantes en las aguas residuales, existiendo numerosas especies distintas que contribuyen a la depuración de las aguas. Su papel es clave en el proceso de depuración ya que consumen directamente la materia orgánica disuelta en el agua y además son predadores de las poblaciones bacterianas ayudando así a la formación de flóculos. El tipo de protozoos presentes dependerá de la concentración de nutrientes, la cantidad y calidad de la materia orgánica, la temperatura, oxígeno, pH, poblaciones bacterianas, etc, por ello, se puede decir que son indicadores de la calidad del proceso de depuración.

- Microalgas

Las algas aportan oxígeno al agua debido a que son seres fotosintéticos. Esto contribuye a crear un ambiente aerobio en el que se dan lugar los procesos de oxidación de los contaminantes. Sin embargo un gran crecimiento de las microalgas (que tiene lugar cuando hay exceso de nitratos y fosfatos) puede causar grandes problemas dentro de un humedal artificial, aumentan los sólidos suspendidos en el sistema lo que conlleva a un aumento de la turbidez y se bloquea de esta forma el paso de luz en la columna de agua, además, aparece la competencia por los nutrientes con las plantas. Para controlar este crecimiento descontrolado es importante que los macrófitos instalados en el humedal bloqueen la luz del sol a estos organismos y reducir los sólidos suspendidos (con la carga orgánica asociada a ellos).

En relación con los microorganismos, los tratamientos físicos como la precipitación, la adsorción o el arrastre por corriente de gas, entre otros, transfieren los contaminantes del agua a una segunda fase, pero sin eliminarlos. Son, por tanto, procesos no destructivos. Los tratamientos químicos tales como la oxidación húmeda, la ozonización, la radiación UV, o el empleo de agentes químicos oxidantes (cloro, permanganato potásico, peróxido de hidrógeno, etc.) actúan sobre aquellas moléculas susceptibles de oxidación. Son, por tanto, procesos no selectivos, lo que eleva considerablemente los costes de implantación y de oxidante (Scott y Ollis, 1995).

Por lo tanto, los tratamientos biológicos (que implican el trabajo con microorganismos) son preferidos siempre que sea posible, ya que tienen mayores rendimientos con menores costes económicos de explotación y mantenimiento, y destruyen completamente los

contaminantes, transformándolos en sustancias inocuas como el dióxido de carbono, el metano, el nitrógeno molecular, y el agua. La mineralización de compuestos contaminantes mediante microorganismos es, por tanto, un proceso destructivo completo (Daphne, 1994). Los costes de inversión de los procesos biológicos son del orden de 5 a 20 veces menores que los químicos. A su vez, los costes de tratamiento son de 3 a 10 veces menores (Marco et al., 1997).

#### - Fauna

Los humedales artificiales proporcionan hábitat para una gran diversidad de animales tanto vertebrados como invertebrados. Entre los invertebrados, destacan los insectos y los gusanos que contribuyen al proceso de depuración fragmentando el detritus y consumiendo materia orgánica. Las larvas de numerosos insectos consumen cantidades significativas de este material durante su estado larvario que puede durar algunos años. Otro rol que pueden asumir los invertebrados es el de control de plagas ya que las libélulas son importantes predadores de los mosquitos. Este punto es muy importante ya que es fácil que en los humedales se den casos de plagas de mosquitos contra las que habría que actuar, aunque es poco probable que se diese en este caso por haber tomado como solución un humedal artificial de flujo subsuperficial.

A pesar de que los invertebrados son los animales más importantes en lo que respecta a la mejora de la calidad de agua, en los humedales artificiales también se puede encontrar una gran variedad de anfibios, tortugas y pájaros.

#### *3.4.4. Ejemplos de aplicaciones de humedales artificiales.*

Los humedales artificiales se llevan usando para el tratamiento de aguas residuales desde comienzos de siglo. Las ciénagas, humedales y turberas se concibieron como importantes purificadores de aguas residuales (OPS/OMS, 1999).

El empleo de humedales de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales, tiene su origen en los trabajos de K. Seidel, del Max Planck Institute en Alemania, a comienzos de los años 50. En años posteriores, K. Seidel trabajó con R. Kickuth en el desarrollo de un sistema de tratamiento conocido como "Root Zone Method", que operaba

con flujo subsuperficial horizontal, recurriendo al empleo de arcilla como sustrato filtrante. Años más tarde siguiendo las directrices del Max Planck Institute, se construyó en 1974, en una localidad alemana, el primer humedal artificial europeo a escala real. (Rodríguez et al. 2007).

El hecho de emplear, en los inicios de esta tecnología, como sustrato filtrante el propio suelo natural, provocó que un gran número de instalaciones construidas en los años 70 y 80 presentasen problemas operativos, como consecuencia de la colmatación de los sustratos, no cumpliéndose las expectativas propuestas. (Rodríguez et al. 2007).

La situación se invirtió a comienzos de los 80, al comenzar a emplearse como medios filtrantes gravillas y gravas, al objeto de garantizar la adecuada conductividad hidráulica y minimizar los riesgos de colmatación del sustrato, lo que condujo a un auge en la implantación de este tipo de tecnología. (Rodríguez et al. 2007).

En los últimos años se ha aumentado el interés en los humedales artificiales a nivel mundial, ya que poseen la propiedad de ser sistemas amortiguadores debido, entre otros aspectos, a la alta productividad de materia vegetal y microorganismos que inducen a la metabolización y conversión de compuestos orgánicos e inorgánicos, a su alta capacidad de retención y adsorción por medio de procesos tanto físicos, químicos y biológicos que le permiten remover eficientemente contaminantes de diverso origen (Prado, 1997). Estas características hacen de los humedales artificiales un atractivo tratamiento, que actualmente ha recibido mucha atención en la modalidad de investigación para uso con salidas altamente contaminantes, como son los lixiviados provenientes de vertederos (Martín. et ali., 1999)

Los humedales construidos han sido ampliamente usados en el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales, como alcantarillados, aguas lluvias, aguas residuales industriales, escorrentía agrícola, drenaje ácido de minas, y lixiviados de rellenos sanitarios. Como sistemas naturales de tratamiento han mostrado tener una capacidad significativa tanto para el tratamiento de aguas residuales como para la recuperación de recursos. (Yang, L., et al., 2001)

En cuanto a su empleo es remarcable que en las últimas décadas los sistemas naturales se han venido utilizando de forma creciente gracias a sus características de construcción y



funcionamiento: su coste de inversión suele ser competitivo, requieren de poco personal para su tratamiento, no presentan consumo energético o es muy reducido, y no generan grandes cantidades de lodos de forma continuada. (Noguera y Olivero. 2010)

En España se pueden diferenciar tres etapas en la forma de abordar el tratamiento de las aguas residuales en pequeños municipios. El primero, en la década de los 80, las tecnologías que se aplicaban en estos municipios eran las mismas que en los grandes municipios. Esto suponía unos requisitos técnicos y energéticos que dejaron fuera de servicio las instalaciones. En la década de los 80, se comenzó a aplicar diferentes sistemas de depuración natural, pero a causa de diseños inadecuados, deficiencias constructivas, etc., muchas de estas instalaciones no tuvieron éxito en sus resultados. En la actualidad, se empieza a tomar conciencia de que la depuración de pequeños municipios requiere un enfoque más exigentes, tanto desde el punto de vista técnico como el de la gestión, que da respuesta a los fracasos anteriores, presentando un abanico de posibilidades, todas ellas adecuadas según las características de cada municipio, el agua a tratar y las exigencias de vertido (Ferrer, Ortega y Salas, 2012).

A continuación se muestran ejemplos de sistemas de tratamiento de aguas mediante humedales artificiales actualmente en funcionamiento:

- EDAR en Silkrode, Alemania

La EDAR de Silkrode en Alemania fue construida entre 2006 y 2007. Se diseñó para 500 habitantes equivalentes con un caudal máximo día de  $94 \text{ m}^3$ . El agua a tratar discurre por la red separativa de la ciudad hasta una estación de bombeo frente a la planta de tratamiento de aguas residuales.

La EDAR está compuesta por un pretratamiento que cuenta con tanque de sedimentación ( $30 \text{ m}^2$ ) y un lecho para el almacenamiento de lodos ( $25 \text{ m}^3$ ). También cuenta con un sistema de distribución de las aguas a tratar que consta de un tanque de almacenamiento ( $20 \text{ m}^3$ ) para las bombas de distribución del agua con tubos de polietileno con agujeros elevados.



Figura 4 Celda del humedal de Silkerode. (Fuente: [www.blumberg-engineers.de](http://www.blumberg-engineers.de)).

El humedal artificial está compuesto por dos celdas hidráulicamente independientes con carga intermitente y ocupan un área total de 2160 m<sup>2</sup>.

Hasta el momento los datos de rendimiento de este humedal artificial se pueden ver en la Tabla 9.

Tabla 9. Datos del rendimiento de la planta de Silkerode. (Fuente: [www.blumberg-engineers.de](http://www.blumberg-engineers.de)).

	Entrada	Salida	Límite legal de descarga
<b>DQO (mg/l)</b>	654	31	150
<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	355	7	40
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (mg/l)</b>	77	3	Ninguno
<b>Ntot.</b>	n.d.	4	Ninguno
<b>Ptot</b>	11	0,2	Ninguno

- EDAR de Carrícola

Carrícola es un municipio de la Comunidad Valenciana perteneciente a la provincia de Valencia, en la comarca del Valle de Albaida que cuenta con una población de 95 habitantes (INE, 2016).

En el año 2014 se decidió poner en marcha un sistema de humedales artificiales, para la depuración de las aguas residuales municipales, debido al número reducido de habitantes en el municipio, la ausencia de polígonos industriales, su emplazamiento en un área de elevado interés ambiental y paisajístico (Paisaje protegido de la Umbría del Benicadell y el Paraje Natural Municipal de Les Arcades) y la firme concienciación ambiental por parte de la población del municipio. Si comparamos estos motivos con los del municipio de Arcos de las Salinas, podemos afirmar que ambos municipios parten de la misma base lo cual sirve para apoyar los beneficios que podría reportar la instalación de un sistema de humedales artificiales para la depuración de aguas residuales en Arcos de las Salinas.

El consumo energético de esta EDAR es muy reducido puesto que el agua circula por gravedad, mientras que el mantenimiento requerido es de unas pocas horas a la semana. Los resultados en el primer año de actividad (2014) cumplen con creces la normativa vigente, con DQO, DBO<sub>5</sub> y SST inferiores a 55 mg/L, 20 mg/L y 6mg/L, respectivamente para un caudal de unos 4.000 m<sup>3</sup>/año. La “ecodepuradora”, como ha sido bautizada por el municipio, es un ejemplo más en su línea de desarrollo sostenible (IIAMA, 2015).



Figura 5. EDAR del municipio de Carrícola. (Fuente: Boletín Nº 3 Febrero 2015 [www.iiama.upv.es](http://www.iiama.upv.es)).

El proceso de depuración de esta EDAR consta de 3 fases:

- Pretratamiento, que se realiza en un canal de desbaste con un filtro de rejas.
- Tratamiento primario, compuesto por dos tanques Imhoff en serie.
- Tratamiento secundario, mediante dos celdas en paralelo de flujo subsuperficial horizontal y seguidamente una celda de flujo subsuperficial vertical. Las tres celdas tienen una dimensión de 33 x 6 m y un calado de la lámina de agua de 40 cm en las celdas de flujo horizontal. La vegetación presente en estos humedales es el cañizo con una densidad de plantación de 3 plantas/m<sup>2</sup> (Blasco, 2011).

Esta EDAR, según datos de 2016 (EPSAR), opera con un caudal de 12 m<sup>3</sup>/d, dando servicio a 55 habitantes equivalentes. Por otro lado, los rendimientos observados son: 97% para sólidos suspendidos, 96% para DBO<sub>5</sub> y del 85% para la DQO.

En la siguiente figura se puede observar el esquema de la EDAR:

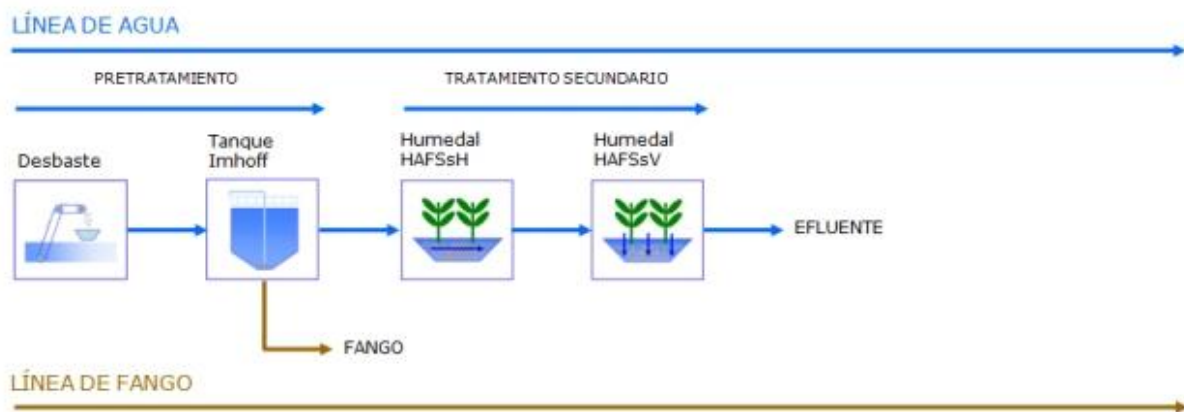


Figura 6. Diagrama de bloques EDAR de Carrícola. (Fuente: [www.epsar.gva.es](http://www.epsar.gva.es))

- El tancat de Milia

El Parque Natural de La Albufera, se encuentra a 10 km al sur de Valencia. Tiene un gran valor ecológico al tratarse de un hábitat para especies en extinción como el fartet y el samaruc y cabe destacar que es una de las pocas albuferas en la Comunidad Valenciana que se encuentran en un estado relativamente aceptable. Debido a la gran presión urbanística y recreativa se encuentra contaminada con una alta carga de contaminación orgánica. Por esto, con la intención de reducir esta se diseñaron tres humedales artificiales dentro del

parque aprovechando antiguos arrozales: El Tancat de l'Illa, el Tancat de la Pipa, y el tancat de Milia. En ellos se introduce agua del lago para tratarla y posteriormente devolverla al mismo, e incluso, en algunos casos funciona como tratamiento posterior de las EDARs, de esta forma se consigue mejorar la calidad del agua de la laguna y además recrea los ecosistemas naturales.

El Tancat de Milia, que cuenta con una superficie de 450.000m<sup>2</sup>, se encuentra en el término municipal de Sollana. Comenzó su funcionamiento en el año 2012, promovido por el Ministerio de Medio Ambiente, mediante la empresa pública AcuaMed, en el marco del programa A.G.U.A. Albufera, actualmente es gestionado por la Fundación Global Nature. En la siguiente ilustración se presenta la localización del Tancat de Milia.

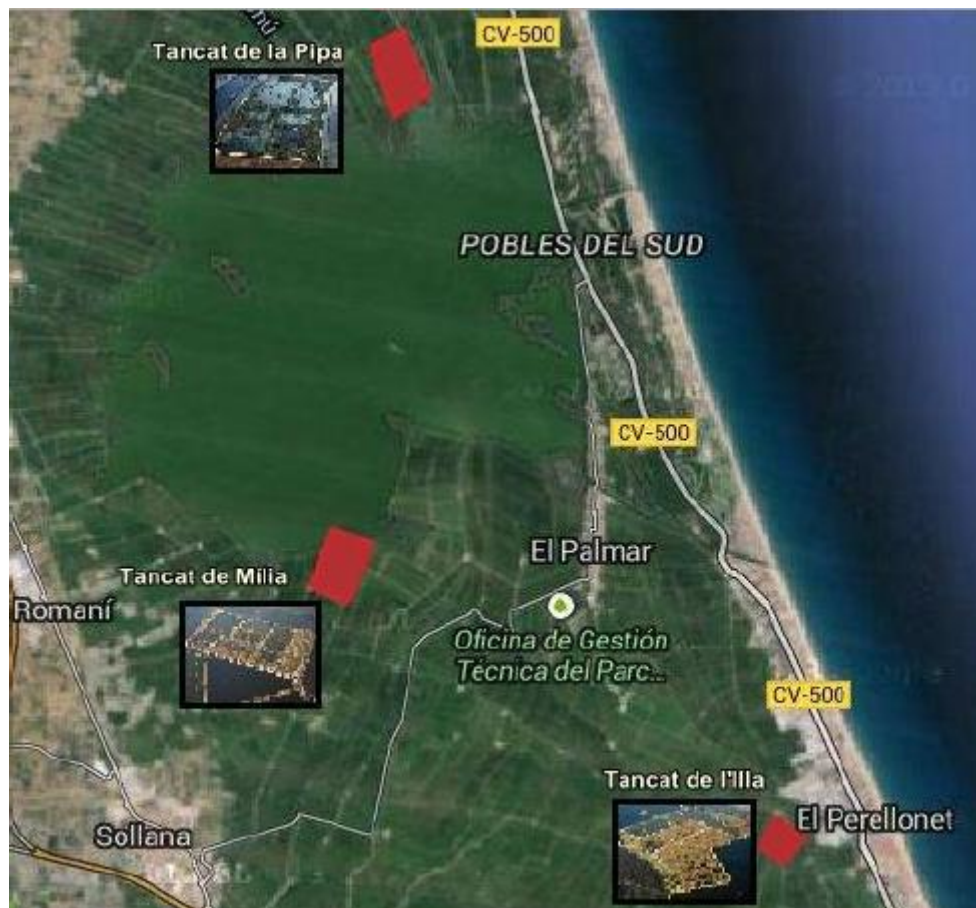


Figura 7. Situación de los tres humedales artificiales en la Albufera. (Fuente: Peris, 2016).

El objetivo del diseño del Tancat de Milia es el de tratar el efluente de la EDAR de Albufera Sur antes de llegar a la laguna y además tratar las aguas de la propia laguna (actualmente solo trata las aguas de la propia laguna), favoreciendo el desarrollo de la vegetación sumergida y recrear el hábitat natural como reserva de flora y fauna ([www.tancatdemilia.org](http://www.tancatdemilia.org)). Además se

planteó en el Tancat de Milia un espacio reservado a la educación ambiental y difusión de estos tipos de sistemas. Algo que se podría plantear en el municipio de Arcos de las Salinas para acercar esta tecnología a otros municipios de los alrededores que se encuentren en casos similares.

El Tancat de Milia cuenta con tres sectores diferenciados:

- Sector 1: Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial de Flujo Horizontal

En una superficie de 4,5 hectáreas dividida en 18 celdas separadas por caminos perimetrales encontramos un sector formado por una capa de 30 cm de arcilla y una lámina de geotextil para la impermeabilización de la base, encima se encuentra un lecho de grava de 50 cm protegido por una lámina geotectirl para impedir la obturación de las gravas y finalmente 10 cm de una capa de tierra vegetal.

En este sector la vegetación es de cañizo y de eneas ocupando la mitad de la parcela con una densidad de 3 plantas/m<sup>2</sup>.

- Sector 2: Humedales Artificiales de Flujo Superficial

Con una superficie mayor que el anterior, 18 hectáreas, este sector esta dividido en dos subsectores en serie, con 3 celdas cada subsector. La diferencia principal con el sector A es que no cuenta con un lecho de grava y el agua con un calado de entre 30 y 50 cm circula libremente, alternando superficies de lámina libre con superficies vegetadas.

En este sector la vegetación es igual a la del sector anterior variando únicamente, su densidad según la época del año.

- Sector 3: Laguna

La superficie de este sector es de 10 hectáreas en una laguna con dos islas, creando un hábitat para la nidificación de aves. Este hábitat recrea el natural para conseguir el desarrollo de la vegetación propia del lago en condiciones normales, es decir, con una baja carga de nutrientes.

El calado de la lámina de agua es de entre 20 y 80 cm, y se encuentra revegetada por especies de álamo, sauce blanco, tamarisco, totoras, juncos...

En la siguiente figura se pueden observar claramente diferenciados estos tres sectores:



Figura 8. Tancat de Milia. (Fuente: [www.tancatdemilia.org](http://www.tancatdemilia.org)).

### 3.5. Ventajas e inconvenientes de los humedales artificiales.

#### 3.5.1. *Ventajas.*

Algunas de las ventajas más importantes de un humedal artificial son (Nuevo, 2016):

- Consumo energético nulo o muy bajo, debido a que el proceso de depuración lo realizan las plantas.
- Reducción del impacto ambiental, se integra en el medio sustituyendo los edificios y máquinas por una plantación de macrofitas.
- Disminución de olores, al no estar expuestas al aire a tratar en los humedales de flujo subsuperficial, y los humedales de flujo superficial al alimentarse con efluentes ya depurados.

- Facilidad de explotación: se reducen las averías al carecer de equipos mecánicos, y la operación es menos complicada, menos peligrosa, y requiere menos medios para mantenerla en su punto óptimo.
- Programa de mantenimiento más sencillo y fácil de seguir.
- En los HAFSs se simplifica la gestión de los lodos que se generan en el proceso depurador, al procederse a su purga en las fosas sépticas o tanque Imhoff, tras largos periodos de tiempo.

### 3.5.2. Inconvenientes.

Como principales inconvenientes se pueden citar (Nuevo, 2016):

- Tarda más tiempo en lograr el régimen óptimo de funcionamiento. Dado que es un sistema natural que necesita que las plantas adquieran un grado de madurez. Aunque existen experiencias que muestran un buen funcionamiento desde el inicio.
- Un mantenimiento insuficiente en los humedales de flujo subsuperficial conlleva problemas de colmatación de sustrato.
- Requiere una superficie mayor que los sistemas de depuración convencionales.
- Requiere grandes conocimientos en el diseño, porque después tiene pocas posibilidades de regulación en la operación de la estación depuradora.
- Las plantas pueden ser alimento de ciertos animales, por lo que se debe controlar que no accedan al interior de la parcela.



#### 4. Marco legislativo.

Como se ha expuesto en el primer apartado, es importante realizar una recopilación y análisis de la normativa vigente relacionada con el saneamiento y tratamiento de las aguas residuales urbanas. Entre las normativas analizadas, son importantes para la comprensión de este proyecto la *Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas*; la *Directiva 98/15/CE de la Comisión, de 27 de febrero de 1998, por la que se modifica la Directiva 91/271/CEE del Consejo en relación con determinados requisitos establecidos en su anexo I*, cuya trasposición al Derecho español está contenida en el *Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas*.

De forma resumida, la Directiva establece dos obligaciones claramente diferenciadas, en primer lugar las “aglomeraciones urbanas” deberán disponer, según los casos, de sistemas de colectores para la recogida y conducción de las aguas residuales y, en segundo lugar, se prevén distintos tratamientos a los que deberán someterse dichas aguas antes de su vertido a las aguas continentales o marinas. En la determinación de los tratamientos a que deberán someterse las aguas residuales antes de su vertido, se tiene en cuenta las características del emplazamiento donde se producen. De acuerdo con esto, los tratamientos serán más o menos rigurosos según se efectúen en zonas calificadas como “sensibles”, “menos sensibles” o “normales”.

En cuanto a los vertidos urbanos correspondientes a instalaciones de depuración inferiores a 2.000 h-e, la legislación determina que deberán recibir un “tratamiento adecuado”. En este caso no se concreta el tipo de tratamiento ni límites de vertido asociados, solamente se exige que las aguas receptoras cumplan después del vertido los objetivos de calidad por usos y normas de calidad ambiental previstas para el medio receptor. Por ello se considera necesario que en Arcos de las Salinas exista un tratamiento de las aguas que evite el vertido directo al río Arcos.



El término municipal de Arcos de las Salinas tiene una superficie de 112,99 km<sup>2</sup> y sus límites municipales, como se puede observar en la Figura 10, son los siguientes:

- Por el norte, limita con Camarena de la Sierra, La Puebla de Valverde (Teruel) y con la Puebla de San Miguel (Valencia).
- Por el este, limita con Torrijas (Teruel)
- Por el sur, limita con Alpuente y Aras de los Olmos (Valencia)
- Por el oeste, limita con Santa Cruz de Moya (Cuenca)

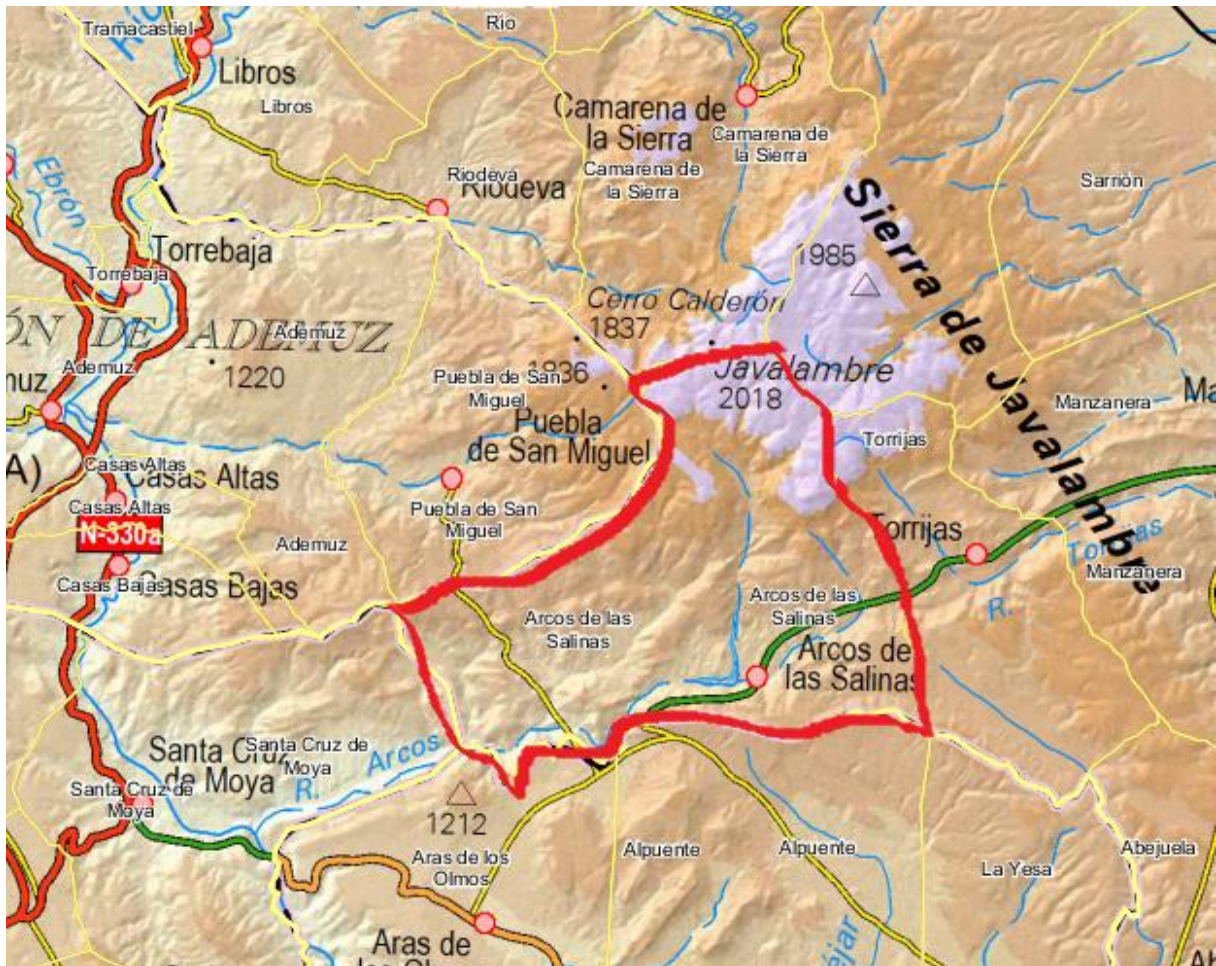


Figura 10 Mapa de los límites de Arcos de las Salinas. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional).

## 5.2. Demografía.

La población empadronada en el municipio de Arcos de las Salinas es de 106 habitantes. El municipio cuenta con una población muy reducida con tendencia decreciente en los últimos 20 años a pesar de pequeños repuntes en los últimos siete años.

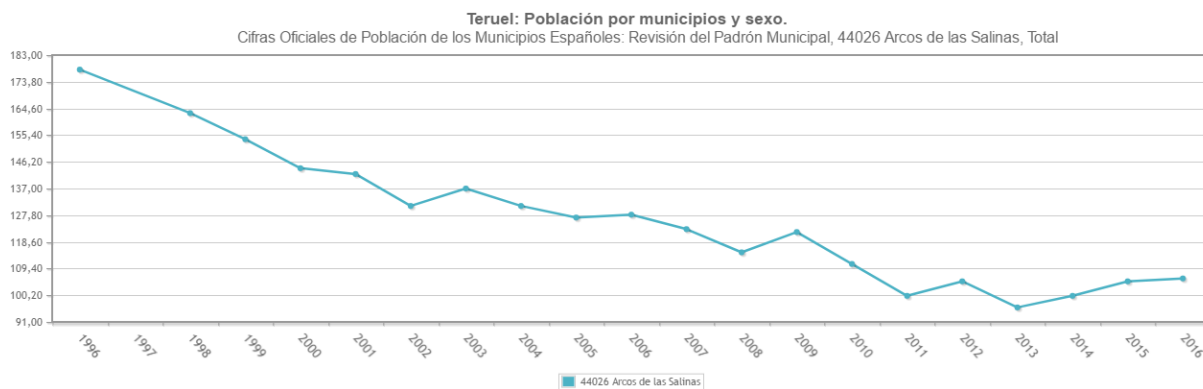


Figura 11. Evolución de la población. (Fuente: INE).

Es muy importante prestar atención al apartado de la demografía para el diseño de este humedal. A pesar de que el censo indique esta población de 106 habitantes, existe una asociación cultural en el municipio (Asociación Cultura La Sabina) cuyo censo de socios supera el millar. Esto quiere decir que durante periodos festivos la población en el municipio podría llegar a superar los mil habitantes.

## 5.3. Climatología.

Según afirma el Atlas Climático Ibérico, Teruel, es una de las regiones en las que el número de días al año con temperatura inferior o igual a 0°C llega a superar los 100 días. En la Figura 12 que representa la temperatura media anual del aire podemos comprobar que la media se sitúa entorno los 10°C. Por otro lado en la Figura 13 se observa como la temperatura media mínima anual es de 2,5°C.

Estos datos, extraídos a partir de los mapas, son muy importantes para el diseño del humedal ya que, los procesos biológicos depende mucho de las temperaturas. Temperaturas muy bajas limitan o anulan el crecimiento de las bacterias por lo que se debe prestar mucha atención a elegir el diseño adecuado que evite la congelación del agua y que asegure temperaturas correctas para el desarrollo de las bacterias.

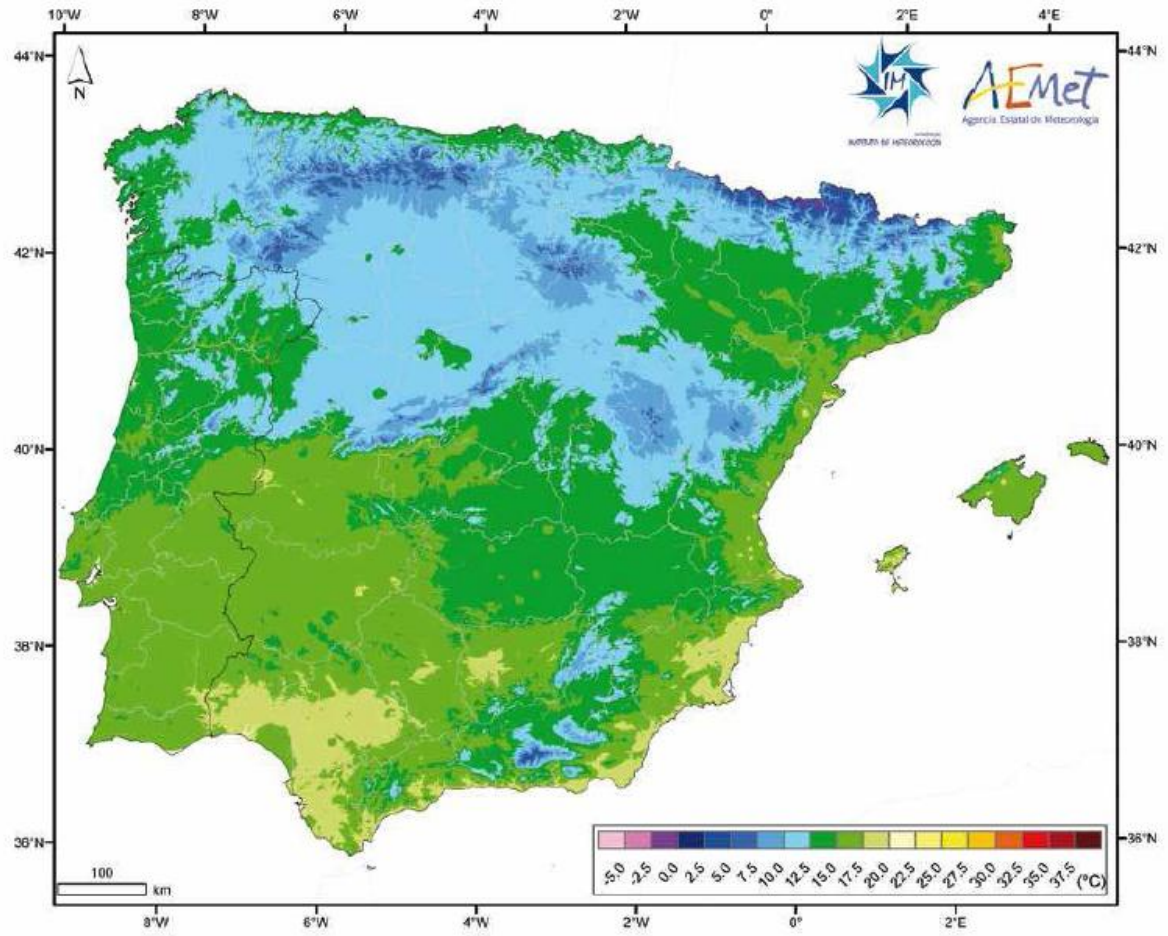


Figura 12. Temperatura media anual de la Península Ibérica y Baleares. (Fuente: Aemet).

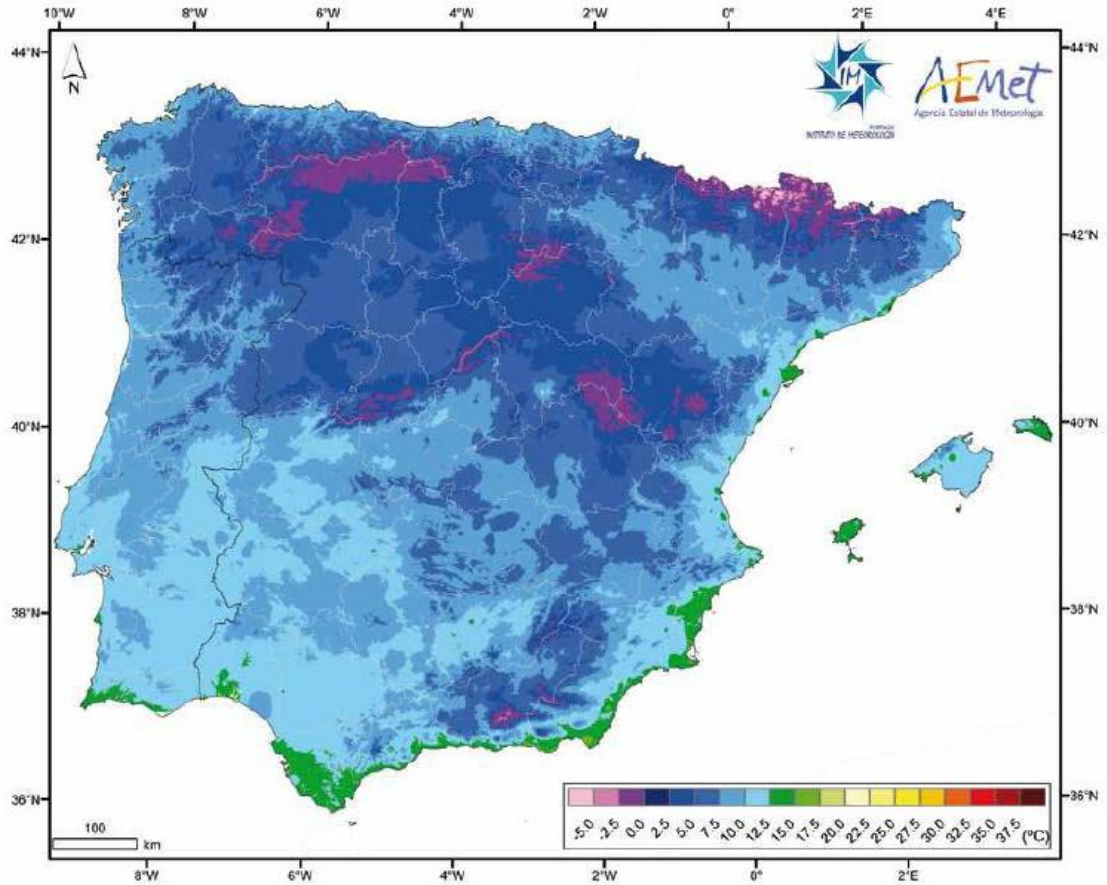


Figura 13. Temperatura media mínima anual.

En cuanto a la precipitación media mensual, a pesar de variar a lo largo de los años tiene una notable estacionalidad que es más fuerte en la mitad sur peninsular. El mes más lluvioso es el de Diciembre pero, aun así algunas zonas de Teruel recogen los valores más bajos (entre 20 mm y 100mm) siendo la precipitación media mensual de 41 mm.

Como se puede apreciar en la Figura 14, el municipio aparece con la calificación Cfb según la clasificación de Köpper-Geiger, lo cual quiere decir que es un clima templado sin estación seca y con un verano templado.

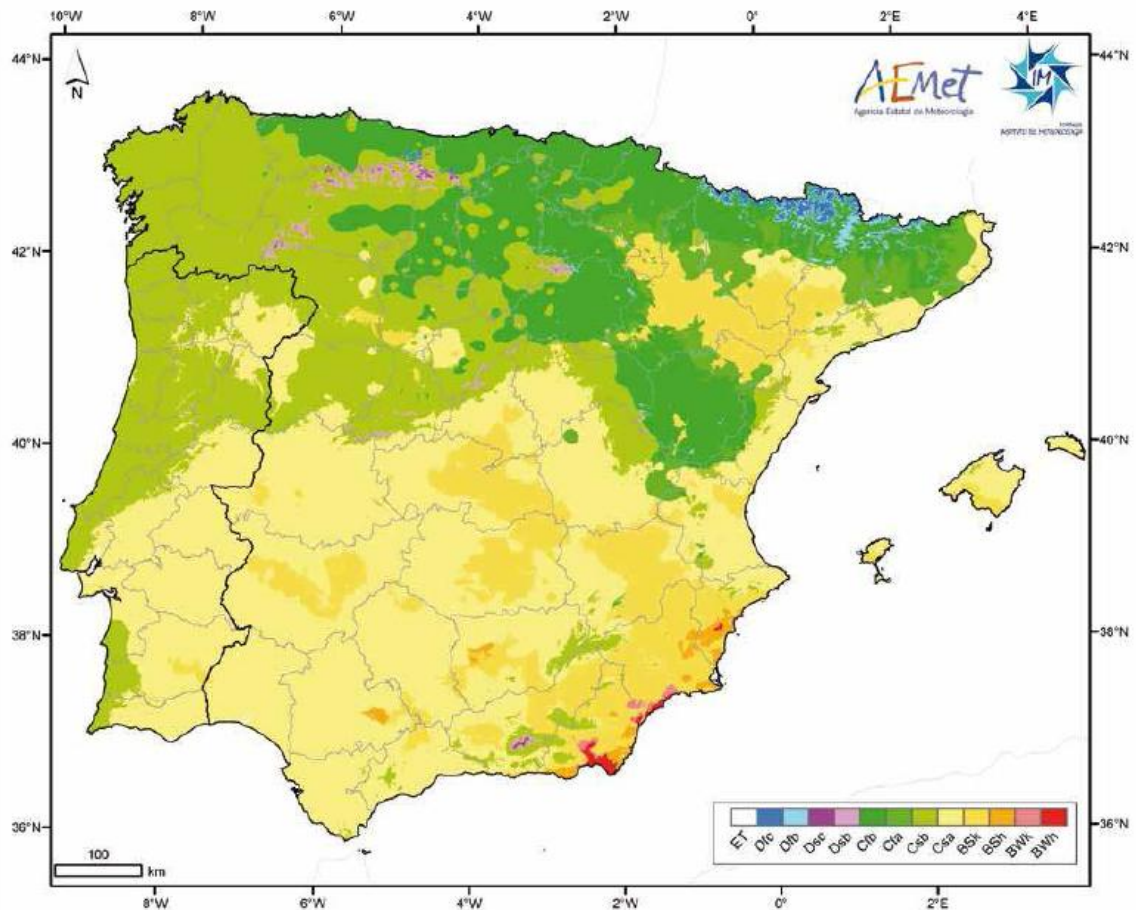


Figura 14 Clasificación climática de Köppen-Geiger en la Península Ibérica e Islas Baleares.

Que dentro de la clasificación sea Cfb significa:

- C: Clima templado, la temperatura media del mes más frío en este tipo de climas está comprendida entre 0 y 18°C.
- f: Sin estación seca
- b: Verano templado con temperatura media del mes más cálido igual o menor a 22°C y con cuatro meses o más con una temperatura media superior a 10°C.

#### 5.4. Ecología

Entre las especies a destacar en el municipio de Arcos de las Salinas se encuentran las grandes aves rapaces: águila real (águila chrysaetos), el águila calzada (hieratus pennatus) y el buitre leonado (gyps fulvus).

En cuanto a las rapaces nocturnas están presentes el búho real (*bubo bubo*), el autillo (*otus scops*) y el cárabo (*Strix aluco*).

Entre los grandes mamíferos están presentes los jabalíes (*Sus scrofa*), las cabras montés (*Capra pyrenica*) y el corzo (*Capreolus capreolus*).

Por lo que respecta a los mamíferos predadores de mediana talla destacan el zorro (*Vulpes vulpes*) y el Visón americano (*Mustela vison*) especie que se escapó de una granja peletera en el municipio de Sarrión y rápidamente colonizó el hábitat.

A pesar de que los medios acuáticos representan una parte mínima de la región es donde hay mayor concentración de vida animal.

Aquí es posible encontrar la trucha común (*salmo trutta*), el barbo levantino (*Barbus guireanoides*) y en las zonas donde apenas se ha transformado el entorno por la mano del hombre es posible encontrar mirlo acuático (*Cinclus cinclus*) y en pequeños arroyos el cangrejo común (*Austropotamobius pallipes*). En cuanto a las especies invasoras destaca la presencia de la trucha arco-iris (*Oncorhynchus*).

En cuanto a los anfibios es fácil encontrar en zonas húmedas de bosque y arrollo, sapillos moteados (*Pelodytes punctatus*) y el pintojo (*Discoglossus pictus*).

Respecto a la vegetación de ribera que es la que más atañe a este proyecto según fuentes del CEDEX la vegetación natural de la zona es el pinar carrasco, encontrando en la primera banda que domina la chopera. Es posible también encontrar fresnos, sauces y tarayes.

La creación del humedal artificial sugiere que habrá un aumento de anfibios en la zona de implantación, una mejora de calidad en el agua del río que puede hacer que empiece a aumentar la población de cangrejo de río y el número de mamífero de la zona. En cuanto a la vegetación es posible que aumente el número de especies que no abundan tanto en la ribera como el fresno y el sauce.



## 6. Dimensionamiento del sistema de tratamiento.

### 6.1. Caudales de entrada.

El efluente que tratará el humedal artificial vendrá de la red de colectores del municipio, una red unitaria. Al ser un pequeño municipio que no dispone de un sistema de depuración no existe un registro de datos en el que se puedan encontrar las características del agua. Por tanto en este trabajo se ha optado por realizar el diseño según los parámetros más comunes en pequeñas poblaciones.

La población de diseño es de 200 habitantes con una dotación de 150 L/hab·día. Cuando no se dispone ni de campañas de aforo ni de datos de consumo de agua de abastecimiento se pueden usar valores de producción de agua residual por habitante. Estos valores se pueden obtener de estudios en los que se evalúa de forma estadística un número representativo de campañas de aforo de una determinada zona de tamaño poblacional similar. Por ejemplo, Barrera (1999) evaluó los datos de 45 núcleos de Catalunya encontrando una dotación media de agua residual de 150 L/hab·día. El 72% de los valores de dotación quedaron en un rango de 80-250 L/hab·día. Si bien es cierto que es una dotación reducida esto se debe a que no existe industria alguna en el municipio. También hay que tener en cuenta que en Arcos de las Salinas no se paga por metro cúbico consumido. -Este hecho puede hacer que el consumo por habitante sea algo mayor pero este punto se tratará más adelante.

El caudal medio diario se determina:

$$Q_{med,d} = \frac{\beta \cdot P \cdot D}{1000} \quad 1$$

Donde:

$Q_{med,d}$  el caudal medio diario, en m<sup>3</sup>/día.

P la población, en habitantes.

D la dotación, en L/hab·día.

B la cantidad de agua de abastecimiento que se convierte en agua residual, expresada en tanto por uno. En este caso como no se supone una reducción del agua se tomará por valor la unidad.

$$Q_{med,d} = \frac{1 \cdot 200 \cdot 150}{1000} = 200 \text{ m}^3/\text{día}$$

El caudal medio horario se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Q_{med,h} = \frac{Q_{med,d}}{24} \quad [2]$$

Donde:

Por lo tanto el caudal medio horario será de:

$$Q_{med,h} = \frac{30}{24} = 1.25 \text{ m}^3/\text{h}$$

$Q_{med,h}$  el caudal medio horario, en  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Para el cálculo del caudal punta es necesario obtener primero el coeficiente punta pues, los caudales de las aguas residuales tienen una gran variedad horaria, diaria y mensual. A partir de campañas de aforo suficientemente extensas (realizadas con sonda de radar) se pueden estimar los caudales punta. Pero a pesar de que estas variaciones deben ser cuantificadas para el diseño del tratamiento este tipo de campañas no suele ser lo suficientemente largas y es necesario la utilización de coeficientes punta tabulados o también conocidos como factores pico.

Este coeficiente es la relación entre la media de los caudales punta (máximos y mínimos) y el caudal medio. Los coeficientes punta varían según el intervalo de tiempo al que van referidos y se pueden definir como horarios, diarios o mensuales.

Así pues, el caudal punta diario se determina:

$$Q_{pta,d} = C_{pta,d} \cdot Q_{med,d} \quad 3$$

Donde:

$C_{pta,d}$  el coeficiente punta diario, adimensional.

Este coeficiente se puede obtener de la siguiente tabla:

Tabla 10. Valores recomendados de coeficientes punta para pequeñas comunidades. (Fuente: Uhl, M y Dittmer, U. (2005). Constructed wetlands for combined sewer overflow treatment).

Parámetro	Intervalo	Valor típico
<b>Coeficiente punta diario</b>	1,2-2,0	1,7
<b>Coeficiente punta mensual</b>	1,0-1,5	1,2

En nuestro caso de estudio, se ha tomado como coeficiente punta diario el valor de 2 para estar del lado de la seguridad, ya que la red de saneamiento es corta y podría no laminar en gran medida las puntas de caudal. Por tanto el valor para el caudal punta diario viene dado por la expresión [3] anterior:

$$Q_{pta,d} = 2 \cdot 30 = 60 \text{ m}^3/\text{día}$$

Para el caso del coeficiente punta horario ( $C_{pta,h}$ ) se puede obtener de la expresión de Mara (1988):

$$C_{pta,h} = \frac{5}{P^{1/6}} \quad 4$$

Donde:

P población en miles de habitantes.

Por lo tanto el coeficiente punta horario para este caso es de:

$$C_{pta,h} = \frac{5}{0.2^{1/6}} = 6.54$$

## 6.2. Aliviadero.

El aliviadero es una estructura de gran importancia en cualquier tipo de planta de tratamiento que trate aguas de redes de alcantarillado unitarias ya que evita la sobrecarga de caudal en estas instalaciones. Habitualmente consiste en una arqueta de planta rectangular en la que a cierta altura de agua, toda aquella fracción de caudal cuya lámina supere dicha altura es separada y vertida directamente a un canal paralelo al de desbaste o en este caso directamente al río. Actualmente, hay una tendencia creciente en muchos

países a hacer pasar estas aguas por humedales construidos especialmente para retener los contaminantes arrastrados por las primeras aguas de lluvia (Uhl y Dittmer, 2005).

El dimensionamiento del aliviadero está basado en que el agua residual esté tan diluida que la concentración de los contaminantes será similar a la que tendría si fuese tratada. Es decir, el aliviadero se diseña de forma que cuando el caudal medio horario que llega para ser depurado se supera 10 veces empiece a actuar. De este modo el caudal a evacuar por el aliviadero es:

$$Q_v = Q_{lluv} - 10 \cdot Q_{med,d} \quad 5$$

Donde,

$Q_v$  el caudal de vertido que debe evacuar el aliviadero, en  $m^3/s$

$Q_{lluv}$  el caudal de lluvia + agua residual que llega a la instalación, en  $m^3/s$

Entonces utilizando la expresión anterior se obtiene que el caudal que debe evacuar el aliviadero es de:

$$Q_v = 0,1 - 10 \cdot 3,47 \cdot 10^{-4} = 0,0997 \text{ m}^3/s$$

Una vez conocido el caudal a aliviar por el vertedero se puede dimensionar la altura del vertedero y la longitud del mismo.

La altura del aliviadero se calcula tanto para el caudal de lluvia más alto como para el caudal máximo instantáneo, y se suele considerar una velocidad del agua cuando ocurren estos dos caudales simultáneamente de 0,9 m/s. Esta altura viene dada por la expresión:

$$\frac{Q(m^3/s)}{vel\left(\frac{m}{s}\right) \cdot b(m)} = P(m) \quad 6$$

Donde,

P la altura de la lámina de agua, en metros.

B el ancho del canal, en metros.

Utilizando esta expresión se obtiene para la  $P_{máx,i}$ :

$$\frac{3'47 \cdot 10^{-3}}{0,9 \cdot 0,3} = 0,0129 \text{ m}$$

Y para  $P_{\text{lluvia}}$ :

$$\frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,9 \cdot 0,3} = 0,37 \text{ m}$$

El valor de la altura necesaria para evacuar el caudal de vertido (H) se obtiene de la diferencia entre  $P_{\text{lluvia}}$  y  $P_{\text{máx,i}}$ . Por lo tanto el valor de H es de 0,36 m.

A continuación para calcular la longitud del vertedero se necesita dividir el caudal a aliviar entre el caudal por metro lineal de vertedero. Éste último, se determina mediante la fórmula simplificada de Francis:

$$Q = 1,83 \cdot (1 - (0,2 \cdot H)) \cdot (H)^{1,5} \quad 7$$

Siendo,

Q el caudal por metro lineal, en  $m^3/m \cdot s$

H la altura de la lámina de agua sobre el vertedero en m.

Es importante que en el canal por el cual circule el agua excedente que posterior mente se verterá al río se coloque una reja con separación entre barrotes de 100mm cuya limpieza será manual.

Así pues el caudal por metro lineal calculado a partir de la expresión simplificada de Francis es:

$$Q = 1,83 \cdot (1 - (0,2 \cdot 0,36)) \cdot (0,36)^{1,5} = 0,36 \text{ m}^3/s \cdot m$$

Con este caudal la longitud de vertedero (L) se obtiene al dividir el caudal de vertido entre el caudal por metro lineal de vertedero:

$$\frac{0,0997}{0,36} = 0,27 \text{ m}$$

Se ha considerado una longitud de vertedero de 0,35 m, teniendo un margen de seguridad a la longitud calculada.

### 6.3. Pretratamiento.

#### 6.3.1. *Rejas.*

En este tipo de instalaciones el canal de desbaste es, generalmente, el primer proceso al que se somete el agua a tratar. Su función es la de eliminar los grandes sólidos mediante su intercepción con rejas. Estas, consisten en barras paralelas antepuestas al flujo, separadas uniformemente y se clasifican, según el tamaño de paso entre barrotes, en (CEDEX, 2007<sup>a</sup>):

- Rejas de gruesos: el paso libre entre los barrotes es de 20 a 60 mm (valor normal entre 20 y 30 mm).
- Rejas de finos: el paso libre entre los barrotes es de 6 a 12 mm (valor normal 10 mm).

En función de cómo se realice su limpieza, las rejas de desbaste se clasifican en:

- Rejas de limpieza manual: van equipadas con un cestillo perforado para acumular los sólidos que son retirados de las rejas mediante el empleo de un rastrillo. El cestillo permite el escurrimiento al canal de desbaste del exceso de agua, de modo que cuando se retiran los residuos, para su disposición final, la cantidad de agua en ellos sea la mínima posible.
- Rejas de limpieza automática: incorporan un peine rascador que, periódicamente y de manera automática, limpia la reja. Este peine puede activarse mediante temporizador, al superarse cierto valor establecido de pérdida de carga, o mediante un sistema combinado de temporización y pérdida de carga.

El canal de desbaste se dimensiona con una anchura constante, siendo ésta seleccionada del valor mayor entre el necesario para las rejas y el calculado para el desarenador. En este caso, ya que no se instalará desarenador al no existir elementos mecánicos que puedan sufrir la erosión de las partículas y dado que se puede asumir la sedimentación que se pueda ocasionar en el canal el ancho del canal será el necesario para la instalación de las rejas. En la siguiente tabla aparecen los valores recomendados para el ancho de las rejas.

Tabla 11. Valores recomendados de los parámetros necesarios para el diseño de un canal de desbaste y sus respectivas rejillas. (Fuente: Metcalf and Eddy, 2003)

Características	Reja de Gruesos	Reja de Finos
<b>Modo de funcionamiento</b>	Manual	Automático
<b>Anchura de los barrotes (mm)</b>	>12	<6
<b>Luz entre barrotes (mm)</b>	50-100	10-25
<b>Pendiente en relación a la vertical (grados)</b>	20-45	
<b>Velocidad de aproximación (m/s)</b>	0,3-0,6	
<b>Pérdida de carga admisible (m)</b>	0,15	0,15

La velocidad de aproximación es la velocidad que tiene el agua residual en el canal donde se encuentran las rejillas.

Es importante como primer paso fijar un valor para el ancho de canal que se encuentre entre 0.2 y 2 m dependiendo del colector de entrada y luego determinar el ancho útil de paso con la siguiente expresión:

$$W_u = (A_c - n \cdot A_b) \cdot \left(1 - \frac{G}{100}\right) \quad 8$$

Siendo,

$W_u$  el ancho útil de paso, en m.

$A_c$  el ancho del canal, en m.

$N$  el número de barrotes.

$A_b$  el ancho de barrotes, en m.

$G$  el grado de colmatación, normalmente se utiliza un valor de 30%.

Para el diseño se ha optado por mantener el ancho de canal que existe en la zona del aliviadero (0.30 m) por lo tanto, manteniendo esta anchura y siguiendo los criterios de la Tabla 11 con barrotes de 15 mm de ancho y una separación de 50 mm al hacer el reparto se obtiene que son necesarios 5 barrotes. Si suponemos una colmatación del 30% y sustituimos en la expresión anterior el ancho útil es de:

$$W_u = (0.3 - 5 \cdot 0.015) \cdot \left(1 - \frac{30}{100}\right) = 0.16 \text{ m}$$

El calado necesario para un grado de colmatación determinado se obtiene de:

$$h = \frac{Q}{v} \cdot \frac{1}{W_u} \quad 9$$

Siendo,

h el calado, en m.

Q el caudal de paso, en m<sup>3</sup>/s.

v la velocidad de aproximación, en m/s.

Entonces, con el caudal máximo diario en m<sup>3</sup>/s, la velocidad de aproximación recomendada de la Tabla 11 y el ancho útil calculado anteriormente el calado resulta ser:

$$h = \frac{1,39 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{0.3 \text{ m/s}} \cdot \frac{1}{0.16 \text{ m}} = 0.03 \text{ m}$$

Se puede comprobar que la altura de la lámina de agua es bastante reducida, por lo tanto se mantiene en el diseño la altura del canal previo al aliviadero (0.40 m). Esquemáticamente en la siguiente imagen se puede apreciar los puntos calculados hasta el momento para el diseño de las rejillas



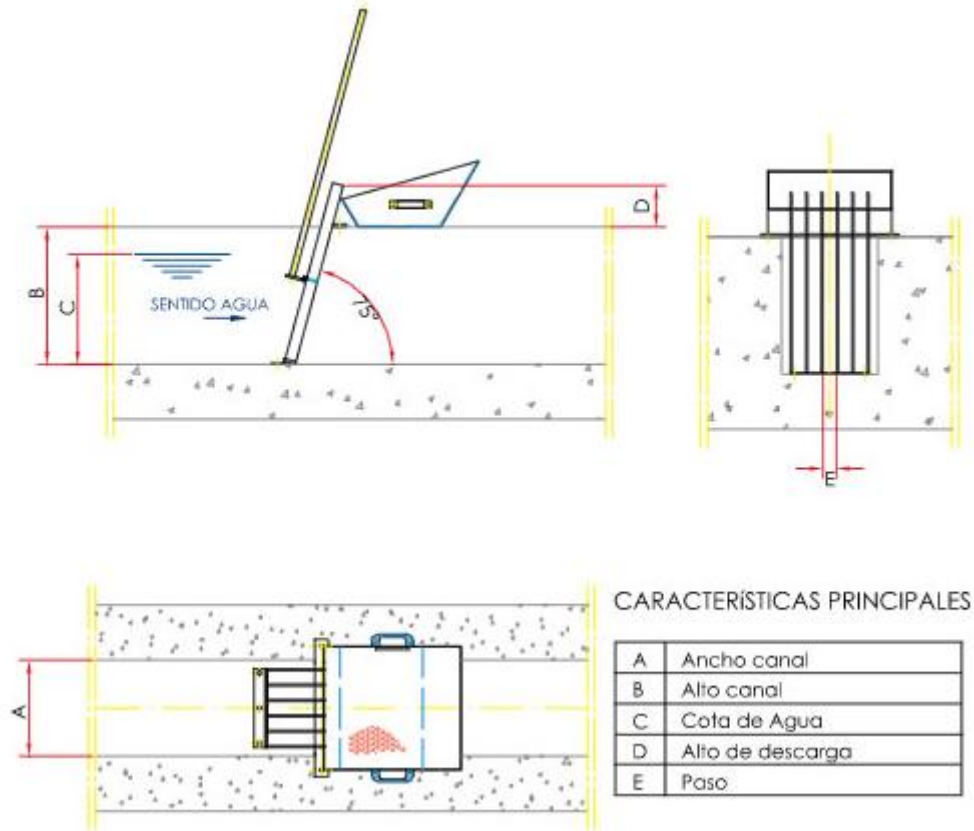


Figura 15. Parámetros de las rejillas. (Fuente: Handrake año).

Finalmente para completar el diseño de este apartado se requiere calcular la longitud del canal considerando la velocidad de aproximación del agua y el tiempo hidráulico, que suele ser de 5 a 15s. Para ello está la expresión:

$$L = T_H \cdot v \quad 10$$

Donde,

L es el largo del canal, en m.

$T_H$  es el tiempo de retención, en s.

V es la velocidad de aproximación del agua, en m/s.

Con un tiempo de retención de 5 segundos y una velocidad de aproximación de 0.3 m/s la longitud de canal necesaria resulta:

$$L = 5 \text{ s} \cdot 0.3 \text{ m/s} = 1.5 \text{ m}$$

Para ilustrar el trabajo de diseño realizado hasta este punto, en la siguiente imagen se pueden ver los elementos diseñados hasta el momento.

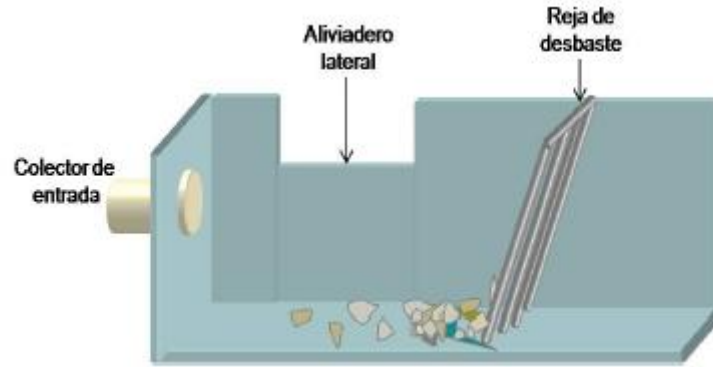


Imagen 1 Esquema de aliviadero y rejillas. Fuente: J. Garcia, A. Corzo (2008).

### 6.3.2. Tanque Imhoff.

En la siguiente tabla se muestran los valores recomendados de los parámetros de dimensionamiento de un tanque Imhoff (Crites, R. y Tchobanoglous, G.2000).

Tabla 12 Valores recomendados de los parámetros de dimensionamiento de un tanque imhoff.

Parámetro	Unidades	Rango	Valor usual
<b>Zona de decantación</b>			
Carga hidráulica superficial punta diaria	$m^3/m^2-d$	24-40	32
Tiempo de retención a $Q_{med}$	h	2-4	3
Tiempo de retención a $Q_{punta}$ horario	h	-	1
Velocidad horizontal punta horaria	m/min	-	<0,3
Relación longitud/ancho	-	2/1-5/1	3/1
Pendiente de la cámara de decantación	-	1,25:1,0-1,75:1,0	1,5:1,0
Obertura inferior	m	0,15-0,3	0,25
Pestaña inferior	m	0,15-0,3	0,25
Deflector debajo de la superficie	m	0,25-0,4	0,3
Deflector encima de la superficie	m	0,3	0,3
Resguardo	m	0,45-0,6	0,6
<b>Zona de escape de gases</b>			
Área (% de la superficie total)	%	15-30	20

<b>Anchura*</b>	m	0,45-0,75	0,6
<b>Zona de digestión</b>			
<b>Tiempo de digestión</b>	años	0,5-0,15	1,0
<b>Tasa de emisión unitaria de lodos</b>	l/hab-año	100-200	140
<b>Tubería de extracción de lodos</b>	m	0,2-0,3	0,25
<b>Distancia libre hasta el nivel del lodo</b>	m	0,3-0,9	0,6
<b>Profundidad total del agua en el tanque (desde la superficie hasta el fondo)</b>	m	7-9	9

\*la abertura mínima debe ser 0,45 m para permitir el acceso.

Para realizar el diseño del tanque Imhoff se deben considerar por separado las zonas de decantación y de digestión de las cuales, la primera, determina la superficie del tanque:

$$S = \frac{Q_{punta,d}}{L_{Hpunta,d}} \quad 11$$

Donde,

S la superficie de la zona de decantación, en m<sup>2</sup>.

Q<sub>puntad</sub> el caudal punta diario, en m<sup>3</sup>/d.

L<sub>Hpuntad</sub> la carga hidráulica superficial punta diaria, en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d.

Aunque en la Tabla 12 se recomienda valores de carga superficial en 24 y 40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d para estar del lado de la seguridad y asegurar un correcto funcionamiento se ha optado por tomar el valor de 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d. Además valores más altos darían por solución superficies muy pequeñas. De este modo, con este valor y con el caudal punta diario (calculado anteriormente), se obtiene que la superficie de la zona de decantación es de:

$$S = \frac{60 \text{ m}^3/d}{15 \text{ m}^3/m^2 \cdot d} = 4 \text{ m}^2$$

El siguiente paso ha sido determinar el ancho y el largo a partir de la relación entre ellos. Para este caso se ha decidido tomar una relación 4/1. Dando lugar a **una longitud (L) de 4 m y una anchura (W) de 1 m.**

De este modo para determinar la profundidad de la zona de decantación es necesario tener en cuenta que está basada en la geometría de un prisma de longitud igual a la anteriormente calculada, una altura de deflector establecida y una base de forma triangular, como se muestra en la Figura 16.

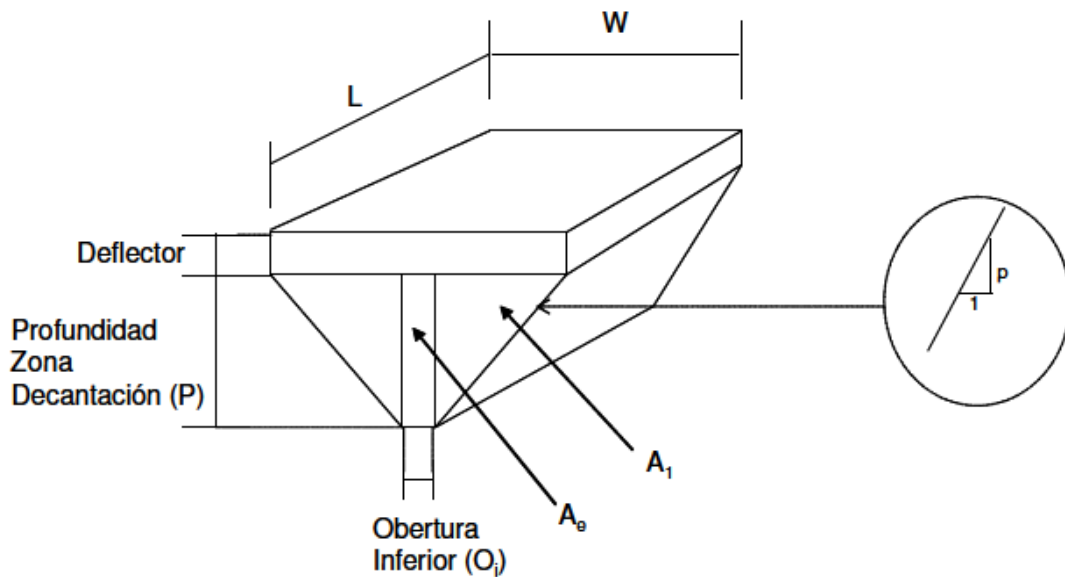


Figura 16. Esquema de la zona de decantación en un tanque Imhoff rectangular. (Fuente: J. García, A. Corzo, 2008).

Se ha tomado como valor para la pendiente de las paredes 1,75:1 y como valor de la abertura inferior 15 cm ambos valores dentro del rango de la Tabla 12. A partir de los cuales con las siguientes expresiones se obtienen la profundidad de decantación y las superficies del triángulo.

$$P = [(W - O_i)/2] \cdot p \quad 12$$

$$A_1 = [W - O_i/2] \cdot P/2 \quad 13$$

$$A_e = O_i \cdot P \quad 14$$

$$A_t = 2 \cdot A_1 \cdot A_e \quad 15$$

Siendo,

P la profundidad de la zona de decantación, en m.

O<sub>i</sub> la longitud de la abertura inferior, en m.

p la pendiente de la zona de decantación, en m/m.

A<sub>1</sub>, A<sub>e</sub>, y A<sub>t</sub> la superficie del triángulo, rectángulo y total, en m<sup>2</sup>.

Sustituyendo en cada una de las formulas se obtiene:

$$P = [(1 - 0,15)/2] \cdot 1,75 = 0,75 \text{ m} \quad A_1 = [(1 - 0,15)/2] \cdot \frac{0,75}{2} = 0,16 \text{ m}^2$$

$$A_e = 0,15 \cdot 0,75 = 0,113 \text{ m}^2 \quad A_t = 2 \cdot 0,16 \cdot 0,113 = 0,43 \text{ m}^2$$

El volumen de decantación es el volumen del prisma que viene dado por la fórmula:

$$V_{dec} = (h_{deflector} \cdot S) + (A_t \cdot L) \quad 16$$

Siendo,

V<sub>dec</sub> el volumen de la zona de decantación, en m<sup>3</sup>.

h<sub>deflector</sub> la altura de la zona sumergida del deflector, en m.

Según los valores de la Tabla 12 se ha optado por tomar 0,30 m como altura del deflector.

Dando lugar a un volumen de:

$$V_{dec} = (0,3 \cdot 4) + (0,43 \cdot 4) = 2,92 \text{ m}^3$$

Para validar el diseño ha sido necesario comprobar que:

$$v_{punta} = \frac{Q_{punta,h}}{A_t \cdot 60} < 0,3 \quad 17$$

$$2 < T_H = \frac{V_{dec} \cdot 24}{Q} < 4 \quad 18$$

Donde,

$V_{punta,h}$  la velocidad horizontal punta horaria, en m/min.

$Q_{punta,h}$  el caudal punta horario, en m<sup>3</sup>/h.

$T_H$  el tiempo de retención medio, en h.

$Q$  el caudal medio, en m<sup>3</sup>/día.

De las expresiones anteriores se obtiene:

$$v_{punta} = \frac{8,25}{0,43 \cdot 60} = 0,3 \text{ m/min} \quad T_H = \frac{2,93 \cdot 24}{30} = 2,34h$$

Como el valor de la velocidad horizontal está muy próximo al límite la solución propuesta ha sido aumentar  $O_i$  y  $P$  a 0,20 m y 0,80 m respectivamente, reduciendo así la velocidad punta.

Por otra parte está el diseño de la zona de digestión. Cuya superficie se corresponde con la total del tanque, siendo esta última igual a la suma de la superficie de la zona de decantación más la zona de escape de gases:

$$S_t = (1 + \%S_{gas}) \cdot S_{dec} \quad 19$$

Donde,

$S_t$  la superficie total del tanque, en m<sup>2</sup>.

$\% S_{gas}$  porcentaje de la superficie de la zona de escape de gases respecto la superficie total, en tanto por uno.

$S_{dec}$  la superficie de la zona de decantación, en m<sup>2</sup>.

Se ha decidido tomar el valor de 30% para la zona de escape de gases según recomienda la Tabla 12.

Dando lugar a una superficie total de:

$$S_t = (1 + 0,3) \cdot 4 = 5,20 \text{ m}^2$$

El cálculo del ancho total corresponde al cociente entre la superficie total y la longitud anteriormente diseñada, por lo cual el cálculo del ancho de la zona de gases es inmediato:

$$W_t = \frac{S_t}{L} \quad 20$$

$$W_{gas} = W_t - W_{dec} \quad 21$$

Donde,

$W_t$  el ancho total del tanque, en m.

$W_{dec}$  el ancho de la zona de decantación, en m.

$W_{gas}$  el ancho de la zona de escape de gases, en m.

L, la longitud del tanque, en m.

$S_t$ , superficie total del tanque.

Cuyos resultados tomando como ancho 0,60 m recomendado en la Tabla 12 son:

$$W_t = \frac{5,20}{4} = 1,30 \text{ m} \quad W_{gas} = 1,30 - 1 = 0,30 \text{ m}$$

Como el valor para el ancho de escape de gases no cumple, se ha aumentado hasta 0,45 m, si tenemos en cuenta que las zonas se separarán mediante un tabicón de ladrillo de 0,10 m de ancho, la anchura total será de:

$$W_t = 2 \cdot 0,45 + 2 \cdot 0,10 + 1,00 = 2,10 \text{ m}$$

El siguiente paso es calcular el volumen necesario en el tanque para poder almacenar los lodos:

$$V_{lodos} = \frac{VEU \cdot T_d \cdot N}{1000}$$

Donde,

$V_{lodos}$  el volumen ocupado por los lodos, en  $m^3$ .





Valores calculados anteriormente:

$H_{\text{prof canal dec}} = 0.75 \text{ m.}$

$H_d$  (que se dobla por seguridad para evitar reboses)  $2 \cdot 0.30 = 0.60 \text{ m.}$

Por último el valor que se obtiene de un nuevo cálculo es  $H_2$  que se obtiene del cociente de la diferencia entre el volumen total de los fangos producidos y el volumen del prisma triangular del fondo del depósito entre la superficie del depósito.

Esto da un valor para  $H_2$  de:

$$H_2 = \frac{28 - \frac{0.7 \cdot 2.4}{2} \cdot 4}{2.4 \cdot 4} = 2.57 \cong 2.60 \text{ m.}$$

De este modo sumando todas las alturas se obtiene que la altura total de tanque Imhoff es de **5.50 m.**

### 6.3.3. Fosa séptica con volumen variable.

Para que los tiempos de retención hidráulica no sean muy bajos en el tanque Imhoff, en los periodos de mayor población, se opta como solución la de colocar una fosa séptica en paralelo al tanque Imhoff. Esta fosa séptica laminará los caudales con capacidad de almacenar el volumen de agua residual generado por 500 habitantes durante dos días suponiendo que generan un caudal por habitante de 150 L.

Esta fosa séptica con volumen variable se irá llenando y poseerá una abertura circular en el medio de su altura de unos 5cm de diámetro por la que saldrá un caudal continuamente asegurando que ha tenido un tiempo de residencia adecuado. Este caudal dependerá de la altura almacenada en la fosa séptica (Bernuilli) cuanto mayor calado haya en la fosa mayor caudal habrá de salida, hasta el punto de llegar a la altura máxima de la fosa donde habrá un rebosadero.

En primer lugar el volumen total de la fosa séptica es de:

$$V = hab \cdot hab/l \cdot día \cdot días = \frac{500 \cdot 150 \cdot 2}{1000} = 150m^3 \quad 22$$

Donde,

V es el volumen, en m<sup>3</sup>.

Una dimensión adecuada sería de 5 metros de ancho por 6 de largo y 5m de profundidad situando la abertura en 2.5m de altura. Esta fosa séptica se ejecutará como cualquier otra con un tabique en medio que la separe en dos creando reteniendo de esta forma grasas y espumas en un compartimento decantador- digestor para después pasar a otro clarificador.

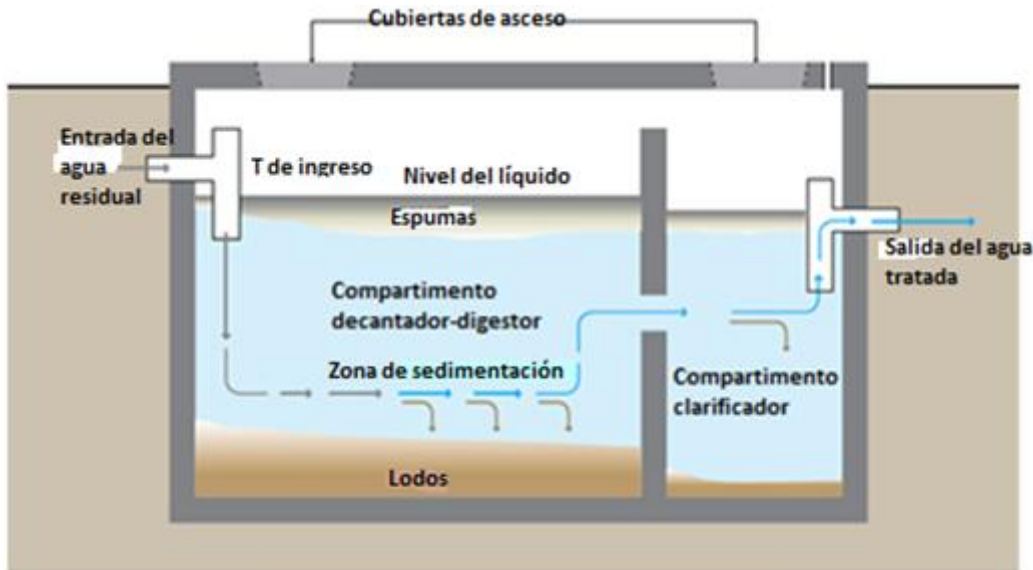


Figura 18. Fosa séptica. Fuente: M. M. Monerri

Como se puede observar en la imagen dispondrá de dos cubiertas de acceso y existe la posibilidad de integrar su superficie en el medio colocando vegetación en su superficie.

En cuanto a la salida de caudal aplicando las ecuaciones de continuidad y Bernoulli la velocidad de salida del flujo de la fosa séptica viene dado por la ecuación:

$$v = S_2 \sqrt{\frac{2g}{S_1^2 - S_2^2}} \cdot t \quad 23$$

Donde,

v es la velocidad de salida del flujo, en m/s.

S<sub>2</sub> es la superficie del orificio de salida, en m<sup>2</sup>.

S<sub>1</sub> es la superficie de la fosa séptica, en m<sup>2</sup>.

g es la gravedad, en m/s<sup>2</sup>.

t es el tiempo en s.

Con esta fórmula y estableciendo unos coeficientes de consumo horario del caudal ( $75 \text{ m}^3$ ) y suponiendo que la red de saneamiento es tan corta que no lámina el caudal que fluye por ella se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 13. Con los valores para los caudales de entrada y de salida en la fosa séptica y variación de calado por horas.

hora	Coficiente	Caudal de entrada ( $\text{m}^3$ )	h(cm)	velocidad salida (m/s)	Caudal de salida ( $\text{m}^3$ )
1	0.0081	0.607	250	0.00	0.000
2	0.0040	0.304	252	7.03	0.055
3	0.0040	0.304	253	7.05	0.055
4	0.0040	0.304	254	7.06	0.055
5	0.0040	0.304	255	7.07	0.056
6	0.0040	0.304	256	7.09	0.056
7	0.0162	1.215	257	7.10	0.056
8	0.0202	1.518	261	7.16	0.056
9	0.0405	3.036	266	7.23	0.057
10	0.0607	4.555	276	7.36	0.058
11	0.0810	6.073	291	7.56	0.059
12	0.1093	8.198	312	7.82	0.061
13	0.0729	5.466	339	8.16	0.064
14	0.0972	7.287	357	8.37	0.066
15	0.0810	6.073	382	8.65	0.068
16	0.0607	4.555	402	8.88	0.070
17	0.0405	3.036	417	9.05	0.071
18	0.0283	2.126	427	9.15	0.072
19	0.0283	2.126	434	9.23	0.072
20	0.0202	1.518	441	9.30	0.073
21	0.0405	3.036	446	9.36	0.073
22	0.0607	4.555	456	9.46	0.074
23	0.0729	5.466	472	9.62	0.076
24	0.0405	3.036	490	9.80	0.077
25	0.0081	0.607	500	9.90	0.078
26	0.0040	0.304	500	9.90	0.381
27	0.0040	0.304	500	9.90	0.381
28	0.0040	0.304	500	9.90	0.381
29	0.0040	0.304	500	9.90	0.381
30	0.0040	0.304	500	9.90	0.381
31	0.0162	1.215	500	9.90	1.292
32	0.0202	1.518	500	9.90	1.596
33	0.0405	3.036	500	9.90	3.114
34	0.0607	4.555	500	9.90	4.632

35	0.0810	6.073	500	9.90	6.151
36	0.1093	8.198	500	9.90	8.276
37	0.0729	5.466	500	9.90	5.543
38	0.0972	7.287	500	9.90	7.365
39	0.0810	6.073	500	9.90	6.151
40	0.0607	4.555	500	9.90	4.632
41	0.0405	3.036	500	9.90	3.114
42	0.0283	2.126	500	9.90	2.203
43	0.0283	2.126	500	9.90	2.203
44	0.0202	1.518	500	9.90	1.596
45	0.0405	3.036	500	9.90	3.114
46	0.0607	4.555	500	9.90	4.632
47	0.0729	5.466	500	9.90	5.543
48	0.0405	3.036	500	9.90	3.114

Para los cálculos se ha tomado una superficie del orificio de salida de 5 cm<sup>2</sup>. Nótese que la suma del coeficiente es de 2 dado que son los caudales aportados al sistema de dos días consecutivos.

#### 6.4. Dimensionamiento biológico.

Para realizar el dimensionamiento biológico se ha seguido la “*Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*” (García y Corzo, 2008). Esta guía, divide el dimensionamiento en dos partes: la primera, el dimensionamiento biológico y la segunda, el hidráulico. El primer paso es la obtención de las ecuaciones de diseño. Para ello se supone que los humedales se comportan como reactores de flujo ideal en pistón en los que los contaminantes se degradan siguiendo modelos cinéticos de primer orden (Brix, H. 1994). Por tanto el balance de masa para el contaminante es:

$$\frac{dC}{dt} = -k_v C \quad 24$$

Donde,

C la concentración del contaminante, en mg/L.

K<sub>v</sub> la constante de cinética de primer orden, en días<sup>-1</sup>. El signo negativo en la expresión indica que la concentración de contaminante disminuye a lo largo del tiempo.

Integrando la ecuación anterior entre la concentración inicial de contaminante o afluente ( $C_0$  para  $t=0$ ) y la final o efluente ( $C_1$  para  $t=t$ , siendo este último el tiempo medio de retención hidráulico, en días) se obtiene:

$$\frac{C_1}{C_0} = \exp(-k_v t) \quad 25$$

El tiempo medio de retención hidráulico es:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{\varepsilon \cdot S \cdot h}{Q} \quad 26$$

Donde,

V el volumen del humedal, en  $m^3$ .

Q el caudal medio, en  $m^3/d$ .

$\varepsilon$  la porosidad, en tanto por uno.

S la superficie del humedal, en  $m^2$ .

h la profundidad media del humedal, en m.

Sustituyendo t en las dos ecuaciones anteriores y definiendo una nueva constante cinética de primer orden ( $k_A$ , en m/d):

$$k_A = k_v \cdot \varepsilon \cdot h \quad 27$$

$$\frac{C_1}{C_0} = \exp(-k_A S/Q) \quad 28$$

Despejando S:

$$S = \frac{Q}{k_A} \ln \left[ \frac{C_0}{C_1} \right] \quad 29$$

Como recomiendan Garcia y Corzo esta es la ecuación de diseño recomendada para dimensionar la superficie de humedales de flujo horizontal. Los valores de Q y  $C_0$  se determinan a partir de los estudios de caracterización del afluente y el de  $C_1$  se define a

partir de los límites de vertido o los objetivos de calidad establecidos por la normativa ambiental vigente.

El valor de  $k_A$  lógicamente variará según el contaminante. Para eliminar la DBO es adecuado un valor de 0,08 m/d (García, J et al, 2004). Además, si el sistema se dimensiona para eliminar DBO, a la vez también se va a reducir la materia en suspensión de forma suficiente, ya que estos sistemas son más eficaces para eliminar la materia en suspensión que la DBO. Por otra parte, este mismo dimensionamiento va a permitir reducir el nitrógeno en aproximadamente un 30-60% si el sistema se diseña con una profundidad media de la lámina de agua de **0,3 m**. Por lo tanto, será adecuado diseñar el humedal artificial con esta profundidad para potenciar la eliminación del nitrógeno a pesar de que esto implicará la necesidad de una mayor superficie.

Por otro lado, es importante remarcar, que en los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal que actúan como tratamiento secundario (que es, el caso del municipio de Arcos de las Salinas) la concentración de fondo de los contaminantes puede considerarse despreciable frente a los niveles de los contaminantes presentes en el agua afluente. Sin embargo, si el humedal se diseñase para formar parte de un tratamiento de afino se debería tener en cuenta la concentración de fondo, modificando la ecuación anterior.

Ahora bien, para el dimensionamiento biológico, teniendo en cuenta la ecuación 29. Se ha supuesto que el tanque Imhoff reduce en un 30% la concentración de la DBO y para estar del lado de la seguridad se estima como concentración de salida deseada 20mg/L:

$$S = \frac{75 \text{ m}^3/\text{d}}{0,08 \text{ m/d}} \ln \left[ \frac{140 \text{ mg/L}}{20 \text{ mg/L}} \right] = 1824 \text{ m}^2$$

A continuación se verifica que la carga orgánica superficial sea menor de 6 g DBO/m<sup>2</sup>d:

$$S = \frac{Q \cdot C_0}{S} = \frac{75 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 140 \text{ g DBO}_5/\text{m}^3}{1824 \text{ m}^2} = 5.76 \text{ g DBO}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$$

Como marca la guía de Garcia y Corzo complementariamente se realiza una estimación de la capacidad del sistema para eliminar nitrógeno considerando un valor de  $k_A=0,025\text{m/d}$ , y estimando que la concentración de amonio en el agua residual es de 50 mg/L (en este

ejemplo se considera que el nitrógeno del agua residual está exclusivamente en forma de amonio, lo cual es bastante cierto).

$$C_1 = \frac{C_0}{e^{\left(\frac{S \cdot k_A}{Q}\right)}} = \frac{50 \text{ mg/L}}{e^{\left(\frac{1824 \text{ m}^2 \cdot 0,025 \text{ m/d}}{200 \text{ m}^3/\text{d}}\right)}} \approx 27 \text{ mg/L}$$

Esto quiere decir que la reducción de nitrógeno en el efluente será de **27 mg/L**. Lo que supone una reducción de casi el 50%.

A continuación se procede al dimensionamiento hidráulico que ayuda a determinar las dimensiones del sistema (longitud y anchura). Para el dimensionamiento hidráulico se aplica la Ley de Darcy, que describe el régimen del flujo en un medio poroso:

$$Q = k_s \cdot A_s \cdot s \quad 30$$

Donde,

Q el caudal, en m<sup>3</sup>/d.

k<sub>s</sub> la conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo, en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d

A<sub>s</sub> es la sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo, en m<sup>2</sup>.

s es el gradiente hidráulico o pendiente (dh/dL), en m/m.

La “Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial” recomienda tomar el caudal máximo diario para que el humedal sea capaz de absorber bien las puntas de caudal. Por otro lado remarca no utilizar los caudales puntas horarios ya que originan sistemas excesivamente anchos y poco largos.

En cuanto a la conductividad hidráulica, esta varía en función de la cantidad y del tamaño de los huecos del medio granular utilizado. En la siguiente tabla se muestran órdenes de magnitud estimados de la conductividad hidráulica (k<sub>s</sub>) para algunos materiales granulares limpios que podrían utilizarse como sustrato en estos sistemas. La conductividad hidráulica con el paso del tiempo se va reduciendo por retención de sólidos y crecimiento del biofilm, especialmente en la zona más cercana a la entrada. Por ello García y Corzo recomiendan adoptar un factor de seguridad para k<sub>s</sub> de 7 como mínimo.

Tabla 14. Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica ( $k_s$ ) en función del tipo de material granular utilizado como sustrato. (Fuente: Reed, S.C., Crites, R.W. y Middlebrooks, E.J. (1995)).

Tipo de sustrato	Tamaño efectivo $D_{10}$ (mm)	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica $K_s$ ( $m^3/m^2 \cdot d$ )
<b>Arenas graduadas</b>	2	28-32	100-1000
<b>Arenas gravosas</b>	8	30-35	500-5000
<b>Gravas finas</b>	16	35-38	1000-10.000
<b>Gravas medianas</b>	32	36-40	10.000-50.000
<b>Rocas pequeñas</b>	128	38-45	50.000-250.000

Los valores de la pendiente ( $s$ ) que se suelen utilizar varían en el rango de 0,01 a 0,02 m/m (Cooper, P.F., et al. 1996), intentando que la pendiente no sea superior a 0,02 m/m para evitar que los costes de excavación no sean elevados.

Así pues, las dimensiones del humedal se obtienen modificando la fórmula 30:

$$A_s = \frac{Q_{med,d}}{k_s \cdot s} \quad 31$$

Con lo que se obtiene una sección de:

$$A_s = \frac{75 \text{ m}^3/d}{(3000/5 \text{ m}^3/m^2 \cdot d) \cdot 0.01 \text{ m/m}} = 12.5 \text{ m}^2$$

La sección obtenida es de **12.5 m<sup>2</sup>**, habiendo se aplicado un coeficiente de seguridad dividiendo la conductividad entre 5. Una conductividad que se correspondería con **gravas finas**.

El ancho del humedal se determina mediante la fórmula:

$$W = \frac{A_s}{h} \quad 32$$

Donde,

W el ancho, en m.

h la profundidad, en m.



$$W = \frac{12,5m^2}{0,30 m} = 41,68 m$$

La longitud obtenida es 41,68 m, recordando que se ha establecido una altura de lámina de agua de 30 cm para favorecer la eliminación de nitrógeno.

Una vez determinado el ancho, la longitud se obtiene de:

$$L = \frac{S}{W} \quad 33$$

Donde,

L la longitud, en m.

$$L = \frac{1825m^2}{41,68m} = 43,78m$$

La longitud obtenida es de **43,78 m**. Hay que tener en cuenta que para una mejor operación es conveniente dividir el área total en 4 celdas independientes. Por ello, las dimensiones que se estiman adecuadas para cada una de estas celdas son de **11 metros de ancho por 44 metros de largo**. Manteniendo una separación entre cada una de las celdas de 2 m para permitir el paso de una persona entre ellas. La grava a colocar, será una grava fina de 16mm D<sub>10</sub> y para la vegetación, se considera adecuada la plantación de 3 plantas de cañizo por m<sup>2</sup>. Se escoge esta macrófita debido a su tolerancia a las bajas temperaturas y a su baja predación por parte de las aves.

#### 6.5. Deshidratación del fango.

Existen numerosos sistemas para la deshidratación de fangos, pero, debido a que se busca evitar el consumo energético y que sea un sistema económico, se opta por deshidratar el fango mediante una era de secado.

Las eras de secado son un tratamiento de deshidratación “in situ” de fangos previamente estabilizados o con un alto grado de mineralización. Es un tratamiento relativamente económico que no requiere un aporte de energía.

Existen cuatro tipologías distintas de eras de secado: convencionales de arena, pavimentadas, de medio artificial y por vacío. Las más extendidas, y aplicadas comúnmente en pequeñas poblaciones, son las eras convencionales, por lo que en este apartado se realiza una descripción detallada de las mismas (Metcalf & Eddy, 2000).

Las eras de secado convencionales están constituidas por una capa de material drenante, dividida en compartimentos, y sobre la que se vierte el fango en tongadas de 20-30 cm como máximo. La capa drenante suele estar compuesta por un lecho de arena (fina y gruesa), dispuesto sobre una capa soporte de grava de distintos tamaños como se muestra en la Figura 19.

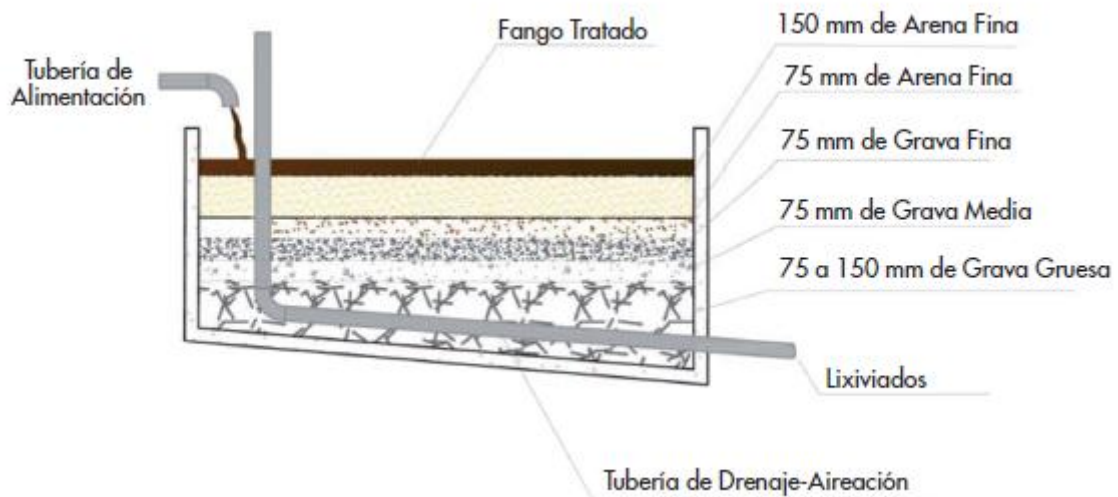


Figura 19. Corte transversal de una era de secado. (Fuente: Metcalf & Eddy, 2000).

El secado de los fangos en las eras se logra mediante drenaje (filtración) y evaporación:

En una primera fase, el agua abandona el fango por filtración a través de la arena, favoreciendo el desprendimiento de los gases ocluidos y disueltos, que tienden a hacer flotar los sólidos. Esta fase, que puede durar las 12-18 primeras horas, da como resultado una suspensión fangosa, de hasta el 20% de sequedad.

La segunda fase de evaporación es más lenta, y produce una disminución de la capa de fangos, agrietando su superficie y favoreciendo la evaporación del agua de las capas inferiores, al ser las grietas cada vez más profundas. Al final de esta fase, el fango tendrá una consistencia tal que le permitirá ser paleable, alcanzándose niveles de sequedad del 40-60%. El tiempo de secado se prolonga de 10 a 15 días en condiciones favorables.

El fango a secar puede ser llevado a las eras a través de canales abiertos o de tuberías. En el primer caso, se emplean compuertas de tajadera a la entrada a cada era de secado y, en el segundo, el aislamiento se realiza mediante válvulas.

El sistema de drenaje subterráneo bajo la capa de soporte debe cuidarse al máximo. El número de tuberías y la pendiente de las mismas deben permitir un drenaje homogéneo de toda la masa de fango, y conducir toda el agua drenada a una arqueta de drenaje general, desde donde se bombeará a cabecera de instalación.

La extracción del fango se lleva a cabo, normalmente, de forma manual, vertiendo el fango seco en carretillas o cintas transportadoras, que lo conducen fuera de las eras para ser almacenados o cargados sobre camión. Con la retirada del fango también se elimina algo de arena de la capa drenante, al quedar adherida a la torta, lo que obliga, cada cierto tiempo, a reponer parte de la arena.

La superficie necesaria de las eras de secado depende, entre otros factores, del tipo de fango a deshidratar. En la siguiente tabla se muestra, en función del tipo de fango, la superficie necesaria de eras y la carga de fangos a aplicar.

Tabla 15 Valores típicos de las superficies necesarias para las eras de secado y cargas a aplicar

Tipo de fango	Carga de fangos (kg de sólidos secos por m <sup>2</sup> y año)
<b>Primario digerido</b>	122-146
<b>Primario y fangos de filtros percoladores digeridos</b>	88-122
<b>Primario y fango activado en excesos digeridos</b>	58-98
<b>Primario y fango de precipitación química digeridos</b>	98-161

Las principales ventajas de las eras de secado radican en:

- Su bajo coste de implantación.
- El bajo contenido en humedad del producto final.

Como inconvenientes pueden citarse:

- La mano de obra que requieren, al no poderse emplear maquinaria para la extracción de los fangos secos, dado que por su peso podría dañar el sistema de drenaje subterráneo.
- La pérdida de parte de la arena, junto con los fangos secos que se retiran, lo que obliga a su reposición cada cierto tiempo.
- La producción de malos olores si el fango no se encuentra suficientemente estabilizado.
- El no ser de aplicación en zonas de elevada pluviometría. No obstante, para salvar este obstáculo, y en los casos en los que sea necesario deshidratar el fango de forma continua a lo largo de todo el año, se pueden construir las eras bajo cubierta similares a la de los invernaderos.

Así pues pensando en su bajo coste de implantación se considera que la era de secado es el mejor método para la deshidratación del fango en estas instalaciones.

Como anteriormente se ha citado, el espesor de los fangos en la era de secado se encuentra entre 20 y 30 cm, por lo tanto estimando que el espesor a alcanzar será de unos 25 cm, basta con dividir el volumen de fangos producidos entre esa altura para obtener el área necesaria de la era de secado. Se ha obtenido de este modo:

$$A_{era\ de\ secado} = \frac{V_{lodos}}{h_{lodos}} = \frac{28\ m^3}{0.25\ m} = 112\ m^2$$

Considerando adecuada una **forma rectangular de 15 x 7,50 m.**

## 7. Definición de la opción seleccionada.

El siguiente paso, una vez se han definido todos los elementos (tipología y dimensiones) que compondrán el humedal artificial para la depuración de aguas residuales en el municipio de Arcos de las Salinas es el de limitar su ubicación exacta para tener en cuenta la adaptación del sistema a la parcela planteada. El diagrama final del sistema es el siguiente:

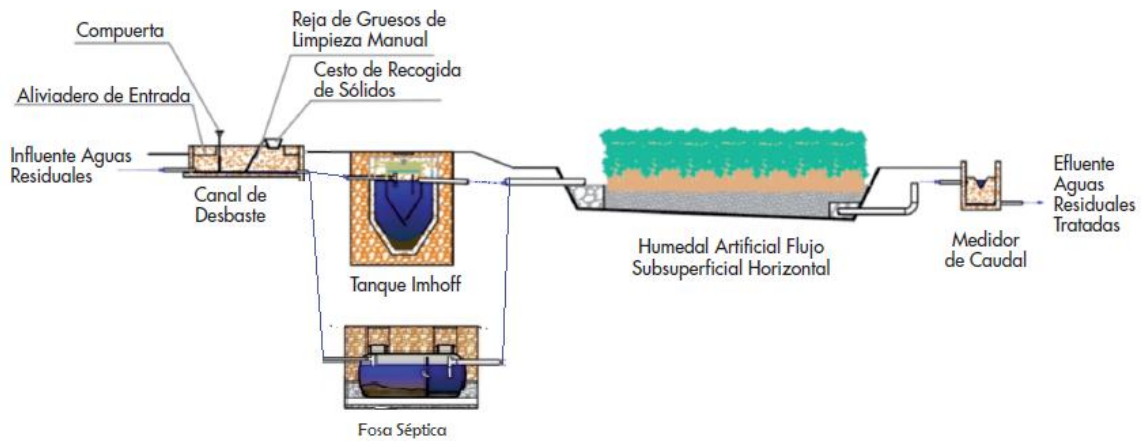


Figura 20. Diagrama del sistema de depuración para Arcos de las Salinas. Fuente: Propia.

### 7.1. Emplazamiento del sistema.

El lugar que se considera más apropiado para el emplazamiento se encuentra a 600m aguas abajo del punto de vertido del municipio. Como se puede apreciar en la siguiente figura.



Figura 21. Punto de implantación del sistema de depuración.

Por otro lado en la figura 22 se puede apreciar la configuración propuesta para los elementos del sistema de depuración mediante un humedal artificial. Encontrándose en los puntos más altos el tanque Imhoff y la fosa séptica, en la parte más próxima al río se situarían las celdas del humedal y la era de secado se podría implantar en cualquier punto de la parcela. Hay que mencionar que las rejillas podrían cambiarse y situarse en el actual punto de vertido del municipio.

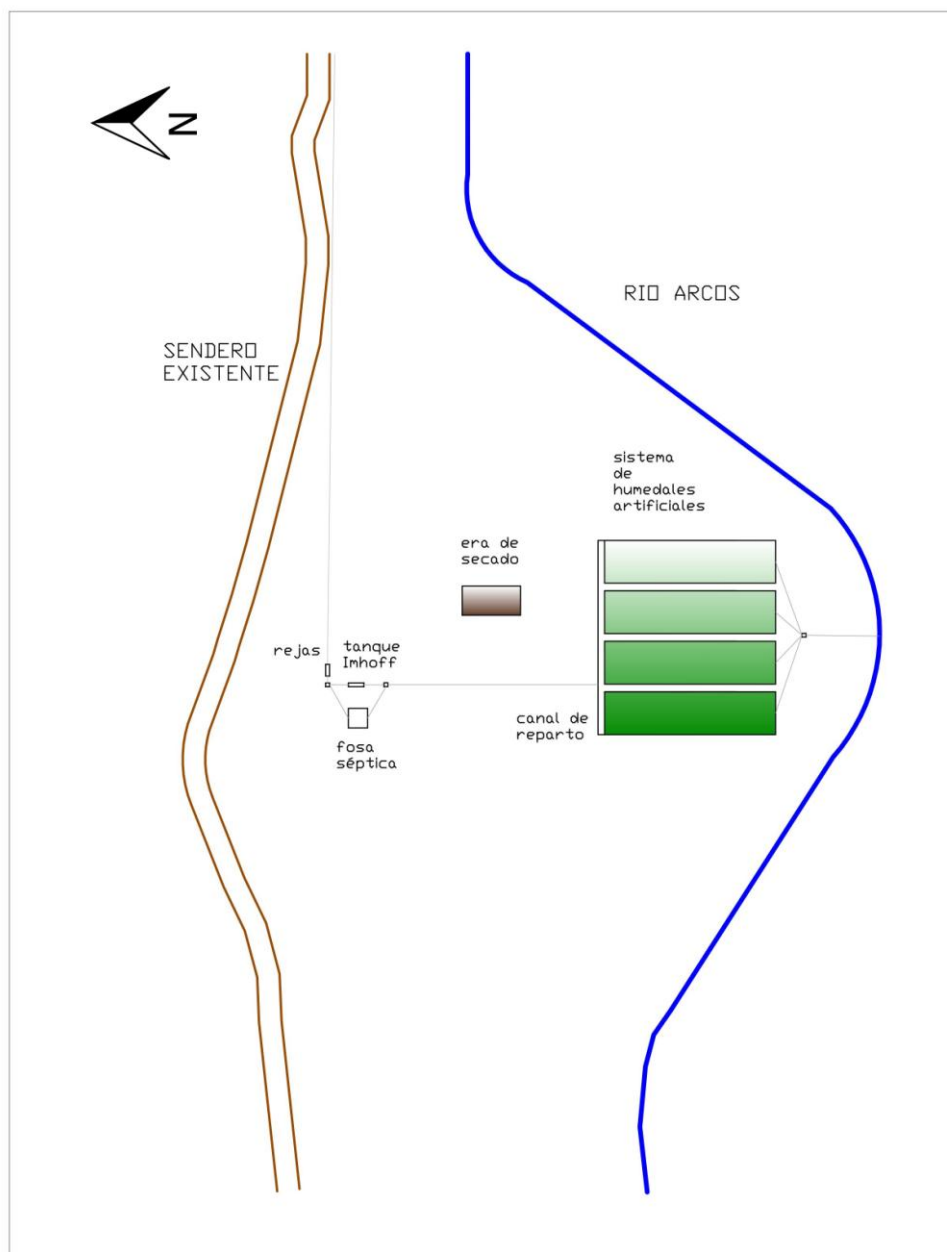


Figura 22. Configuración propuesta. Fuente: A. Rodríguez

## 7.2. Proceso de construcción.

### 7.2.1. *Trabajos previos.*

La localización propuesta por el emplazamiento se encuentra en una zona de carácter agrícola, por ello entre los trabajos previos se encontrarán los del desbroce y la eliminación de la capa vegetal que se estima de unos 30 cm para posteriormente realizar un relleno de 40cm con zahorra artificial que garantice la estabilidad del terreno cuando circule maquinaria sobre él.

### 7.2.2. *Replanteo de la parcela*

Una vez este adecuado el terreno se deben replantar todos los elementos del sistema, colocándolos de forma que el flujo avance en el sentido de la pendiente. Esto quiere decir que el pretratamiento se encontrara en el punto más alto y los humedales se encontraran en la zona más cercana al río.

### 7.2.3. *Movimiento de tierras*

Tras el replanteo de la parcela se realiza la excavación en el terreno para colocar todos los elementos del sistema. Debido a que el terreno tiene las pendientes adecuadas para que funcione por gravedad no serán necesarios rellenos.

Es importante que la coronación de los humedales artificiales esté más alta que el nivel del terreno para evitar la entrada de materiales por arrastre. La parte exterior que no está protegida por una geomembrana deberá protegerse por ejemplo mediante técnicas de revegetación.

### 7.2.4. *Nivelación y compactación*

Realizar correctamente este trabajo es muy importante ya que si se realizase de manera incorrecta habrían caminos preferentes por los que circularía el agua y de esta forma disminuiría la eficiencia esperada.

Para nivelar el fondo del humedal es importante utilizar una capa de 20 cm de zahorra artificial y tras la compactación aplicar un tratamiento herbicida que no cause problemas posteriores.

### 7.2.5. *Sistemas de distribución y recogida*

Este sistema lo componen arquetas, tuberías y canales. Las arquetas se ejecutarán todas in situ de medio pie de espesor sobre un fondo de hormigón de 10 cm. Las tuberías que no sean de drenaje se apoyarán sobre camas de arena de 10 cm de espesor y se cubrirán con otros 10 cm de arena. Finalmente se protegerán por la parte superior con una pequeña capa de hormigón. Las tuberías de drenaje cuando se cubran de material el vertido se realizara poco a poco en ningún caso vertiendo de golpe todo el material sobre la tubería ya que podría dañarla o desplazarla. En cuanto a los canales se ejecutaran mediante el encofrado de los mismos.

#### *7.2.6. Impermeabilización*

A pesar de que comúnmente se dispone una capa de cal de 2 cm (que separa del terreno natural las siguientes capas) tras la cual se añaden capas de arcillas hasta unos 30 cm para conseguir la impermeabilización la nueva metodología es la de disponer una capa de arcilla bentonítica entre dos geotextiles. Esto produce un ahorro considerable en la partida de impermeabilización y reduce mucho el tiempo del proceso constructivo.

Una vez realizada la capa impermeabilizante de arcilla se procede a cubrir cada una de las excavaciones destinadas a las cuatro celdas del humedal. Se recomienda que las geomembranas se confeccionen previamente en taller para que cuando lleguen a la parcela las soldaduras a realizar in situ sean mínimas. Las empresas especializadas en este tipo de trabajos realizan el ensamblaje de las láminas mediante una máquina automática de soldadura térmica realizando un pequeño solape entre láminas.

#### *7.2.7. Material Granular*

Como el humedal diseñado para el municipio es de flujo horizontal se debe colocar primero, al inicio y al final de las celdas, una franja de al menos 1 metro de material de un diámetro superior al del resto para evitar la obturación a la entrada y salida.

El relleno de las celdas con el material granular se realizará sin que los camiones entren en ningún momento en las celdas, aunque como el ancho entre celdas no permite el paso de maquinaria y es imposible para una pala abarcar los 11 m de ancho que tienen las celdas es importante utilizar una pequeña máquina de movimiento de tierras para extender el



material. Cabe remarcar que solo se debe permitir que la maquina trabaje sobre el material granular o de lo contrario podría perforar o cizallar la geomembrana.

#### 7.2.8. *Vegetación*

La plantación de la vegetación se realiza al final de todo el proceso de implantación. Recordemos que la plantación definida es de 3 plantas de carrizo por m<sup>2</sup>, se recomienda que la plantación sea entre los meses de abril y mayo para asegurar una buena cobertura en el mes de agosto.

La idea es hacer pequeños agujeros en el sustrato de manera que un extremo de la planta quede sumergido en el agua. Una vez plantadas el nivel del agua se eleva unos dos centímetros por encima del sustrato para evitar que crezcan las malas hierbas hasta que la vegetación haya alcanzado un desarrollo aceptable.

### 7.3. Explotación y operaciones de mantenimiento.

#### 7.3.1. *Puesta en marcha.*

La puesta en marcha del humedal suele durar un año o ciclo biológico, que es cuando la vegetación está bien consolidada. Por otro lado, las bacterias responsables de la eliminación de los contaminantes tienen un periodo de desarrollo que dura entre 3 y 6 meses.

Es importante que, durante la puesta en marcha, exista un mayor control en la operación, ya que para evitar que crezcan malas hierbas el agua deberá aflorar unos 2 cm por encima de la superficie. Esto puede ocasionar la aparición de plagas de mosquitos y malos olores, por lo que se deberán alternar los periodos de encharcamiento con otros de nivel normal. En caso de no poder encharcar los humedales, las malas hierbas se deberán retirar manualmente.

#### 7.3.2. *Plagas.*

Las plagas más habituales en este tipo de sistemas de depuración son las de mosquitos, malas hierbas y conejos. Las plagas de mosquitos son fáciles de controlar en los humedales de flujo subsuperficial, ya que en el único momento en el que podrían aparecer es cuando se estén realizando las operaciones de puesta en marcha. En cuanto a la aparición de malas hierbas **es muy importante no utilizar en ningún caso herbicidas**, ya que podrían afectar al crecimiento de las macrófitas, la forma de eliminarlas debe ser manual. Los conejos pueden

causar serios daños al carrizo cuando este recién plantado. Este problema se acentúa en los periodos en los que el desarrollo de la vegetación no es suficiente para reemplazar las pérdidas. Una forma de reducir los daños sería encharcar el humedal unos 10 cm durante unos días para reducir los daños que esta plaga produce (Cooper et al, 1996).

Otra de las posibles plagas que puedes afectar al humedal es la posible, el cual puede ser tratado aplicando una solución jabonosa, sin insecticidas. Debe actuarse con rapidez, antes de que el daño en la planta sea irreparable.

### *7.3.3. Estructuras.*

Son numerosas las estructuras que existen en este sistema y es importante mantenerlas en un estado adecuado para el correcto funcionamiento del mismo.

Se estima oportuno que una vez a la semana se compruebe el estado del aliviadero y de las rejillas. Es muy importante que el aliviadero no se encuentre en ningún caso obstruido y en el caso de las rejillas, realizar una limpieza manual cada dos semanas o cuando haya una gran cantidad de sólidos retenidos. Así mismo entre todas las conexiones de los elementos del sistema abran arquetas de registro que permitirán en caso de que sea necesario introducir agua a presión para la limpieza de los conductos.

Igualmente, el tanque Imhoff será revisado semanalmente de forma que la entrada y la salida no estén obturadas retirando de la zona de sedimentación cualquier sólido flotante que se pueda apreciar incluso retirar mensualmente cualquier grasa o sólido adherido en las paredes mediante rascadores. Además será importante comprobar que en la zona de ventilación no se hayan formado capas de espuma o material flotante ya que se producirían malos olores y se estaría impidiendo el escape de gases. Por ello si se comprobase la existencia de esta capa de espuma se debería romper mediante una pala o pértiga. En cuanto al lodo, este se extraerá anualmente para conseguir un lodo bien digerido. Antes de la extracción del lodo se procederá a hacer pasar el agua a la fosa séptica instalada en paralelo. Una vez solo queden los lodos, mediante una cuba, se extraerán y se llevarán a la era de secado. Las operaciones de mantenimiento para la fosa séptica serán similares a las del tanque Imhoff.

En cuanto al mantenimiento del humedal artificial se estima que su vida útil es de hasta 10 años, momento en el cual debido a la obturación del sistema su rendimiento es muy reducido. A pesar de esta vida útil, hay que comprender que posiblemente en un periodo de unos 6-8 años se deba sustituir el material granular. Por otro lado, aprovechando las inspecciones semanales se debe asegurar que la tela asfáltica no está dañada y no existen obturaciones en la arqueta de reparto de entrada al humedal artificial ni en la arqueta de salida. La manera de operar el humedal en los meses de menor afluencia de personas sería la de utilizar una única celda. Cada semana se utilizaría una de las cuatro celdas, de esta forma se mantendría el buen rendimiento del sistema y además se conservaría la vegetación. En cuanto a la operación en los meses de verano cuando mayor afluencia de personas hay antes de la llegada de las mismas se debe bajar algo el nivel de agua de las celdas para que no disminuya bruscamente el tiempo de retención hidráulico

La era de secado tiene un mantenimiento mucho más sencillo ya que, el único problema que puede presentar es la obturación de salida de lixiviados, los cuales mediante una pequeña bomba manual se recircularan al tanque Imhoff. Por otro lado hay que mencionar que se deberá reponer la capa superior del material drenante. Se recomienda la extracción del lodo deshidratado una vez al año, unas semanas antes de la siguiente extracción de lodos del Tanque Imhoff.

#### *7.3.4. Vegetación.*

Para mantener en un estado adecuado la vegetación se recomienda realizar siegas cada año cuando empiecen a secarse las partes aéreas de las plantas (García y Corzo, 2008). Por experiencia es mejor realizar esta siega a finales del invierno aunque la vegetación este inactiva ya que luego rebrota enseguida en la primavera. Debido a que la extensión de este humedal es relativamente pequeña se recomienda realizar la siega de manera manual, lo que disminuirá el riesgo de realizar cortes y pinchazos en la lámina asfáltica. Estas siegas evitarán que el material vegetal se descomponga en la superficie del medio granular y de este modo reducir el proceso de colmatación además de eliminar un aporte de nutrientes. El material retirado se puede compostar o quemar, siendo más recomendable la primera opción.

## 8. Costes de operación estimados.

En la Tabla 16 que se muestra a continuación se pueden ver los costes asociados a humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal asociados a unas poblaciones de 100 y 500 h.e. Estos costes incluyen el mantenimiento de todo el sistema de depuración, es decir: al mantenimiento de las rejas, tanque imhoff, poda del humedal, extracción de lodos, etc.

Tabla 16. Costes de explotación y mantenimiento de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. Fuente: Ortega et al., 2010.

Población (he)		100			500		
Operación	Coste horario (€/h)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)
Desplazamiento del operario							
Desplazamiento del operario	25	1 vez/semana	1	1.300,00	2 veces/semana	1	2.600,00
Pretratamiento							
Limpieza de la reja	16	1 vez/semana	0,17	141,44	-	-	-
Tratamiento primario							
Inspección, y medición espesores flotantes y fangos	16	1 vez/semana	1	16	2 veces/año	1	32,00
Operación	Coste horario (€/m <sup>3</sup> )	Frecuencia	Volumen (m <sup>3</sup> )	Coste anual (€)	Frecuencia	Volumen (m <sup>3</sup> )	Coste anual (€)
Extracción y gestión de	15	1 vez/año	20	300	2 veces/año	35	1.050,00

fangos y flotantes							
Humedales artificiales							
Operación	Coste horario (€/h)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)
Inspección general: comprobación dispositivo alternancia alimentación y reparto uniforme	16	1 vez/semana	0,17	141,44	2 veces/semana	0,25	416,00
Limpieza tuberías distribución	16	1 vez/mes	0,5	96,00	1 vez/mes	0,5	96,00
Siega de plantas	16	1 vez/año	24	384,00	1 vez/año	120	1.920,00
Control permeabilidad del sustrato	16	1 vez/año	4	64,00	1 vez/año	8	128
Operación	Coste horario (€/m <sup>3</sup> )	Frecuencia	Volumen (m <sup>3</sup> )	Coste anual (€)	Frecuencia	Volumen (m <sup>3</sup> )	Coste anual (€)
Evacuación residuos poda	5	1 vez/año	52	260,00	1 vez/año	262	1.310,00
Mantenimiento							
Operación	Coste horario (€/h)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)

Mantenimiento obra civil	16	24 veces/año	2	768,00	24 veces/año	7	2.304,00
Seguimiento							
Operación	Coste (€/año)	Frecuencia		Coste anual (€)	Frecuencia		Coste anual (€)
Control analítico	300	4 veces/año		1.200,00	4 veces/año		1.200,00
<b>Coste total explotación y mantenimiento (€/año)</b>				4.670,88			11.056,00
<b>Coste total unitario (€/h-e. año)</b>				46,71			22,12

Es importante debido a la fuerte estacionalidad que sufre el municipio de Arcos de las Salinas tener en cuenta las frecuencia de mantenimiento que necesitaría un sistema diseñado para 500 h.e a pesar de que la población censada sea inferior a 100 habitantes. Como se observa en la Tabla 16 la media estimada de la población mensual es de 333 habitantes. Aun así, el coste de 11.056,00 €/año para el mantenimiento de un sistema de depuración es más que razonable y muy atractivo para una pequeña población. Por otro lado, debido a que ciertos mantenimientos podrían estar incluidos en las jornadas de trabajo de los operarios ya contratados por el ayuntamiento se podría llegar a reducir el coste de explotación y de mantenimiento anual.

Tabla 17. Estimación aproximada de la población mensual. Fuente: Propia

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
100	100	100	350	350	200	500	1000	500	500	200	100
										Media	333

Es muy importante comprender que en la actualidad, el municipio de Arcos de las Salinas no está depurando las aguas de su red de alcantarillado y por ello paga unos impuestos que se reducirían si contase con un sistema de depuración. Implantar un sistema de depuración supondría un ahorro económico que se podría destinar al mantenimiento del mismo

dotando al municipio de un humedal artificial con todos los beneficios que ello supondría, entre ellos, generar empleo verde, como anteriormente se ha mencionado.

## 9. Conclusiones

La conclusión de este Trabajo de Fin de Máster es que la implantación de un humedal artificial para la depuración de las aguas residuales de Arcos de las Salinas es una solución más que adecuada ya que, gracias a la topografía del terreno se evitará la necesidad de consumo energético para hacer funcionar las instalaciones, tiene una sencillez operativa que facilita la gestión del mismo por el propio ayuntamiento, tiene menos costes de explotación y de mantenimiento que los que supondría una instalación convencional de depuración de aguas residuales, algo que es necesario para municipios con poca población, la producción de olores será mínima gracias a tratarse de un sistema de flujo subsuperficial y finalmente estará perfectamente integrado en el medio natural.

Hay que destacar que este proyecto se ha realizado con datos de concentraciones de contaminantes de bibliografía, por lo que si se llevase a cabo este proyecto sería necesario realizar un reestudio teniendo en cuenta las concentraciones reales. A la hora de instalar un sistema de humedales artificiales es muy importante que el dimensionamiento se realice con los estudios previos necesarios para garantizar su correcto funcionamiento, además de tener un fuerte compromiso a la hora de mantener y operar estos sistemas. Sin el mantenimiento y la operación adecuados, estos sistemas quedan obsoletos, que además de crear una mala imagen de estos sistemas dejan de ser proyectos que puedan ayudar a depurar las aguas de pequeños municipios y dotarlos de cierto valor ambiental a pasar a ser escenarios nada atractivos siendo fuente de malos olores, de plagas e incluso en ocasiones, llegan a verter el agua con mayores concentraciones de contaminantes que las de entrada. En cuando a las dimensiones detalladas anteriormente hay que decir que el municipio de Arcos de las Salinas cuenta con Extensiones de terreno suficientes para la instalación de este sistema de depuración anteriormente descrito.



## 10. Bibliografía

**Blasco, E.** (2011). Diseño de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento secundario de las aguas residuales de la población de Carrícola (Valencia). Proyecto Final de Carrera de Ciencias Ambientales. Universitat Politècnica de València. Director: Martín, M.

**Brix, H.** (1994). The Role of Wetlands for the Control of Pollution in Rural Areas. Design and Use of Constructed Wetlands. Curso CIHEAM-IAWQ. Zaragoza.

**Brix, H.** 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands. Water Science and Technology.

**Brown, D.S. (OH), Kreissl, J.F. (OH), Gearheart, R.A. (CA), Kruzic, A.P. (TX), Boyle, W.C. (WI), Otis, R.J. (WI).** 2000. Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters.. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Office of Research and Development, Cincinnati, OH.

**Crites, R.; Middlebrooks, E.; Reed, S.** (2006). Natural Wastewater Treatment Systems. CRC Press, Taylor & Francis Group.

**Cooper P.F., Job G.D., Green M.B., Shutes R.B.E.** 1996. Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. Ed. WRc publications.

**Daphne, L.S.** (1994). Hazardous organic waste amenable to biological treatment. En Biotechnology for the Treatment of Hazardous Waste, 1-26. D.L: Stoner, Ed. Chelsea, MI. Lewis Publishers.

**Ferrer, Y. (CEDEX), Ortega, E. (CEDEX), Salas, J.J. (CENTA).** 2012. Tendencias actuales en las tecnologías de tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas. Ingeniería Civil 168/2012

**García J., Aguirre P., Mujeriego R., Huang Y., Ortiz L. y Bayona, J. M.** (2004). Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. Wat. Res., 38, 1669-1678.

**García, J., Corzo, A.** 2008. Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. CPET-Centro de Publicaciones del Campus Nord, Universitat Politècnica de Catalunya.

**Guillem, A.(FGN), Moreno, L. (AE-Agró), Lassalle, M. (AE-Agró), Ribera, L. (AE-Agró), Carrió , E. (UPM), Hernández, C. (UPV-IIAMA), Martín, M. (UPV-IIAMA), Seidel, M. (U. de Friburgo).**

2016. Manuales técnicos para la gestión de humedales artificiales en espacios naturales. Gestión de la vegetación para la mejora del hábitat y de la calidad del agua Alternativas para la valorización de la biomasa vegetal de los humedales artificiales. Life Albufera.

**Hilton, B. L.** 1993. Performance evaluation of a closed ecological life support system (CELSS) employing constructed wetlands. pp 117-125 in *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, G. A. Moshiri (ed.). CRC Press, Boca Raton, FL.

**Kadlec RH., Knight RL., Vymazal J., Brix H., Cooper P., Haberl R.** (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing, 155 pp.

**Liehr, R.K. et al.** 2000. *Constructed wetlands treatment of high nitrogen landfill leachate*. Project Number 94-IRM-U, Water Environment Research Foundation, Alexandria, VA.

**Marco, A., Esplugas, S. y Saum, G.** (1997). How and why combine chemical biological processes for wastewater treatment. *Wat. Sci.Tech.*, 35,321-327.

**Martín, I.** (1989). *Depuración de aguas con plantas emergentes*. Ed. Servicio de Extensión Agraria, D.L. ISBN: 84-341-0659.

**Noguera, K., Olivero, J.,** (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso Colombiano. *La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Volumen XXXIV, número 132. Septiembre de 2010.

**Ortega, E. (CEDEX), Ferrer, Y. (CEDEX), Salas, J.J. (CENTA), Aragón, C. (CENTA), Real, A. (CENTA).** 2010. *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*. Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino.

**Peris, E.** 2016. "Estudio de soluciones sobre el diseño de un humedal artificial para el tratamiento de escorrentías agrícolas, en el entorno del Parque natural de la Albufera". Proyecto Final de Carrera de Ingeniería Industrial. Universitat Politècnica de València. Directores: Martín, M. i Palomares, A.E.

**Reed, S.C., Crites, R.W. y Middlebrooks, E.J.** (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. Second edition. McGraw Hill. 433 pp

**Rodriguez, J.**, (2002). Tratamiento anaerobio de aguas residuales. Universidad del Valle. Cali – Colombia.

**Scott, J.P. y Ollis, D.F.** (1995). Integration of chemical and biological oxidation processes for water treatment: review and recommendation. Environ. Prog., 14, 88-103

**Tanner, C.; Kadlec, R.** (2003). Oxygen flux implications of observed nitrogen removal rates in subsurface-flow treatment wetlands. Water Science and Technology 48 (5), pp. 191-198.

**Wetzel, R. G.**, 1993. Constructed wetlands: scientific foundations are critical. pp 3-7 in Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, G.-A. Moshiri (ed.). CRC Press, Boca Raton, FL

**Young, T.C., A.G. Collins, T.L. Theis.** 2000. Subsurface flow wetland for wastewater treatment at Minoa, NY. Report to NYSDERDA and USEPA, Clarkson University, NY.