

# Trabajo Fin de Máster

## *DISEÑO DE SISTEMAS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE BAJO COSTE PARA LA EDAR VALL DELS ALCALANS (VALENCIA)*

**Intensificación:** *TRATAMIENTOS DE AGUAS*

**Autor:**

*LENIN GABRIEL SILVA TIPANTASIG*

**Tutor:**

*DRA. CARMEN HERNÁNDEZ CRESPO*

**Cotutor/es:**

*DR. MIGUEL MARTÍN MONERRIS*

**NOVIEMBRE 2019**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

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



## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Diseño de sistemas para el tratamiento de lodos mediante tecnologías de bajo coste para la EDAR Vall Dels Alcalans (Valencia).

**Título del TFM en inglés:** Design of sludge treatment systems using low cost technologies for the Vall Dels Alcalans WWTP (Valencia).

**Título del TFM en Valenciano:** Disseny de sistemes per al tractament de fangs mitjançant tecnologies de baix cost per a l'EDAR Vall Dels Alcalans (Valencia).

**Alumno:** Lenin Gabriel Silva Tipantasig.

**Tutor:** Dra. Carmen Hernández Crespo

**Cotutor/es:** Dr. Miguel Martín Monerris

**Fecha de Lectura:** Noviembre 2019

### Resumen

#### En español (máximo 5000 caracteres)

El objetivo principal de este trabajo es realizar una revisión de casos de estudio exitosos empleando humedales artificiales para el tratamiento de lodos líquidos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas. Esto para determinar la viabilidad de la implementación de humedales artificiales en la línea de fango de la EDAR Valls dels Alcalans ubicada en el municipio de Monserrat – Valencia.

En España, se registra que el 80% de la totalidad de lodos producidos, son aplicados en la agricultura revalorizando estos residuos biológicos reduciendo el impacto ambiental ocasionado si el destino final fuese en vertedero. Por lo tanto, los sistemas de tratamiento de lodos deben proporcionar un producto final adecuado para el uso en el campo de la agricultura cumpliendo con los requisitos de la legislación, con costos razonables de inversión, operación y mantenimiento.



Centrífugas, filtros prensa, y eras de secado, son tecnologías convencionales de deshidratación de lodos muy conocidas a nivel mundial. En la Comunidad Valenciana, el 44.3% de las EDAR poseen eras de secado en su línea de fango, demostrando ser una opción extendida. Sin embargo, estos sistemas solamente son eficientes en la deshidratación, mientras que otras tecnologías similares de bajo coste han demostrado tener buenos resultados en cuanto a la deshidratación y, estabilización de la materia orgánica a largo plazo.

En este sentido, los humedales artificiales para el tratamiento de lodos han conseguido ser eficientes para maximizar el contenido de sólidos secos reduciendo volumen de agua y, en el mismo sistema, minimizar el contenido de materia orgánica favoreciendo a un mejor manejo de fangos.

El diseño y operación de sistemas de humedales para tratamiento de lodos aun no siguen un estándar definitivo, pero investigaciones europeas han propuesto varios parámetros principales como: tasa de carga, carga hidráulica, frecuencia de alimentación, altura, número de camas. Estos parámetros representan la base técnica para el dimensionamiento de humedales. Por otro lado, recomendaciones de funcionamiento como el tiempo de reposo final extendido se ha demostrado podrían ser aplicados en clima mediterráneo.

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

L'objectiu principal d'aquest treball és realitzar una revisió de casos d'estudi exitosos, utilitzant aiguamolls artificials per al tractament de llots líquids generats a estacions depuradores d'aigües residuals urbanes. Tot açò per a determinar la viabilitat de la implementació d'aiguamolls artificials a la línia de fang de l'EDAR a la Vall dels Alcalans, ubicada al municipi de Monserrat – València.

A Espanya, està enregistrat que el 80% de la totalitat dels fanguers produïts són aplicats a l'agricultura, revaloritzant aquests residus biològics i reduïnt l'impacte ambiental

ocasionat si la destinació final és l'abocador. D'aquesta manera, els sistemes de tractament de llots deuen de proveïr d'un producte final adequat per a l'ús al camp de l'agricultura, complint amb els requisits de la legislació, i amb costos raonables d'inversió, operació i manteniment.

Centrífugues, filtres premsa i eres de secat, són tecnologies convencionals de deshidratació de llots molt conegudes a nivel mundial. A la Comunitat Valenciana, el 44,3% de les EDAR disposen d'eres de secat a la seua línia de fang, demostrant ésser una opció extesa. Tot així, aquestos sistemes a soles són eficients a la deshidratació, mentre que d'altres tecnologies similars de baix cost han oferit uns bons resultats quant a la deshidratació i estabilització de la matèria orgànica a llarg termini.

En aquest sentit, els aiguamolls artificials per al tractament de llots han aconseguit ésser eficients per a maximitzar el contingut de sòlids secs, reduïnt volum d'aigua i minimitzant el contingut de matèria orgànica afavorint un millor maneig de fanguers al mateix sistema.

El disseny i operació de sistemes d'aiguamolls per al tractament de llots encara no segueixen un estàndard definitiu, però investigacions europees han proposat diversos paràmetres principals com: taxa de càrrega, càrrega hidràulica, freqüència d'alimentació, altura, nombre de llits. Aquestos representen la base tècnica per el dimensionament d'aiguamolls. D'altra banda, recomanacions de funcionament aconsellen el temps de repòs final extés al clima mediterrani.

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

The main objective of this work is make a review of successful studies which used sludge treatment wetlands. This sludge was generated previously in wastewater treatment plants as a waste product. The viability of the implementation of this waste product in constructed wetlands has an example in the Valls dels Alcalans WWTP (Monserrat, Valencia).

In Spain, it is recorded that 80% of the total sludge produced is applied in agriculture, revaluing these biological residues, reducing the environmental impact caused if the final



destination was landfill. Therefore, sludge treatment systems must provide a final product suitable for use in the field of agriculture, complying with the requirements of the legislation, with reasonable investment, operation and maintenance costs.

Centrifuges, filter presses, and drying beds, are conventional technologies in dewatering of sludge. In the Valencian Community, 44.3% of the WWTPs have drying beds in their sludge line, proving to be an extended option. However, these systems are just efficient in dewatering, while other similar low-cost technologies have given good results in terms of dewatering and long-term stabilization of organic matter.

In this sense, constructed wetlands for sludge treatment have managed to be efficient in maximizing the dry solids content by reducing water volume and, in the same system, minimizing the organic matter content favoring better sludge management.

The design and operation of wetland systems for sludge treatment do not yet follow a definitive standard, but European research has proposed several main parameters such as: load rate, hydraulic load, feed frequency, height, number of beds. These parameters represent the technical basis for wetland sizing. On the other hand, operating recommendations such as extended final rest time have been shown could be applied in Mediterranean climate.

**Palabras clave español (máximo 5): humedal, tratamiento, fango.**

**Palabras clave valenciano (máximo 5): aiguamolls, tractament, fang.**

**Palabras clave inglés (máximo 5): wetland, treatment, sludge.**

## ÍNDICE

1. Introducción .....	5
2. Objetivos.....	9
3. Tratamiento de lodos .....	11
3.1. Operaciones preliminares.....	12
3.2. Espesamiento del lodo .....	12
3.3. Estabilización del lodo.....	12
3.4. Acondicionamiento de lodos.....	13
3.5. Deshidratación de lodos .....	13
3.6. Tecnologías de tratamiento de lodo de bajo coste. ....	15
3.6.1. Eras de secado.....	15
3.6.1.1. Eras de secado de arena .....	15
3.6.2. Humedales artificiales de tratamiento de lodos .....	18
4. Investigación en la Región Mediterránea .....	23
4.1. España.....	23
4.2. Grecia .....	28
4.3. Francia.....	33
4.4. Italia .....	39
4.5. Resultados de la investigación .....	45
4.5.1. Ventajas e inconvenientes de los humedales artificiales.....	49
5. Implementación de STW a escala real.....	51
5.1. Localización .....	51
5.2. Descripción de la EDAR.....	52
5.3. Superficie disponible para un STW. ....	55
6. Diseño de STW.....	58
6.1. Dimensionamiento.....	58
7. Operación del STW .....	60
7.1. Frecuencia de alimentación.....	60
7.2. Carga hidráulica .....	60
7.3. Volumen de producto final.....	61
7.4. Tiempo de reposo final .....	62
8. Proceso de construcción del STW .....	63
8.1. Trabajos previos.....	63
8.2. Replanteo de la parcela .....	63



8.3.	Movimiento de tierras .....	63
8.4.	Construcción de muros de hormigón .....	63
8.5.	Nivelación y compactación .....	64
8.6.	Impermeabilización .....	64
8.7.	Sistema de drenaje .....	64
8.8.	Material granular .....	65
8.9.	Vegetación .....	65
8.10.	Sistema de alimentación .....	65
9.	Explotación y operaciones de mantenimiento. ....	66
10.	Estimación de costes.....	67
10.1.	Costes de construcción.....	67
10.2.	Costes de operación .....	67
11.	Conclusiones.....	69
12.	Bibliografía .....	71



## I.MEMORIA



## 1. Introducción

En la actividad de las sociedades humanas sean estas domésticas, comerciales o industriales se producen aguas residuales, estos fluidos generados son el resultado de incorporar una variedad de contaminantes en el agua durante sus usos.

El fin de los procesos de tratamiento es reintegrar el agua al medio en las mejores condiciones posibles de calidad y cantidad, de esta manera se evita el deterioro de los recursos naturales. Por otro lado, esta actividad genera un considerable volumen de subproductos como por ejemplo, fangos de depuradora.

Los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) son residuos generados por procesos de tratamiento de agua, etapas cuya finalidad es emplear unidades de separación entre líquidos y sólidos. La cantidad total de fango o lodo producido y su composición está estrechamente relacionado con las características del influente y del tipo de tratamiento de aguas residuales utilizado (tabla 1).

*Tabla 1 Producción de fango de diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales (adaptado de Von Sperling y Gonçalves, 2007)*

Sistema de tratamiento de agua residual	Sólidos Totales (ST) (%)	Producción de Lodo (gST/he*d)
<b>Tratamiento primario (convencional)</b>	2-6	35-45
<b>Tratamiento primario (tanques sépticos)</b>	3-6	20-30
<b>Balsas facultativas</b>	7-20	20-25
<b>Lagunas aireadas facultativas</b>	6-10	8-13
<b>Fangos activados – convencional</b>		
<b>Lodo primario</b>	2-6	35-45
<b>Lodo secundario</b>	0.6-1	25-35
<b>Mixto</b>	1-2	60-80
<b>Fangos activados - Aireación extendida</b>	0.8-1.2	40-45

Los lodos excedentes de los procesos de tratamiento de aguas residuales generalmente se encuentran en forma líquida. La composición mayoritaria de fangos es orgánica, con una amplia gama de contenidos de sólidos volátiles (50–80%), comúnmente del 75% al 80% de ST (Von Sperling y Gonçalves, 2007).

Los fangos residuales presentan diversidad de materias suspendidas y disueltas. Algunas de ellas con un alto valor agronómico como: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y en menor cantidad calcio (Ca), magnesio (Mg) y otros micronutrientes esenciales para las plantas; y otras con potencial contaminante como los metales pesados, entre ellos cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), los patógenos, y los contaminantes orgánicos.

La gestión de lodos de depuradora se ha convertido en un complejo problema ambiental principalmente por: (1) se producen grandes cantidades de lodos como residuos de los procesos de depuración de aguas residuales; (2) el tratamiento de los residuos sólidos resulta ser un inconveniente considerable en las EDAR; y (3) la disposición final de estos residuos debe inclinarse en un marco ambientalmente sostenible.

En España, las plantas de tratamiento de aguas residuales al ser catalogados como productores de residuos (fangos de depuradora) deben gestionarlos de forma apropiada, y deberán hacerlo de forma directa o indirectamente a través de gestores debidamente autorizados, todo ello conforme a lo que establece la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados

Promover la construcción de un mayor número de plantas de tratamiento de aguas residuales conlleva incrementar la generación de fangos de depuradora. En este aspecto, uno de los resultados observados indica que la producción de lodos ha aumentado en la Unión Europea por sobre el 50% desde 2005 (Fytili y Zabaniotou, 2008).

En España, específicamente en la Comunidad Valenciana, se conoce que a partir de 2013 ha existido un repunte de fangos excedentes de depuradoras de aguas residuales en servicio (Figura 1).

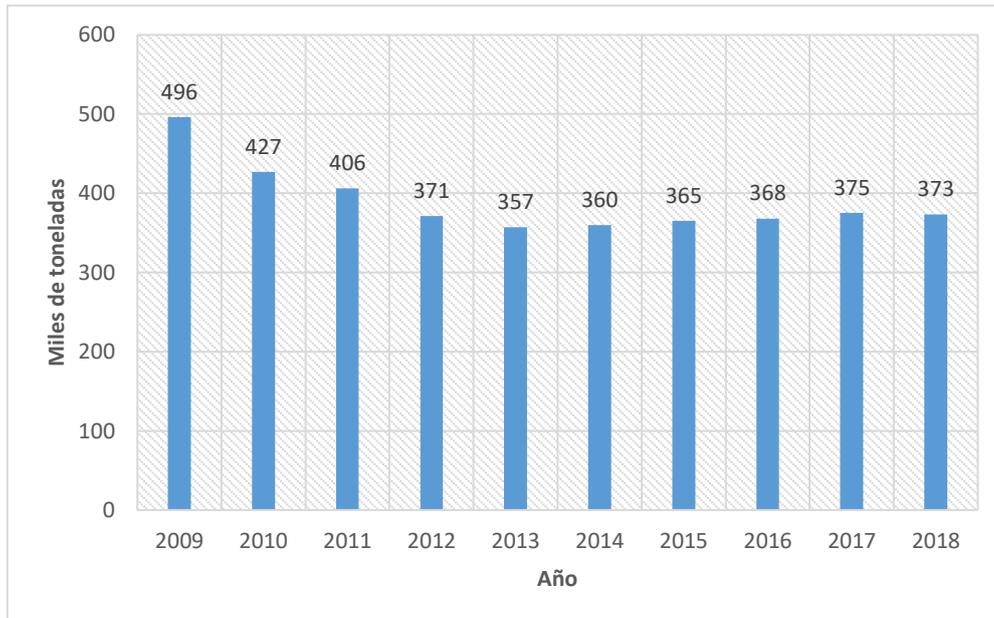


Figura 1. Fango evacuado. Fuente: Índices y ratios anuales EPSAR

Con respecto a la disposición de fangos, según datos del Registro Nacional de Lodos, en España ha primado como destino final la aplicación de estos residuos en la agricultura (aproximadamente el 80% de los generados). Se ha logrado reducir en gran medida el depósito en vertedero (aproximadamente el 8% actualmente), y la incineración va creciendo (en torno a un 4%). Otro destino de menor importancia cuantitativa que se informa es la aplicación de los lodos en suelos no agrícolas.

Los lodos pueden ser aplicados en los suelos agrícolas conforme a lo que establece el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuradora en el sector agrario.

De lo anterior se reconoce que los fangos de depuradora son mayoritariamente valorados en aplicaciones agrícolas; por lo tanto, los sistemas de tratamiento de lodos deberían proporcionar un producto final adecuado para el uso en el campo de la agricultura cumpliendo con los requisitos de la legislación, con costos razonables de inversión, operación y mantenimiento.

Es común observar que en la línea de fango de las EDAR se utilice tecnologías convencionales para los procesos de deshidratación y estabilización, fases imprescindibles para la aplicación correcta de lodo en agricultura; centrífugas, filtros

prensa, filtros banda o eras de secado más tratamientos de compostaje, representan una combinación habitual que ha sido empleada desde el siglo XX.

En el campo estricto del tratamiento de aguas residuales existen hoy en día sistemas de depuración mediante tecnologías no convencionales de bajo coste, cuya diferencia con los sistemas de tratamiento convencional es la velocidad de los procesos de tratamiento, 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).

Para el tratamiento de lodos líquidos también resulta interesante aplicar esta clase de tecnologías que garanticen una mejor gestión de los fangos de depuradora. En este sentido, los humedales artificiales para el tratamiento de lodos se consideran una tecnología sostenible para el manejo de lodos desde un punto de vista económico y ambiental (Uggetti et al., 2011).

Por lo indicado se plantea el tratamiento de lodos mediante tecnologías caracterizadas por un bajo o nulo consumo energético, soluciones que como se acaba de mencionar, ya se emplea con éxito en la línea de agua de depuradoras. Básicamente se plantea la utilización de humedales artificiales también conocidos como lechos de carrizo de secado de lodos; estos lechos son similares en apariencia a los humedales artificiales de tipo subsuperficial, que consisten en canales o trincheras llenas de arena o grava para soportar la vegetación emergente. La diferencia entre los lechos de carrizo utilizados para el tratamiento de fangos y los humedales de flujo subsuperficial es que el influente se aplica sobre la superficie de los lechos (en comparación con la aplicación subsuperficial que generalmente es lateral) y el filtrado fluye a través de la grava hacia los desagües. El producto de este sistema es una capa de fango deshidratado y estabilizado con un alto potencial para su aplicabilidad en tierras agrícolas.

## 2. Objetivos

El objetivo es hacer una revisión de la viabilidad de la implementación de humedales artificiales en la deshidratación de fangos y, diseñar, como ejemplo de aplicación, un humedal artificial para el tratamiento de lodos líquidos generados en la operación de la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Vall Dels Alcalans, ubicada en el municipio de Monserrat (Valencia).

Para alcanzar el objetivo planteado se ha trazado un plan de acción que contempla una serie de objetivos y actividades a desarrollar de manera que se consiga todos los fundamentos necesarios para que el presente trabajo colabore con la extensión del conocimiento de esta tecnología y su aplicación a escala real.

Estos objetivos propuestos se enfocarán en realizar lo siguiente:

- Revisión bibliográfica de casos de estudio exitosos en Europa.
- Selección de los parámetros principales de diseño para un correcto diseño.
- Análisis de las ventajas y desventajas frente a otras tecnologías.
- Dimensionamiento del sistema aplicado en la EDAR Vall Dels Alcalans.



### 3. Tratamiento de lodos

Con carácter general los lodos se tratan en la misma estación depuradora en la denominada línea de fango. Los métodos de tratamiento de lodos pueden estar orientados fundamentalmente a conseguir dos objetivos bien diferenciados entre sí. El primer objetivo busca reducir el volumen de lodos líquidos generados mediante la eliminación de agua para conseguir un mejor manejo y posterior tratamiento de los fangos residuales.

El segundo objetivo clave es la reducción de la fracción biodegradable de la materia orgánica presente en los biosólidos. Este fin se lo consigue empleado una serie de tratamientos que llevan a cabo una estabilización de los fangos formados, es decir, los someten a un tratamiento que da lugar a un producto adecuado para su uso posterior, reduciendo su capacidad de fermentación y la presencia de organismos patógenos (Haubry, 1992).

Los procesos utilizados más comúnmente para el tratamiento de lodos incluyen: 1) operaciones preliminares como almacenamiento y cribado; 2) espesamiento; 3) estabilización; 4) acondicionamiento; 5) deshidratación, como se puede observar en la figura 2 (Uggetti, 2011).

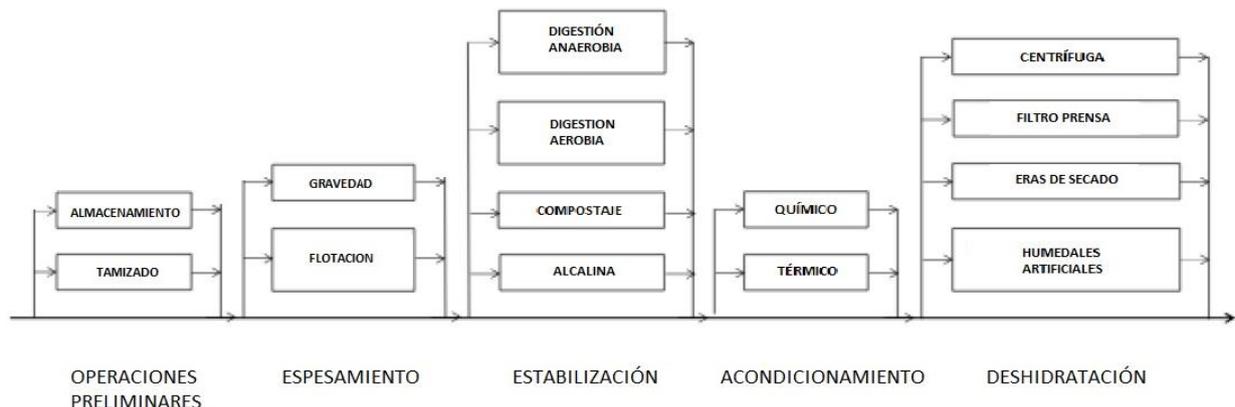


Figura 2. Procesos generales en el tratamiento de lodo (adaptado de Metcalf y Eddy, 2003)

### **3.1. Operaciones preliminares**

Los procesos preliminares son necesarios para remover plásticos u otros materiales no deseados y así formar un fluido relativamente constante y homogéneo, de esta manera se aporta para obtener mejores resultados en los siguientes procesos.

### **3.2. Espesamiento del lodo**

El espesamiento es un proceso utilizado para aumentar el contenido de sólidos totales del lodo removiendo una fracción de la parte líquida. En esta fase del tratamiento el volumen de lodo es reducido en 2 a 3% del volumen original. El espesamiento puede ser realizado en tanques sedimentadores que operan a gravedad o por flotación.

### **3.3. Estabilización del lodo**

Los procesos de estabilización tienen como fin inhibir o reducir el potencial de putrefacción, eliminar olores y reducir el contenido de patógenos. Estos procesos actúan sobre la fracción orgánica o volátil de los sólidos mejorando la deshidratación de los fangos y produciendo metano como fuente de energía. La digestión anaerobia y aerobia, el compostaje y la estabilización alcalina son los principales métodos empleados para este tipo de tratamiento de lodos en estaciones depuradoras generalmente medianas y grandes debido a los costos elevados de inversión, operación y mantenimiento.

La digestión anaerobia y aerobia consiste básicamente en la degradación biológica de la materia orgánica por medio de microorganismos bajo condiciones anaerobias o aerobias. En la digestión anaerobia, la fracción orgánica se biodegrada a través de un complejo proceso microbiológico anaeróbico que conduce a la producción de un material orgánico más estabilizado y biogás con alto contenido de metano y moderado contenido de dióxido de carbono, que se puede usar para generar calor o energía. Por otro lado, en la digestión aerobia los microorganismos aerobios son los responsables de la degradación de la materia orgánica en un reactor óxido. El proceso de estabilización en este caso es normalmente más rápido que en condiciones anaeróbicas, pero con mayores requerimientos de energía. La digestión puede conducir a un producto final con una concentración de sólidos volátiles alrededor del 50 – 60 %.

El compostaje se puede usar como un proceso de estabilización único o después de un proceso de digestión anaerobia o aerobia, para mejorar la calidad de los biosólidos. En este proceso, el lodo semi tratado se mezcla con algún soporte orgánico, como virutas de madera o aserrín, con el objetivo de mejorar la descomposición de material orgánico en un producto final estable adecuado para ser transportados y posterior aplicación en terreno agrícola.

Aproximadamente del 20 al 30% del material volátil presente en el fango se convierte en dióxido de carbono y agua. Durante el proceso de compostaje, los patógenos se eliminan debido a las altas temperaturas alcanzadas, las que pueden llegar hasta 50 o inclusive 70 °C.

La estabilización alcalina hace que el lodo no sea adecuado para la supervivencia de los microorganismos. Generalmente se agrega cal al fango no tratado, aumentando el pH para detener o retardar reacciones biológicas. El proceso también puede inactivar virus, bacterias y otros microorganismos presentes.

#### **3.4. Acondicionamiento de lodos**

En ocasiones es necesario acondicionar al lodo para mejorar sus características y su deshidratación posterior. El tratamiento puede ser químico o térmico. La vía química consiste en la adición de coagulantes tales como cloruro férrico, cal, sulfato de aluminio o polímeros orgánicos, que conducen a la desestabilización de partículas y a la correspondiente desorción de agua. Por otra parte, el acondicionamiento térmico se logra calentando el lodo durante breves períodos y bajo presión, que da como resultado la coagulación de sólidos, y la reducción de la afinidad del fango por el agua, junto con la esterilización del lodo.

#### **3.5. Deshidratación de lodos**

La deshidratación de lodos se utiliza principalmente para reducir el contenido de agua, facilitar el manejo de lodos y reducir los costos de transporte. Se utilizan varias tecnologías como sistemas de eliminación de la humedad presente en los lodos, varios sistemas operan de forma que la deshidratación es asistida mecánicamente (centrifugación o filtro prensa), mientras que otros dependen de la evaporación natural y la percolación (lechos de secado o humedales de tratamiento de lodos).

La centrifugación se usa ampliamente para forzar la separación sólido / líquido por la fuerza centrífuga. Una etapa rápida de concentración de partículas sólidas es seguida por una compactación bajo la acción prolongada de centrifugación. Los biosólidos resultantes forman una torta con 14 a 40% de sólidos totales, dependiendo de la fuente de lodo (Von Sperling y Gonçalves, 2007). Este producto puede ser vertido o postratado antes de su reutilización. Los principales inconvenientes de este tratamiento son los altos requerimientos de energía y costos de mantenimiento.

Los filtros prensa son un sistema de separación de agua que funciona ejerciendo presión directamente al lodo a tratar. De los sistemas mecánicos utilizados habitualmente, el filtro prensa es el que obtiene mayor sequedad del lodo, al ser un sistema que permite presiones efectivas muy elevadas. Se requiere personal especializado y cualificado para su operación y mantenimiento.

Las camas de secado consisten en tanques de concreto o depósitos impermeabilizados en suelo natural, generalmente rectangulares. El lodo estabilizado se extiende sobre el medio filtrante, hecho con arena y grava; los sólidos quedan retenidos en la superficie del medio granular mientras que el contenido de agua se reduce por filtración. Las camas de secado tienen una operación simple y generalmente se usan para deshidratar lodos digeridos y sedimentados.

Los humedales de tratamiento de lodos es una técnica relativamente nueva que combina camas de secado y humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Las investigaciones realizadas en esta última década han concluido que existe una aplicabilidad potencial de estos sistemas de tratamiento de lodos en estaciones depuradoras de aguas residuales en Europa.

### 3.6. Tecnologías de tratamiento de lodo de bajo coste.

#### 3.6.1. Eras de secado.

Las eras de secado son un tratamiento de deshidratación “in situ” de lodos sin necesidad de procesos de espesamiento previo. Es un tratamiento relativamente económico que no requiere un aporte de energía.

Existen cinco tipos de eras de secado: convencionales de arena, pavimentadas, de medio artificial, por vacío y solares. Las más extendidas y aplicadas generalmente son las camas convencionales de arena o camas de material granular (Metcalf y Eddy, 2003)

##### 3.6.1.1. Eras de secado de arena

Este tipo de era de secado es empleado para pequeñas y medianas poblaciones. Para localidades donde la población supera los 20.000 habitantes debería considerarse otras alternativas para el tratamiento de lodos debido a que, en las grandes comunidades, los costos de inversión, el costo de remoción del producto y reemplazo de arena, y sobre todo el considerable requerimiento de superficie son las principales limitaciones para la no aplicación de eras de secado.

La Entidad de Saneamiento de Agua de la Comunidad Valenciana (EPSAR) indica que hasta el año 2018, existen 251 estaciones depuradoras de aguas residuales con sistemas de eras de secado convencionales para la deshidratación de fangos líquidos (figura 3), es decir, el 44.3% de la totalidad de depuradoras en servicio (485).



Figura 3. Sistema de eras de secado en EDAR Almudaina – España. Fuente: EPSAR

En la práctica, 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 para permitir el proceso de secado. 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 4.

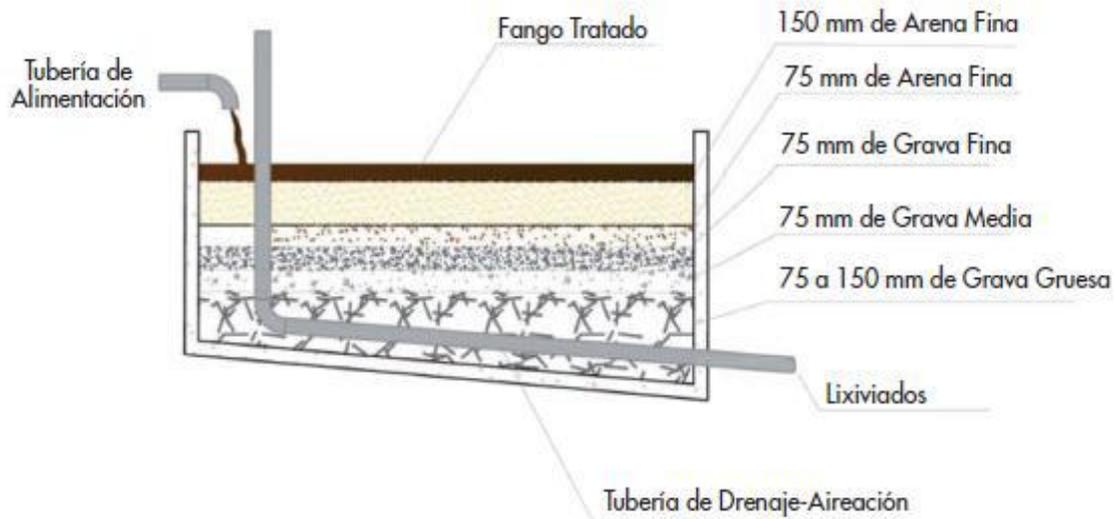


Figura 4. Sección transversal de una era de secado. (adaptado de Metcalf y Eddy, 2003).

La deshidratación de los fangos en las eras se logra mediante drenaje (filtración) y evaporación en dos etapas, así:

- 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. La concentración de sólidos podría llegar hasta un 20%.
- 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 generarse grietas cada vez más profundas. Al final de esta fase, el fango tendrá una consistencia tal que le permitirá ser manejable, alcanzándose niveles de sequedad del 40-60% después de 10 a 15 días bajo 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, dispuesta 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 la fracción acuosa del 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 a reponer parte de la arena cada cierto tiempo.

El dimensionamiento de las eras puede hacerse con base a diferentes criterios. Uno de ellos es considerando el número de habitantes por metro cuadrado y, por otro lado, es posible basarse en la producción anual de lodos por metro cuadrado. El rango de valores empleados para ambos criterios dependerá del tipo de lodos líquidos (tabla 2).

*Tabla 2. Requerimiento de área para eras de secado de acuerdo al tipo de fango.*

Tipo de Fangos	Criterio de Área m <sup>2</sup> /habitante	Tasa de carga de lodo kg ST/m <sup>2</sup> *año
<b>Digeridos primarios</b>	0.1	120-150
<b>Digeridos primarios y precipitados químicamente</b>	0.16-0.23	60-100
<b>Digeridos primarios y secundarios</b>	0.19-0.23	100-160

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.

### **3.6.2. Humedales artificiales de tratamiento de lodos**

Hasta este momento, la combinación de lechos tradicionales de secado de arena con humedales artificiales de flujo vertical condujo a los denominados sistemas de Lechos de Carrizo de Secado de Lodos (en inglés reciben el nombre de Sludge Drying Reed Bed, SDRB), o simplemente Humedales de Tratamiento de Lodos (en inglés Sludge Treatment Wetlands, STW).

Aunque los humedales artificiales de flujo vertical se han empleado para el tratamiento de aguas residuales durante décadas, los sistemas de tratamiento de lodos mediante humedales artificiales son menos numerosos. La bibliografía registra que el lecho de carrizo de secado de lodos fue desarrollado por primera vez en Dinamarca (Nielsen, 1990); hoy en día este sistema es empleado en todo el mundo (figura 5).



*Figura 5. Lechos de carrizo de secado de lodos de la EDAR Gilleleje - Dinamarca.*

*Fuente: [www.orbicon.com](http://www.orbicon.com)*

El proceso comúnmente evaluado ha sido la deshidratación (es decir, percolación y evapotranspiración), el cual permite la reducción del volumen de lodos a corto y mediano plazo, considerando que habitualmente los fangos influentes presentan un elevado contenido de agua. Sin embargo, el proceso de deshidratación del sistema depende de muchos factores, incluida la fuente y composición del lodo influente, las condiciones climáticas, el viento, y la vegetación.

El sistema de STW lo conforman un cierto número de cuencas o depósitos construidos, que pueden ser en estructura de hormigón rectangular o una excavación en el terreno debidamente impermeabilizada para sellar la cama y evitar la lixiviación; este depósito está lleno de un medio granular, por encima del medio granular se dispone una capa de arena para impedir que el lodo se introduzca en el medio y lo obstruya. En el medio granular hay plantados macrófitos típicos de entornos fluviales como el carrizo.

En la parte inferior es recomendable dejar una pendiente mínima del 1% para facilitar la recolección de lixiviados a través de una serie de tuberías perforadas, que se colocan a lo largo del fondo del lecho. Estas tuberías también mejoran las condiciones aeróbicas a través del filtro de grava y las capas de lodo, promoviendo probablemente la mineralización de lodos por actividad biológica (es decir, microorganismos, lombrices de tierra). Además de los tubos de aireación, varios estudios concluyen que parte del oxígeno que ingresa al sistema provienen de grietas por contracción en la

superficie del lodo (Nielsen y Willoughby, 2005) y liberación de oxígeno por las raíces (Armstrong et al., 2006).

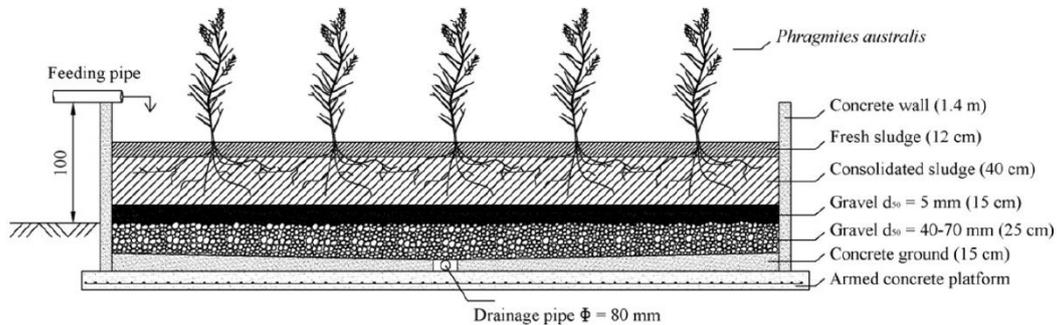


Figura 6. Sección transversal de un STW. Fuente: Bianchi et al., 2011

El procedimiento de operación del sistema inicia con la alimentación de lodo por medio de tuberías que pueden ubicarse en una esquina de la cama, a lo largo de uno de los lados de la cama o en el centro de la cuenca (tuberías verticales de flujo ascendente). La alimentación se realiza de forma discontinua y por lotes, es decir, se alimenta con lodo cada vez a una de las camas durante un período de alimentación que puede durar de 1 a 2 días (o incluso de 1 a 2 semanas). Una vez transcurrido del período de alimentación, la cama descansa y el lodo se deshidrata (figura 6), mientras que el fango influente se descarga a otra cuenca. Los períodos de descanso pueden durar algunos días o semanas, dependiendo de la capacidad de tratamiento, las condiciones climáticas, la edad del sistema, el contenido de materia seca y el espesor de los lodos (Nielsen, 2003).

En el siguiente ciclo, los lodos influentes se distribuyen nuevamente sobre la capa residual durante similar período de alimentación y se deshidratan durante el tiempo de descanso posterior. Al aumentar el número de camas en el sistema es posible establecer series de rotación más largas y, por lo tanto, períodos de descanso más largos, lo que aumenta la sequedad del residuo de lodo.

Durante los períodos de reposo, los fangos almacenados forman una película superficial seca que se agrieta debido a contracciones por temperatura y movimiento de los tallos vegetales debido a la acción del viento. Las fracturas en la capa de lodo mejoran la evaporación del agua y la transferencia de oxígeno, lo que promueve una porosidad más uniforme a lo largo del lecho y la mineralización del lodo en el nivel inferior. Como en la operación se alternan períodos de alimentación y períodos de

reposo es conveniente disponer de varias camas de manera que siempre existan lechos disponibles para efectuar las alimentaciones mientras el resto de las unidades están en periodo de reposo.

La altura de la capa de lodo de las camas aumenta a un cierto ritmo, y cuando la capa se acerca a la altura máxima del humedal, la alimentación se detiene durante un período de descanso final.

El producto generado se retira posteriormente (es decir, con una pala mecánica). Se debe prestar atención a no retirar la capa inferior de residuo de lodo en la cual las raíces de plantas restantes regenerarán la vegetación sin requerir replantación (Nielsen, 2003).

La presencia de vegetación emergente tiene una especial relevancia en el funcionamiento del sistema gracias a la evapotranspiración. A lo largo de los primeros días la pérdida de humedad se produce principalmente por la percolación hacia el medio filtrante ya que el lodo tiene una alta porosidad y las presiones intersticiales se disipan fácilmente; a medida que pasan los días, la porosidad del fango va disminuyendo, las presiones intersticiales se disipan más lentamente y la evapotranspiración pasa a ser la principal responsable de la deshidratación.

En aquel sentido, las plantas utilizadas (*Phragmites australis*, *Typha* sp., *Cyperus papyrus* L., o *Echinochloa pyramidalis*), ofrecen unos buenos resultados dada su alta capacidad de evapotranspiración. Cabe indicar que, aunque inicialmente la vegetación está plantada en la capa superior del medio granular, durante la operación del humedal el sistema de raíces se expande por la capa de fango. Las raíces se distribuyen así por toda la profundidad del lodo ejerciendo una succión distribuida sobre esta, a diferencia de otros sistemas como las eras de secado donde toda el agua que se evapora debe atravesar la superficie en la que se suele crear una costra que dificulta el proceso. Estas plantas tienen una gran resistencia a varias condiciones, presencia de sales, contaminantes, microorganismos, etc. (Obolewski et al., 2011).

En la tabla 3, se resume los principales parámetros de diseño y operación propuestos de acuerdo a experiencias basadas en investigaciones realizadas desde 1988 hasta 2012 en Dinamarca.

Tabla 3. Principales parámetros propuestos para SDRB. Fuente: Nielsen, 2012.

Parámetros	Valores recomendados
<b>Máxima tasa de carga de lodos para EDAR con tratamiento biológico de fangos activados</b>	30 – 60
<b>Mínimo número de camas</b>	8-10
<b>Altura de camas sobre la superficie del filtro (m)</b>	1.7-1.8
<b>Altura de acumulación de lodos (m)</b>	1.5-1.6
<b>Altura de seguridad (m)</b>	0.2
<b>Altura de medio filtrante (m)</b>	0.55-0.60
<b>Tiempo de almacenamiento de lodo (años)</b>	8-10

Las recomendaciones en cuanto a la tasa de carga de lodo están entre 30 – 60 kgST/m<sup>2</sup>\*año, sin embargo, se conoce que los primeros sistemas de humedales exitosos fueron operados en un rango de 10 – 30 kgST/m<sup>2</sup>\*año (Nielsen, 2003).

Por lo tanto, el primer rango haría referencia a valores máximos que se podría utilizar para el diseño u operación de humedales construidos. Es probable que los valores inferiores se deban a que el conocimiento provenga de sistemas bajo condiciones climáticas templadas, mientras que los valores altos sean debido a que los sistemas se localizaron bajo un clima semi templado.

La eficiencia de humedales en términos de deshidratación, proporcionado por drenaje y evapotranspiración del agua, ha sido registrada y se informa que el contenido de sólidos totales fue de 20 – 37% (valores máximos) en el producto generado. En el estudio se evaluaron nueve sistemas a gran escala (Nielsen, 2011).

En este punto, es importante investigar probables experiencias de humedales artificiales para el tratamiento de lodos en otras regiones de Europa para así analizar la aplicabilidad de esta nueva tecnología a escala real.

## Investigación en la Región Mediterránea

La bibliografía indica que, en países de Europa, como Dinamarca y Alemania, han desarrollado trabajos de investigación sobre los humedales de tratamiento de lodos aproximadamente hace dos décadas. Sin embargo, este apartado resume el conocimiento de estos sistemas de tratamiento que fueron influenciados por las características exclusivas del mediterráneo, resaltando los principales criterios.

### 3.7. España

El resultado del conocimiento se puede apreciar en la tesis doctoral de Enrica Uggetti denominada “Sewage Sludge Treatment in constructed wetlands” donde se analizó aspectos técnicos, económicos y medio ambientales del tratamiento de lodos mediante humedales artificiales, con aplicación a pequeñas comunidades de la Región Mediterránea de España (figura 7).



*Figura 7. Lechos de carrizo en sistemas a gran escala en España.*

#### *Condiciones climáticas*

El trabajo realizado en Cataluña informa que la temperatura media en la zona de estudio fue de 6 ° C en invierno y de 20 ° C en verano. No se indica registros de precipitaciones en cada sistema estudiado.

#### *Tasa de carga de lodo*

El estudio se refiere a este parámetro como imprescindible en el diseño de un humedal artificial, pues éste determina el requerimiento de superficie del sistema.

En tres investigaciones realizadas a escala real se estudió la influencia de la tasa de carga de lodo en el desempeño del sistema de humedales específicamente en términos de deshidratación y estabilización del fango (tabla 4)

*Tabla 4. Resultados y criterios empleados en diferentes sistemas de SDRB en España.*

	<b>Esp. 1</b>	<b>Esp. 2</b>	<b>Esp. 3</b>
<b>EDAR</b>	Alpens	Sant Boi de Lluçanes	Seva
<b>Población Equivalente (he)</b>	400 (800 diseño)	600 (1500 diseño)	1500
<b>%ST en fango generado</b>	1-3	1-3	1-3
<b>Producción de fango (kg ST/d)</b>	30	45	60
<b>Número de camas</b>	3	6	7
<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	198	324	175
<b>Superficie por cama (m<sup>2</sup>)</b>	66	54	25
<b>Tasa de carga (kg ST/m<sup>2</sup>*año)</b>	55	51	125
<b>Flujo de fango en humedales (m<sup>3</sup>/d)</b>	2	3	4.5
<b>Carga Hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>*d)</b>	0.030	0.056	0.180
<b>%ST en capa superior (fango almacenado)</b>	7-26	7-26	18-23
<b>%ST en capa inferior (fango almacenado)</b>	20-30	20-30	11-13

Los valores de este parámetro en términos de materia seca fueron de 50, 55 y 125 kgST/m<sup>2</sup>\*año, tal como se puede observar en la tabla 3. Los resultados determinaron una buena eficiencia de los sistemas de tratamiento de lodo, sin embargo, el autor concluye que el rango entre 50 y 60 kgST/m<sup>2</sup>\*año parece ser el apropiado para sistemas dentro de la Región Mediterránea y resalta que actualmente el valor usado para el diseño de humedales para el tratamiento de fangos líquidos en el continente europeo es igual a 60 kgST/m<sup>2</sup>\*año.

### *Frecuencia de alimentación*

Para todos los sistemas se informa que las alimentaciones de lodo se realizaban considerando una cama a la vez, mientras que las demás unidades se mantenían drenando. En Esp. 1 y Esp. 2 las camas fueron alimentadas durante 2 días, seguidos de 4 días de reposo para Esp. 1 y 10 días de descanso para Esp. 2. No se informa variación alguna en la frecuencia de alimentación debido a cambios estacionales. En Esp. 3, debido al sistema de alimentación manual empleado no se pudo definir un patrón de carga regular.

### *Carga Hidráulica*

El flujo de lodo asignado por cama en cada punto de estudio se presenta en la tabla 4, de acuerdo a la información provista se puede estimar que para Esp. 1, Esp. 2 y Esp. 3 se tendría una carga hidráulica por superficie igual a 0.030, 0.056 y 0.18 m/d. La autora no informa sobre la variación de este en la influencia de la eficiencia de los sistemas.

### *Superficie*

La superficie requerida para la implementación de un humedal artificial para el tratamiento de lodos de depuradora está en función de la tasa de carga de lodo y de la producción de fango, la cual está estrictamente relacionada con el tratamiento de agua residual empleado. La autora propone la ecuación 1 para el cálculo de la superficie.

$$Superficie = \frac{Producción\ de\ Lodo\ \left(\frac{kgST}{año}\right)}{Tasa\ de\ Carga\ de\ Lodo\ \left(\frac{kgST}{m^2 \cdot año}\right)} \quad (Ec. 1)$$

### *Número de camas*

La autora recomienda para pequeñas comunidades (< 2.000 habitantes) que el número de camas sea al menos cuatro de manera que exista una mínima alternancia en la alimentación y reposo. Un mayor número de camas aumenta el tiempo de reposo entre alimentaciones, lo que representa un mejor desempeño del sistema de

tratamiento pues de acuerdo con la autora “Los sistemas con períodos de descanso cortos muestran una deshidratación lenta y un contenido permanente de agua en la superficie del lodo, lo que lleva a un rápido crecimiento de la capa de lodo y las condiciones anaeróbicas con la consecuente emisión de olores”.

### *Calado*

Los sistemas de humedales pueden ser construidos con muros de concreto o mediante excavación en suelo, independiente del tipo constructivo la base de las camas deben ser impermeabilizadas para sellar la superficie de contacto con el suelo y evitar escurrimiento de lixiviados.

La dimensión del calado determina el espesor de lodo que puede ser acumulado en la cama. De acuerdo a la experiencia obtenida, con unidades construidas en hormigón, el autor en su apartado correspondiente recomienda que el calado debe estar entre 1.60 a 1.70 m, considerando 1.00 m como máximo espesor de lodo almacenado ya deshidratado, contando con 0.50 m correspondiente a la altura del material filtrante y finalmente 0.20 m como margen de seguridad.

Generalmente, la capa de lodo aumenta alrededor de 0.10 m/año, por lo tanto 1.00 m de altura de lodo almacenado podría asegurar que el sistema de tratamiento de fango mediante humedales artificiales funcione durante 8 - 10 años.

### *Tuberías de alimentación y drenaje*

La configuración del sistema de tuberías para alimentación de lodo en los humedales recomendada es el de tuberías dispuestas de forma vertical, una en la mitad de cada lado de la cuenca, debido a que permite una distribución más homogénea del lodo influente sobre toda la cama. De acuerdo con el análisis del autor, a pesar del alto contenido de agua del lodo influente, la alimentación de fango líquido provista desde una esquina o a lo largo de un solo lado de la cama, a menudo no proporciona una buena distribución de lodo.

Resulta necesario considerar un sistema de tuberías perforadas localizadas bajo el medio filtrante que cumplirán dos objetivos: el primero es recolectar el agua drenada por la capa filtrante para posteriormente ser conducida a cabecera de la línea de agua de la EDAR y, el segundo objetivo es aportar con oxígeno al humedal de manera que exista una aireación sin requisito de energía.

En España normalmente se colocan tuberías horizontales cada dos o tres metros dependiendo del ancho del humedal; la autora recomienda que el sistema horizontal de tuberías debe estar constituido por tres conductos dispuestos en el sentido largo de la cama.

### *Medio Filtrante*

La autora señala que la función principal del filtro es separar los sólidos de la fracción líquida de los fangos, mediante el drenaje de agua a través del medio filtrante, el cual fue constituido por varias capas de material granular dispuestos de tal forma que aumentan en altura desde arriba hacia abajo. Una capa de piedra (diámetro aproximado 5 cm) se localiza en la parte inferior de la cama para protección el sistema de tuberías de drenaje, luego se almacena una capa de grava (diámetro de 2 a 10 mm) que representa la capa principal del medio granular y, finalmente se coloca una capa de arena (diámetro de 0.5 a 1 mm) la cual provee una filtración física preliminar y sirve como medio de enraizamiento para la vegetación.

Un medio granular recomendado esta entre 30 – 60 cm, compuesto por una capa de piedra con altura de 15 – 20 cm, una capa de grava de 20 – 30 cm y una capa de arena entre 5 – 10 cm. La autora concluye la no dependencia de la altura del medio filtrante con la eficiencia del tratamiento de lodos en su investigación.

### *Especie de planta*

La vegetación dentro de un humedal para el tratamiento de lodos juega un papel clave para los procesos de deshidratación y estabilización, tal como se ha indicado anteriormente. La flora empleada para este tipo de sistemas debe tolerar cambios considerables de la disponibilidad de agua, salinidad y pH.

La especie vegetal más común empleada para este tipo de sistemas en Europa ha sido *Phragmites australis*. Los tres sistemas a gran escala analizados en Cataluña fueron plantados con esta especie de carrizo común.

Otra especie de planta fue estudiada en un sistema a escala piloto por el autor. *Typha sp* fue puesta en investigación para determinar su influencia en un sistema de tratamiento de lodo mediante humedales artificiales, debido a su elevada evapotranspiración y su conocida disponibilidad en la región Mediterránea. La investigación determinó que existen comparables eficiencias entre *Phragmites australis* y *Typha sp* en términos de deshidratación y estabilización, además se evidenció que, transcurrido más de dos años de operación de los sistemas, ambas especies demostraron un aceptable crecimiento.

### **3.8. Grecia**

La experiencia de investigaciones realizadas en Grecia proviene de una serie de experimentos realizados en sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de lodos de depuradora a escala piloto (figura 8). Los estudios resaltan que todos los experimentos se realizaron bajo condiciones climáticas típicas del clima mediterráneo. A continuación, se presentan las recomendaciones propuestas:

#### *Condiciones climáticas*

El estudio informa que el registro de las condiciones meteorológicas se lo realizó mediante una estación meteorológica propia por lo que sus valores se obtuvieron en sitio. La temperatura media anual fue de 16.3 ° C, con valores mínimos y máximos igual a -2.5 ° C y 38.5 ° C, respectivamente. La precipitación acumulada anual fue de 785.8 mm (Stefanakis et al., 2011).



*Figura 8. Lechos de carrizo en sistemas a escala piloto en Grecia.*

#### *Tasa de carga de lodo*

Las unidades a escala piloto experimentadas recibieron fango bajo tres tasas de carga de lodo diferentes en términos de materia seca: 30, 60 y 75 kgST/m<sup>2</sup>\*año. Los resultados en cuanto a deshidratación publicados se consideran aceptables debido a que se consiguieron valores entre 15.9 – 31.7 % de contenido de sólidos totales en los fangos tratados, lo que relacionado con el valor medio de los lodos influentes que fue de 3.19 % representa un aumento de la concentración de sólidos considerable.

La recomendación publicada en cuanto a este criterio de diseño indica que para un óptimo proceso de evapotranspiración y crecimiento de la vegetación, la tasa de carga de lodo podría exceder el más alto de 75 kgST/m<sup>2</sup>\*año probado en la investigación (es decir, alcanzar 80 o 90 kgST/m<sup>2</sup>\*año). Finalmente, los autores resaltan que las tasas de carga inferiores a 60 kgST/m<sup>2</sup>\*año podrían conducir a la inanición del agua de la vegetación (Stefanakis et al., 2011).

#### *Frecuencia de alimentación*

La experiencia informa que el lodo líquido era introducido a las unidades en ciclos de carga, un período de alimentación de 7 días en porciones diarias iguales, seguido de un período de descanso principalmente de 1 a 3 semanas de acuerdo a la temporada

según se indica. Sin embargo, observada la información de frecuencia de alimentación no existe un patrón definido para el periodo de reposo para cada cambio estacional, pues su variabilidad es considerable (Stefanakis et al., 2011).

### *Carga Hidráulica*

La carga hidráulica o caudal de lodo líquido por unidad de superficie empleado para la alimentación de los sistemas fueron 0.068, 1.32 y 1.63 cm/d para la tasa de carga de fango baja, media y alta, respectivamente (Stefanakis et al., 2012).

### *Superficie*

El área correspondiente a cada unidad estudiada fue la misma para todas ellas. El trabajo hace mención a una relación que debe existir entre habitante equivalente y superficie del sistema y, que va desde 1,5 – 4,0 he/m<sup>2</sup>, rango de valores en el cual se manejó la investigación (Stefanakis et al., 2011).

Por otro lado, para la determinación de la producción de fango se hace referencia a un rango comprendido entre 13 – 16 kgST/he\*año, valores que representan la producción de lodo de un habitante equivalente considerando un tratamiento convencional de aguas residuales primarias. El valor de 16 kgST/he\*año es el manifestado en el trabajo como recomendable (Stefanakis et al., 2009).

### *Número de camas*

Como la investigación fue realizado en sistemas a escala piloto, donde cada piloto representa una cama, no existen conclusiones con respecto al número de camas que se podrían considerar en la etapa de diseño.

### *Calado*

Los resultados de altura de la capa de lodo residual registrada en el estudio varía conforme a la tasa de carga de lodo considerado. Para valores de 30, 60 y 75

kgST/m<sup>2</sup>\*año la altura acumulada promedio de lodo deshidratado fue 3,0, 6,1 y 7,5 cm/año respectivamente.

Si se considera una altura libre para la acumulación de lodos residuales igual a 80 cm por encima del medio filtrante, el estudio concluye que el sistema podría operar durante 10 y 13 años para una tasa de carga de lodo correspondiente a 60 y 75 kgST/m<sup>2</sup>\*año. Para la tasa de carga de lodo más baja el trabajo predice que el sistema tendría un ciclo de vida de 26 años pero con el riesgo de operación que trae consigo, principalmente en términos de crecimiento de la vegetación (Stefanakis et al., 2012).

Para la determinación del calado del sistema a escala real faltaría considerar la altura del medio granular, detallado más adelante, y tal vez una altura de seguridad,

#### *Tuberías de alimentación y drenaje*

Las unidades estudiadas no presentaban tuberías de alimentación puesto que se trataban de humedales a escala piloto y la alimentación se lo realizaba de forma manual.

En la investigación se estudió la influencia de colocar tubos de aireación y la ausencia de estas en las unidades construidas. El diámetro de los tubos fue de 50 mm y estaban perforados dentro de la capa inferior de drenaje.

En la fase de experimentación solo una unidad no contaba con tubos de aireación mientras que las demás si fueron construidas con este sistema. La unidad que no poseía tubos de aireación probablemente favoreció la generación de condiciones anaeróbicas en la zona de la raíz y, por lo tanto, se asume esta la causa para que los carrizos plantados se hayan secado y muerto.

La investigación concluye que la presencia de tubos de aireación parece inducir una corriente de aire a lo largo de las capas inferiores del lecho, que también ayuda a un mejor crecimiento del carrizo en un ambiente bien aireado. Con base en lo mencionado, se puede afirmar que la aireación mejorada de humedal ayuda al crecimiento de la planta y, por lo tanto, mejora indirectamente la eficiencia de deshidratación en las camas plantadas (Stefanakis et al., 2012).

### *Medio Filtrante*

Las unidades estudiadas fueron construidas con 40 cm de medio filtrante. Considerando el sentido ascendente de abajo hacia arriba, la primera capa estuvo conformada por 10 cm de piedra ( $D_{50}=90$  mm) dispuestos de tal forma que el autor señala adecuado para el drenaje del agua. La segunda capa consistía en 15 cm de grava gruesa (diámetro 24.4 mm) y finalmente 15 cm de grava fina ( $D_{50} = 6$  mm).

Los resultados fueron comparados con una unidad constituida por 25 cm de piedra en la parte inferior y 15 cm de grava gruesa (diámetro 24.4 mm), es decir, una cama sin grava fina en su parte superior.

Bajo la misma tasa de carga de lodo, el experimento con material fino en la parte superior del humedal presentó valores más altos de evapotranspiración en comparación con el humedal que no tenía material fino. La explicación se debe probablemente a que la unidad con material granular grueso y sin capa de material fino presentó una mayor porosidad, lo que conlleva a un mayor volumen de poros, lo que resulta en un drenaje de volumen de agua más rápido al fondo de la unidad. Por lo tanto, un volumen de agua más bajo estuvo disponible para la evaporación y la transpiración del carrizo en la unidad carente de material fino (Stefanakis et al., 2012).

### *Especie de planta*

En la investigación se utilizaron dos especies de plantas, es decir, carrizos comunes (*Phragmites australis*) y enea (*Typha latifolia*), mientras que una unidad se mantuvo sin plantar. Esta variabilidad se lo hizo de manera que se pueda comparar los resultados en cuanto a deshidratación de lodo y eficiencia del sistema de humedales.

Las unidades vegetadas fueron plantadas con 14 brotes por metro cuadrado trasplantando plantas de fuentes de agua cercanas. Los resultados obtenidos concluyen que la vegetación en un sistema de humedales juega un papel importante en la deshidratación de fangos. De hecho, para que todo el proceso sea funcional, el uso de plantas es un componente clave y aunque la experiencia con la totora no pudo

estudiarse, debido a que sufrió estrés y se secó posteriormente, los resultados considerando carrizos comunes fueron importantes.

La presencia de carrizos en la investigación provocó el aumento de la evapotranspiración anual, lo que confirma el papel positivo que juega la vegetación plantada. El estudio atribuye lo indicado a la alta capacidad de transpiración del carrizo común y resalta que los carrizos absorben el contenido de agua del lodo a través de su sistema de raíces para emplearla en su propio crecimiento y, posteriormente, lo liberan a la atmósfera.

Otro parámetro que afecta al rendimiento del sistema es la biomasa vegetal, medida como materia orgánica producida por unidad de superficie. Los resultados demuestran un aumento de la biomasa vegetal conforme aumenta la tasa de carga de lodo, y por otro lado, se evidenció un incremento de la evapotranspiración a medida que la biomasa aumenta. Esto último significa que un mayor crecimiento de la planta da como resultado una mayor actividad del carrizo común y, por lo tanto, mayores valores de evapotranspiración.

La cantidad de agua drenada disminuye en las unidades plantadas haciendo notar que la vegetación utiliza la mayor parte del agua del fango influente y adicionalmente, se confirma que a medida que aumenta la biomasa vegetal producida, disminuye el volumen de agua drenada (Stefanakis et al., 2011).

### **3.9. Francia**

La búsqueda del conocimiento de sistemas de humedales para el tratamiento de lodos de depuradora en Francia proviene de investigaciones realizadas en experimentos a escala piloto principalmente (figura 9), donde se pudo modificar los parámetros a ser analizados en cada caso de estudio. En los apartados siguientes se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la experiencia francesa, así como resultados relevantes encontrados.

### Condiciones climáticas

La experiencia francesa informa que las condiciones climáticas fueron registradas in situ. La precipitación anual promedio fue de 592 mm, la temperatura media fue de  $8.1 \pm 4.8$  °C en invierno y  $18.4 \pm 3.4$  °C en verano (Vincent et al., 2011).

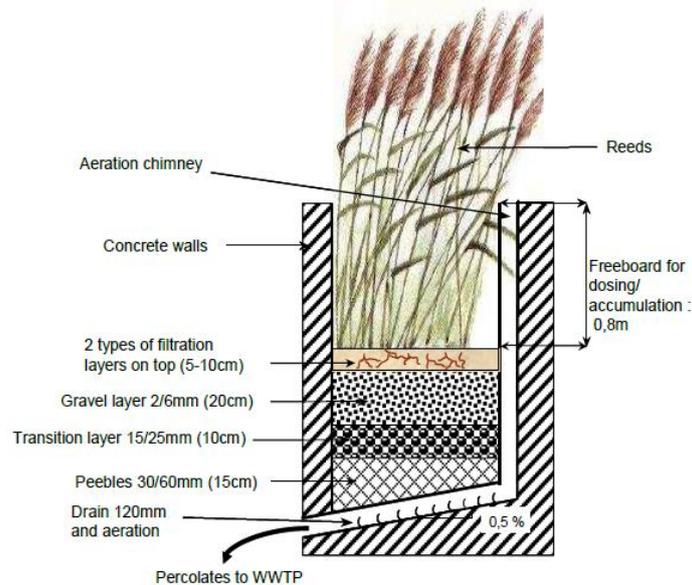


Figura 9. Lechos de carrizo en sistemas a escala piloto en Francia.

### Tasa de carga de lodo

La fuente de fangos provenía de una depuradora con tratamiento biológico mediante lodos activados con aireación extendida. Para los sistemas a escala piloto se han empleado tasas de carga de lodo de 30, 50 y 70 kgST/m<sup>2</sup>\*año, mostrando para los tres casos claras tendencias en el aumento de la sequedad de los fangos.

Sin embargo, aunque la carga aplicada no influyó en el camino de secado, sí influyó en el contenido de agua obtenido al final de un período de secado. El contenido final de agua aumentó con el aumento de las cargas del lodo, bajo duraciones de período de secado idénticas.

Uno de los resultados del estudio indica que existieron dificultades de aireación en las cargas de lodo más altas (es decir, 50 y 70 kgST/m<sup>2</sup>\*año), lo que se atribuye a que la presencia de humedad era mayor que un umbral de contenido de agua estudiado más allá del cual el aire no logra ingresar a los huecos porosos. El problema indicado podría haber conllevado a limitaciones en la mineralización aeróbica de la materia orgánica presente en los fangos.

De la experiencia a escala piloto se concluye que una tasa de carga de 50 kgST/m<sup>2</sup>\*año empieza a ser un limitante para las condiciones aireadas en la capa de fangos, mientras que un valor de 70 kgST/m<sup>2</sup>\*año podría bloquear la difusión de oxígeno, bajo la frecuencia de alimentación aplicada en el estudio (Vincent et al., 2012).

La experiencia a escala real fue realizada en una estación depuradora de aguas residuales con una capacidad de 13.000 he con tratamiento biológico mediante lodos activados en aireación extendida. La máxima tasa de carga de lodos empleada en la operación real del sistema de humedales para el tratamiento de lodos es de 80 kgST/m<sup>2</sup>\*año, pero para la investigación y monitoreo se emplearon diferentes camas con una tasa aproximada de 30 y 40 kgST/m<sup>2</sup>\*año.

Los resultados de las unidades con tasa de carga igual a 40 kgST/m<sup>2</sup>\*año fueron analizados e indican valores de hasta 30% en promedio para la materia seca residual bajo clima cálido, correspondiente a la época de verano, y del 17% observado en la temporada de invierno. Los resultados de la tasa de carga de 30 kgST/m<sup>2</sup>\*año, no son presentados en el estudio.

Otro resultado observado es que en la capa inferior de lodo almacenado la materia orgánica parece haber alcanzado un estado estacionario en cuanto al proceso de estabilización. Aproximadamente el 25% de la materia orgánica cargada se descompuso en CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y minerales; lo anterior indica una buena estabilidad del producto y lo asemeja a un compost vegetal valorizando su aplicación en tierra agrícola (Troesch et al., 2009)

#### *Frecuencia de alimentación*

En los sistemas a escala piloto se informa que se manejó una frecuencia de alimentación correspondiente a 5 días de alimentación y 24 días de reposo, dando un total de 29 días por ciclo.

El estudio redacta que, bajo esta frecuencia de alimentación, es decir, 5 días de alimentación y 24 días de descanso, los pilotos han demostrado tener indicios de limitaciones hasta el punto de correr con problemas en su funcionamiento dependiendo de la tasa de carga (Vincent et al., 2012).

En la experiencia a escala real se informa que las camas fueron alimentadas en un periodo de 2 semanas seguidas por 14 semanas de descanso, es decir, 16 semanas de ciclo operativo. El trabajo no informa influencia alguna sobre la frecuencia de alimentación empleada en la operación de los sistemas, pero se indica que es el que ha sido utilizado desde 2007 por la empresa explotadora de la estación depuradora de aguas residuales (Troesch et al., 2009).

### *Carga Hidráulica*

La investigación en sistemas piloto informa que para las unidades alimentadas con lodo activado líquido se les asignó una carga hidráulica igual a 0.37 m/cama. Si el valor indicado corresponde a la carga hidráulica total obtenida durante el periodo de carga informado, se asume que se tendría un valor de 0.074 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d (Vincent et al., 2012).

En el sistema a escala real se informa que las camas fueron alimentadas con 0.28 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*h de fango líquido. El estudio no indica el número de horas al día asignadas a la alimentación de las unidades por lo que este valor es el único descrito en cuanto a carga hidráulica (Troesch et al., 2009).

### *Superficie*

Una superficie de 2 m<sup>2</sup> se consideró para la construcción de cada unidad en la investigación a escala piloto, sin embargo, no se presenta información alguna sobre este parámetro en el diseño de sistemas de tratamiento de lodos mediante humedales artificiales (Vincent et al., 2012).

En cuanto al sistema a escala real que se encontraba operativo hace ya cuatro años se informa que posee un determinado número de humedales construidos y cada uno posee una superficie de 468 m<sup>2</sup>. No existe información en cuanto al criterio de superficie empleado para el diseño del sistema (Troesch et al., 2009).

### *Número de camas*

Los sistemas a escala laboratorio experimentados se basaron en disponer para cada piloto 6 camas de similar superficie y alimentados a la misma frecuencia de carga.

A las conclusiones que se llegaron resumen que una configuración de 6 camas puede tener dificultades para tratar el lodo de depuradora conservando una tasa de carga igual a  $50 \text{ kgST/m}^2 \cdot \text{año}$ . Se recomienda construir un mínimo de 8 camas alimentadas para la tasa de carga indicada de manera que se consiga lograr el equilibrio necesario entre los períodos de alimentación y descanso, lo que resulta en una evapotranspiración y mineralización óptimas (Vincent et al., 2012).

En cuanto a la información obtenida en un sistema a escala real se resalta que el mismo fue construido desde su implantación en la estación depuradora de aguas residuales con 8 camas de geometría cuadrada y con similar superficie. Como en la investigación a escala real no existió variabilidad en el número de camas no se presentan resultados de la influencia de este criterio en la eficiencia del sistema de tratamiento de lodos (Troesch et al., 2009).

### *Calado*

La experiencia obtenida con la investigación en sistemas a escala piloto fue realizada con unidades construidas en hormigón, con una pendiente de 0.5% en el fondo de los lechos de carrizo para permitir el escurrimiento del agua drenada. En cuanto al medio filtrante, estas unidades solo difirieron en la capa de filtración superior, en vista que se deseaba evaluar la eficiencia del sistema con esta variante.

La altura para almacenamiento de lodo fue igual a 80 cm y no se indica que se haya considerado altura de seguridad. A lo indicado se sumaría la altura correspondiente al medio filtrante, detallado más adelante, y por lo tanto la altura total manejada para los sistemas a escala piloto fue de 1.30 y 1.35 cm.

Los resultados de la tasa de acumulación de fango o altura de lodo anual obtenido demuestran que es equivalente este parámetro para cualquiera que fuese el medio

filtrante empleado, arena o compost. Los valores obtenidos van de 5.1 – 5.3 cm/año y de 6.1 – 5.4 cm/año para medio filtrante con capa de compost y arena respectivamente (Vincent et al., 2012).

### *Tuberías de alimentación y drenaje*

En los sistemas a escala piloto no se construyeron redes de alimentación. Tuberías perforadas cuyo diámetro era de 120 mm fueron dispuestas en el fondo de cada unidad de manera que recojan el agua drenada y por otro lado, sirvan como sistema de aireación pasiva conectando uno de sus extremos a una tubería vertical o chimenea y así hacia la atmósfera (Vincent et al., 2012).

La información referida al sistema real indica que se contaba con un sistema de tuberías para alimentación y una red de conductos para la recolección de agua drenada y aireación pasiva. El sistema de alimentación contaba con una bomba localizada en el reactor biológico que impulsaba el fango líquido por medio de tuberías hacia cuatro puntos de alimentación, uno para cada lado de los humedales, de esta manera se informa que se asegura una distribución uniforme de lodo.

La red de drenaje horizontal consistía de 9 tubos ( $D = 120$  mm) separados cada 2 metros, y de los resultados obtenidos en cuanto al contenido de oxígeno medido en la porosidad del medio filtrante hace notar que las tuberías consideradas aportan pasivamente de este gas, elemento que se requiere para la oxidación de la materia orgánica (Troesch et al., 2009).

### *Medio Filtrante*

El estudio con unidades a escala piloto indicó la existencia de dos tipos de medio filtrante empleados para su evaluación. El cuerpo del medio estaba constituido desde abajo hacia arriba por una capa de 15 cm de piedra (diámetro de 30 – 60mm), una capa de 10 cm de grava media (diámetro de 15 – 25 mm), una capa de 20 cm de grava fina (diámetro 2 – 6 mm) y como capa superior, que fue la variante de los sistemas, se contaba con un espesor de 5 cm de arena fina ( $d_{10} = 0.35$ ,  $UC=3.2$ ) y por otro lado 10 cm de compost vegetal.

Las conclusiones en cuanto a la variación del medio filtrante recomiendan emplear compost vegetal en lugar de arena fina debido a que se puede obtener mejores comportamientos de la flora plantada, y por otro lado su posible implicación en el aumento de la filtración física del agua cuando la altura del fango depositado aumenta con el tiempo (Vincent et al., 2012).

Finalmente, el estudio a gran escala realizado en una depuradora de aguas residuales local informa que el sistema de humedales de tratamiento de lodos había sido construido previo al desarrollo de la investigación, considerando 10 cm de compost vegetal. (Troesch et al., 2009). Los resultados no señalan influencia en la eficiencia del sistema por empleo de la capa de compost.

### *Especie de planta*

La especie de vegetación empleada en el estudio fue *Phragmites australis*, y no se estudió otra especie de planta para los sistemas. La densidad de plantación fue de 9 plantas/m<sup>2</sup>, y se concluye que los sistemas presentaron una adecuada cobertura vegetal en el transcurso del trabajo. (Vincent et al., 2012).

Uno de los puntos observados del comportamiento de la vegetación fue con respecto a la presencia de compost en la capa superior del medio filtrante, de hecho, la investigación indica que un compost vegetal asegura un mejor crecimiento de las plantas

### **3.10. Italia**

En el caso de Italia se evidencian varios estudios realizados a escala piloto y sobre todo se recopila información en cuanto a descripción de sistemas reales (figura 10).

Los estudios indican que se ha tenido experiencia ya en varias estaciones depuradoras de agua reales aplicando humedales artificiales para el tratamiento de sus lodos y, aunque en los estudios no se presenta información en cuanto a resultados o conclusiones de las investigaciones de todos los sistemas, se indica que los lechos

de carrizo de secado de lodo ha resultado ser una tecnología fiable, ambientalmente sostenible y rentable.

### *Condiciones climáticas*

En el área de influencia del estudio el clima es fuertemente afectado por su proximidad al mar. La precipitación media anual fue de 937.4 mm con un máximo de 135.6 mm en octubre, y un mínimo de 20.7 mm en Julio.

En enero se registró una temperatura media de 6.5 °C, el mes más frío, y una temperatura media de 22.8 °C en Julio, el mes más cálido. La temperatura media anual fue de 15.3 °C (Giraldi et al. 2009).



*Figura 10. Lechos de carrizo en sistemas a escala real en Italia.*

### *Tasa de carga de lodo*

A escala piloto se tiene una experiencia satisfactoria donde se indica que la tasa de carga de lodo fue en promedio de 45 kgST/m<sup>2</sup>\*año, con un mínimo de 35 kgST/m<sup>2</sup>\*año y un máximo de 50 kgST/m<sup>2</sup>\*año.

Los resultados en cuanto a mineralización indican que el mismo podría no estar influenciado por los cambios estacionales y concluye que el sistema tuvo la capacidad de asegurar el suficiente contenido de oxígeno para promover la estabilización de la materia orgánica.

Los resultados en cuanto a deshidratación evidencian una ligera variabilidad. Por ejemplo, en el verano de estudio se informa que el contenido de agua se encontraba en un rango de 63 - 85 %, y en invierno se observó un rango entre 78 – 85 %.

Finalmente, por los resultados observados el estudio concluye que el diseño y operación del sistema son apropiados para tratar lodos de depuradora permitiéndose funcionar con tasas de caga mayores sin repercutir en la eficiencia de los procesos de mineralización (Bianchi et al. 2011).

En otros trabajos, la experiencia encontrada en sistemas a escala real indica una breve descripción de estos y se resumen en la tabla 5. Los resultados presentados se refieren predominantemente a la investigación en IT 1 (Masciandaro et al., 2015 y Giraldi et al., 2009).

*Tabla 5. Criterios empleados en diferentes sistemas de SDRB en Italia.*

	IT 1	IT 2	IT 3	IT 4
<b>EDAR</b>	La Fontina	Oratoio	Colle di Compito	Pittini
<b>Población Equivalente (he)</b>	15000	10000	4000	5000
<b>Producción de fango (m<sup>3</sup>/año)</b>	11993	2063	756	863
<b>Fango tratado en humedales (m<sup>3</sup>/año)</b>	4598	1690	133	133
<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	1210	375	225	252
<b>Número de camas</b>	11	5	5	6
<b>Superficie por cama (m<sup>2</sup>)</b>	110	75	45	42
<b>Fango (% materia seca)</b>	1	1	1.5	1.5
<b>Tasa de carga (kg ST/m<sup>2</sup>*año)</b>	38	45	67	67
<b>Tasa de carga (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>*año)</b>	3.8	4.5	4.4	4.7
<b>Año de funcionamiento</b>	2005	2005	2006	2006

El estudio en IT 1 se realizó de manera que se realizaron campañas de monitorización para analizar la eficiencia del sistema en términos de deshidratación y mineralización de fangos. Los resultados en cuanto a deshidratación demostraron que se consiguió una reducción del volumen de lodo almacenado por sobre el 90%, mientras que el seguimiento en la disminución de la materia orgánica también señala que se generó mineralización y debido a aquello se asume de igual forma una disminución de sólidos volátiles. Por lo indicado, la experiencia obtenida indica que resultó satisfactoria desde el punto de vista técnico y económico inclusive.

### *Frecuencia de alimentación*

Los sistemas a escala real estudiados fueron operados con similares frecuencias de alimentación, considerando en todos los casos una reducción del período de reposo para épocas de verano, tal como se puede observar en la tabla 6 (Masciandaro et al., 2015 y Giraldi et al., 2009).

*Tabla 6. Frecuencia de alimentación en diferentes sistemas de SDRB en Italia*

	IT 1	IT 2	IT 3	IT 4
<b>Alimentación / Descanso Otoño - Invierno - Primavera (días)</b>	1/14 -20	1/14 -20	1/14 -20	1/14 -20
<b>Alimentación / Descanso Verano (días)</b>	1/7 – 10	1/7 – 10	1/7 - 10	1/7 - 10

El estudio no indica información alguna sobre la modificación de los períodos de alimentación y descanso por lo que se asume que los valores presentados se encuentran en el rango de operación adecuado para los sistemas estudiados.

### *Carga Hidráulica*

La información observada en cuanto a carga hidráulica tanto para el estudio a escala piloto y real, siendo el sistema a escala real evaluado el correspondiente a IT 1, se indica que las camas fueron alimentadas con lodo líquido (1% ST) en aproximadamente  $0.12 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ , o  $1.2 \text{ kg ST}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ . (Giraldi et al., 2009).

Ambas experiencias no recomiendan información al respecto de este parámetro operativo por lo que se asume que el valor mencionado podría encontrarse en el rango óptimo de funcionamiento eficiente de un sistema de humedales.

### *Superficie*

El sistema a escala piloto presentaba una superficie de  $375 \text{ m}^2$  para operar a la tasa de carga ya indicada. En el estudio no se hace referencia a la determinación de la superficie debido a que esta fue construida años antes de realizar la experimentación detallada en el estudio (Bianchi et al. 2011).

En la tabla 6, se indica la superficie manejada para cada sistema de humedales a escala real de acuerdo a la experiencia italiana. Aunque no se hace referencia al criterio manejado para este parámetro en el diseño de cada sistema se cree que para IT 1 y IT 2 se empleó la ecuación 1, pues al representar la producción de fango en kg ST/año y conociendo la tasa de carga de lodo en kg ST/m<sup>2</sup>\*año, su relación da como cociente la superficie expresada en m<sup>2</sup> que coincide con los dos valores indicados (Giraldi et al., 2009).

### *Número de camas*

El número de camas en el sistema a escala piloto se informa que fueron cinco, lo que corresponde a 75 m<sup>2</sup>/cama. No se indican dimensiones de las unidades y la forma de las mismas de acuerdo a imágenes incluidas se podría decir que son rectangulares (Bianchi et al. 2011).

Al igual que la superficie, el número de camas manejado por los sistemas a escala real se presentan en la tabla 5. En este caso no se informa del criterio empleado para esta variable de diseño y no parece seguir un patrón de similitud entre cada sistema.

El estudio da información de la forma considerada para cada cama de IT 1 resaltando que fue rectangular y con dimensiones de largo – ancho aproximadas de 20 - 5.5 m respectivamente (Giraldi et al., 2009).

### *Calado*

En la investigación del sistema a escala piloto se informa preliminarmente que las unidades fueron construidas en hormigón y la altura considerada para las paredes fue de 1.4 m. La altura estaba compuesta desde abajo hacia arriba de una capa de hormigón simple h = 15 cm con doble pendiente para recolectar el agua drenada hacia una tubería central colocada en el sentido longitudinal de cada cama, luego se colocó la capa de medio filtrante h = 40 cm, y el resto se encontraba libre para el almacenamiento del lodo.

Previo a realizar la experimentación, se informa que el sistema ya operaba desde hace 4 años recibiendo fangos de depuradora y que se había acumulado una capa de lodo seco de alrededor de 40 cm, por lo que la tasa de acumulación de lodo tratado posiblemente fue de 10 cm/año. Un valor que podría aportar información para conocer la vida útil del sistema antes de su vaciado (Bianchi et al. 2011).

#### *Tuberías de alimentación y drenaje*

La investigación a escala piloto informa que las camas fueron construidas con una tubería de recolección de agua filtrada ( $d = 80$  mm) dispuesta en el centro de la capa de hormigón simple, es decir, bajo el medio filtrante. Las camas eran alimentadas por una tubería localizada aparentemente en uno de los dos extremos considerando el ancho de la unidad (Bianchi et al. 2011).

La investigación a escala real no hace referencia al sistema de alimentación mientras que indica que si existió sistemas de tuberías para la recolección del agua drenada. Finalmente, se informa que no existían tuberías de aireación en las dos experiencias.

#### *Medio Filtrante*

En los sistemas a escala real y piloto se informa que el espesor del medio fue de 40 cm. Esta matriz filtrante estuvo conformada por una capa inferior de grava  $h = 25$  cm ( $d_{50} = 40 - 70$  mm) y otra capa de grava  $h = 15$  cm ( $d_{50} = 5$  mm). Las capas granulares descansaban sobre una capa de hormigón simple (Giraldi et al., 2009).

### Especie de planta

La especie de vegetación empleado tanto en los sistemas a escala real y piloto fue *Phragmites australis* (macrófitas), las cuales fueron traídas desde viveros (figura 11). La flora fue plantada en malla, correspondiéndole una superficie de 0.5 x 0.5 m a cada planta (Bianchi et al. 2011 y Giraldi et al., 2009).



Figura 11. *Phragmites australis* en sistemas a escala real en Italia

### 3.11. Resultados de la investigación

Se realizó una recopilación de conocimientos fundamentados en investigaciones desarrolladas en la región mediterránea. Es en Europa donde se ha informado experiencias de humedales de tratamiento de lodo y, de acuerdo a la localización de los trabajos (figura 12), la zona norte mediterránea ha sido el foco de concentración del tema investigado.



Figura 12. Investigaciones de STW en la región mediterránea

Los parámetros principales de diseño informado y ciertas recomendaciones se detallan en la tabla 7, adicionalmente se resumen las condiciones climáticas registradas.

Tabla 7. Condiciones climáticas registradas y parámetros sugeridos de diseño

Parámetros	España	Grecia	Francia	Italia
<b>Condiciones climáticas</b>				
<b>T° en verano (°C)</b>	20	38.5	18.4	22.8
<b>T° en invierno (°C)</b>	6	-2.5	8.1	6.5
<b>Precipitación promedio anual (mm/d)</b>	-	785.8	592	937.4
<b>Escala del sistema</b>	Real	Piloto	piloto	Real
<b>Tasa de carga de lodo (kgST/m<sup>2</sup>*año)</b>	50 - 60, recomienda 60	> 75, recomienda 80	50 - 70, recomienda 50	38 - 45
<b>Frecuencia de alimentación Carga/Descanso (días)</b>	2/4 - 2/10	7/7 - 7/21	5/24	1/7 - 1/20
<b>Carga Hidráulica (m/d)</b>	0.03 - 0.18	> 0.016	0.074*	0.12
<b>Calado (m)</b>	1.60 - 1.70	> 1.20	1.35	1.40
<b>* Si el volumen de carga (h=0.37 m) de lodo líquido se aplica a 1 cama al día</b>				

Ahora resulta importante seleccionar la fuente de conocimiento base para la aplicación a un diseño de humedal artificial para el tratamiento de lodos líquidos, provenientes de una depuradora de aguas residuales. Con base a lo anterior se puede mencionar que:

- En los cuatro puntos geográficos se ha informado haber realizado investigaciones sobre el funcionamiento de sistemas de STW. Estudios ejecutados con sistemas a escala piloto han sido desarrollados con éxito en los cuatro países señalados, sin embargo, la gran mayoría de estos concluyen seguir estudiando sus líneas de investigación en sistemas a gran escala.
- Las experiencias a escala real se registran en España e Italia, aunque en Francia un estudio aborda el monitoreo y seguimiento en un sistema real, el trabajo no detalla concretamente propuestas para los principales parámetros que bien podrían ser aplicados para un diseño completo.
- Finalmente, las investigaciones en España e Italia son las que se podría emplear para un diseño correcto. La proximidad de la EDAR Vall Dels Alcalans a la experiencia obtenida en Cataluña – España, es probablemente el factor

primordial para trabajar con base a la información indicada en los estudios de la investigación española.

Resulta interesante indicar información complementaria, que se considera un gran aporte de las investigaciones reunidas en el presente trabajo.

Para zonas bajo clima mediterráneo se recomienda un periodo de descanso final extendido que debe realizarse en los meses de primavera y verano (temperaturas más altas) pues se ha concluido que en estas estaciones se favorece a: la disminución más intensa de sólidos volátiles, la eliminación de agua y eleva considerablemente el contenido de sólidos totales.

El período propuesto para la aplicación de la fase de descanso final es comenzar a finales de la primavera (es decir, a fines de abril hasta mediados de mayo) y finalizar a finales del verano (es decir, fines de agosto), con una duración media de aproximadamente 4 meses (Stefanakis et al., 2012).

La eficiencia de los humedales de tratamiento de lodos en términos de deshidratación ha resultado ser extensamente promulgado dentro y fuera de Europa, pero el proceso de estabilización no deja de ser interesante en la eficiencia de estos lechos artificiales.

En Francia, un estudio de STW a escala real informa que la mineralización de lodos se genera en las capas inferiores del volumen almacenado de lodos de una forma notoria. Se cuantifica que transcurrido cuatro años de operación del sistema, la materia orgánica establecida por debajo de los 10 cm de la superficie libre del fango, alcanzó un valor aproximado del 60% de ST. Esto indicó que aparentemente el 25% de la materia orgánica cargada fue descompuesta en dióxido de carbono, agua y minerales, esto debido a una mejor estabilización y rica actividad de la rizósfera (Troesch, S. 2009). En Dinamarca también se informa valores similares de eliminación de materia orgánica por mineralización en humedales de tratamiento de lodo.

Como se ha indicado los lechos de carrizo de tratamiento de lodos no solo deshidratan el lodo sino que también tienen el potencial de estabilizarlo. En España, se informa altas eficiencias en la estabilización de fango. De acuerdo al estudio de la calidad de

lodos influentes y tratados en sistemas STW, los resultados demostraron que la concentración de sólidos volátiles se redujo de 52-67% ST en el influente a 31-49% ST en los lechos de carrizo. Similar comportamiento fue registrado para DQO y DBO (Uggetti et al., 2009).

La experiencia en España aporta también con resultados en cuanto a la concentración de metales pesados medidos en el influente de lodo y fango acumulado en los lechos de carrizo, en vista que la concentración de Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg y Pb también deben cumplir los criterios establecidos en el Real Decreto 1310/1990.

Los valores de concentración de metales pesados en el lodo influente resultaron ser inferiores que los límites propuestos en la legislación vigente, debido entre otras cosas a la calidad del agua residual influente a las depuradoras. Los resultados de las concentraciones de metales pesados medidos en el fango acumulado en los humedales son superiores a los del influente, en ciertos casos como el Cr y Hg, probablemente debido a una acumulación en las unidades. Sin embargo, en otros metales pesados parece disminuir su concentración (Uggetti et al., 2009).

Por lo tanto, siempre que se produzca un proceso de estabilización apropiado en un sistema STW y las concentraciones de metales pesados del producto se encuentren por debajo de los límites normativos, el material final podría usarse como un fertilizante orgánico beneficioso (Uggetti et al., 2010), haciendo de los STW una tecnología alternativa y amigable con el medio ambiente para gestionar los fangos de aguas residuales de comunidades pequeñas, además podría aportar en la sociedad para impulsar la economía circular.

Uno de los factores determinantes en la valoración de estos sistemas de humedales, es la disponibilidad de terrenos pues el sistema requiere de grandes extensiones de suelo; desde el punto de vista económico, se estima que la operación de estos sistemas en poblaciones pequeñas (hasta 2000 habitantes equivalentes) es favorable frente a sistemas convencionales como: las centrífugas con pos tratamiento de compostaje o, por otro lado, el transporte de fangos a una gran depuradora del lodo sin deshidratación previa (Uggetti et al., 2011).

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

#### Ventajas

Algunas de las ventajas más importantes de un humedal para tratamiento de lodos bajo las investigaciones realizadas son:

Consumo de recurso energético muy bajo o nulo, debido a que el proceso de tratamiento se realiza por medio de mecanismos naturales.

Impacto ambiental mínimo, casi despreciable si se lo compara con: deshidratación mecánica; transporte de lodo líquido para tratamiento externo, esto en caso de depuradoras pequeñas y; tratamiento de fangos no estabilizados mediante compostaje.

Menor costo de operación y mantenimiento comparado con tratamientos artificiales convencionales o tratamientos tradicionales de bajo coste como las camas de secado de arena, ya que los humedales solo tienen que ser vaciados cada 8 – 10 años.

Disminución de olores debido al efecto pantalla de la vegetación que reduce presencia de aerosoles e insectos alrededor de la zona de influencia del sistema.

Sencillez en la operación pues se minimizan averías al carecer de equipos mecánicos, y el funcionamiento es menos complicado, menos peligroso, y requiere menores medios para mantener el sistema en su punto óptimo.

Programa de mantenimiento más simple y fácil de desarrollarlo.

El producto final puede ser empleado como fertilizante orgánico y acondicionador del suelo si la calidad de los biosólidos cumple con el apropiado grado de estabilización, así como las concentraciones de metales pesados.

## Desventajas

Como principales desventajas se puede citar:

Requiere una superficie de terreno mayor que los sistemas de tratamiento convencionales.

La vegetación puede ser alimento de ciertos animales, por lo que se debe controlar en lo posible que no acceda fauna al interior de la parcela.

El tiempo para que se alcance el régimen óptimo de funcionamiento es lento, dado que es un sistema natural que necesita que las plantas adquieran un grado de madurez.

Requiere suficiente conocimiento en el diseño, porque después tiene pocas posibilidades de regulación en el tratamiento de lodos.

## 4. Implementación de STW a escala real

En este apartado se indica las características principales de la EDAR Vall dels Alcalans, estación depuradora de España que fue considerada para poder aplicar el sistema de humedales artificiales para el tratamiento in situ de lodos líquidos generados en la instalación. Este sistema supondría un complemento añadido a la línea de fango que actualmente se encuentra en funcionamiento.

### 4.1. Localización

La estación depuradora de aguas residuales del Vall dels Alcalans se encuentra ubicada en el término municipal de Monserrat (Valencia). En la figura 13 y 14 se observa una fotografía satelital y aérea de la planta en las proximidades del Río Magro.



Figura 13. Localización de Edar Vall dels Alcalans. Fuente Google Earth

La EDAR pertenece a la Mancomunidad Intermunicipal de Vall dels Alcalans, de la que forman parte los municipios de Montroy, Real de Montroi y Monserrat, todos de la provincia de Valencia.

En Montserrat se dan pocas precipitaciones a lo largo del año, presentando una precipitación media de 432 mm al año. El mes más frío del año es enero alcanzando

una meda de 10.1 °C, y con un promedio de 24.9 ° C para agosto, el mes más cálido. La temperatura media anual es de 16.8 ° C.



*Figura 14. Vista aérea de la planta. Fuente: EPSAR*

## **4.2. Descripción de la EDAR**

La información detallada a continuación es la que se indica en la página web de la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales EPSAR correspondiente a la Generalitat Valenciana, según datos obtenidos en 2018.

El origen de las aguas residuales tratadas es básicamente doméstico, al ser muy reducida la actividad industrial en el municipio. La industria que aún existe está además asociada principalmente a la agricultura (manipulación de fruta y apicultura).

La planta fue diseñada para tratar 1.800 m<sup>3</sup> al día, pero actualmente se registra una media del caudal influente igual a 1.591 m<sup>3</sup> al día (dato de 2018, fuente: EPSAR). Este caudal representa a una población equivalente de 8.539 habitantes. Por otro lado, los rendimientos informados son: 97% para sólidos suspendidos, 97% para DBO<sub>5</sub> y, del 94 % para la DQO.

En el funcionamiento de la EDAR se distinguen dos líneas, tal como se observa en la figura 15:

- Línea de agua
- Línea de fango

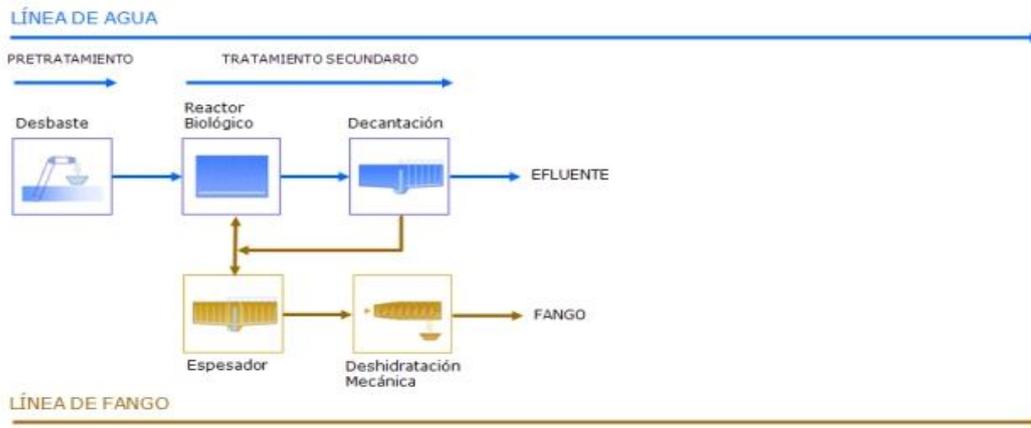


Figura 15. Diagrama de procesos en EDAR Vall dels Alcalans. Fuente: EPSAR

Línea de agua.

La constituyen todos aquellos procesos encaminados a reducir la contaminación que lleva consigo el agua para luego ser direccionadas al medio receptor cumpliendo los requisitos mínimos de vertido. En esta línea existe el pretratamiento, y tratamiento secundario.

Pretratamiento

El objetivo de esta fase operativa es separar los sólidos de gran tamaño del agua residual, que por su naturaleza o dimensiones pueden causar problemas de operación y/o mantenimiento en las instalaciones y en fases de tratamiento posteriores. En esta etapa básicamente se realiza trabajos de desbaste mediante reja de gruesos y tamizado.

Tratamiento Secundario.

El tratamiento secundario tiene como fin eliminar la mayor parte de la materia orgánica biodegradable. Se trata principalmente de procesos de carácter biológico, en el caso

de la EDAR Vall dels Alcalans, consiste en un proceso biológico de aireación prolongada y una clarificación secundaria.

### Tratamiento biológico

El proceso biológico mediante aireación prolongada es una variante de fangos activados que opera en la fase de respiración endógena de la curva de crecimiento microbiano. Este proceso se caracteriza por tener tiempos de retención hidráulica y edad de fangos muy elevados.

Por lo anterior, el fango llega a estabilizarse aeróbicamente debido al prolongado periodo de aireación y el desequilibrio entre la cantidad de biosólidos en el reactor y la cantidad de materia orgánica que ingresa.

### Decantación secundaria

La última etapa del tratamiento secundario es una decantación. El agua y flóculos formados en el reactor biológico se conducen a un sedimentador secundario. Como resultado del proceso se obtiene un agua clarificada que constituye ya un efluente depurado.

Los lodos sedimentados se extraen de la unidad: una parte se recircula al reactor biológico como fango activo (caudal de recirculación) y el resto es retirado del sistema derivándolo a la línea de fango. En esta etapa los lodos se separan por gravedad y el agua clarificada rebosa por el vertedero.

### Línea de fango

En esta línea se somete a tratamiento los fangos que se han producido en la línea de agua. Los lodos contienen todos aquellos contaminantes orgánicos e inorgánicos que en origen poseía el agua residual influente, además de microorganismos patógenos y una gran cantidad de agua en su composición. La EDAR Vall dels Alcalans posee dentro de la línea de fango un espesador a gravedad y una etapa de centrifugación posterior.

La producción de fangos tratados en la depuradora equivale a 630900 kg de materia húmeda (MH)/año. En términos de materia seca (MS) representa 91057 kg MS/año, es decir, 249.4 kg MS/d. El destino final de este lodo se indica que es la aplicación en agricultura.

### Espesador a Gravedad

Los lodos procedentes del decantador secundario son conducidos hasta el espesador, donde se reparte uniformemente. Este fango así alimentado, sedimenta, se compacta y es extraído por la parte inferior del tanque.

En esta tipología de espesador, tiene lugar una sedimentación de tipo retardada o zonal en la que las partículas sedimentan en bloque. Esto es debido a la elevada concentración de sólidos presente, provocando que las partículas interaccionen entre sí tendiendo a ubicarse en posiciones relativas fijas.

### Centrifugación

La deshidratación empleada en la estación depuradora se la hace in situ por medio de centrífuga. Esta técnica como ya se ha indicado en el apartado de tratamiento de lodos es una tecnología convencional de deshidratación mecánica y aunque genera altas sequedades en su producto final, necesita abastecimiento energético y mantenimiento continuo.

#### **4.3. Superficie disponible para un STW.**

De acuerdo a imágenes satelitales de la EDAR Vall dels Alcalans, preliminarmente se puede obtener una posible ubicación de un humedal artificial para el tratamiento de lodos. Figura 16.

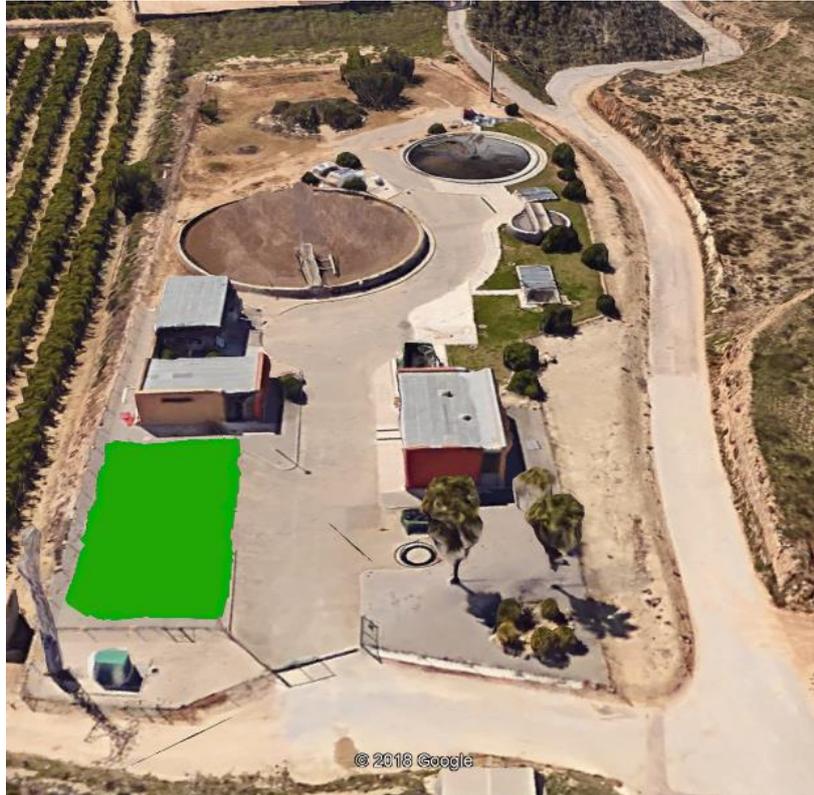


Figura 16. Área de implantación de STW. Fuente: Google Earth

Como la estación depuradora es una estructura ya en servicio, cualquier expansión o mejora operativa acarreará modificaciones en su implantación. Por lo tanto, el área propuesta para destinar un STW se considera aceptable.

La superficie presenta aproximadamente 200 m<sup>2</sup>, con 10 m de ancho y 20 m de largo. La única cobertura afectada en caso de construirse el humedal artificial, sería el área destinada a tres plazas de estacionamiento, espacios que se consideran pueden ser reubicados de manera que las personas que accedan hasta el interior de la EDAR cuenten con parqueadero.

Por otro lado, si se calcula la superficie total de un STW capaz de tratar la totalidad de producción de lodos líquidos generados, considerando para la tasa de carga de sólidos igual a 60 kgST/m<sup>2</sup>\*año, tendríamos con la ecuación 1 lo siguiente:

$$\text{Superficie} = \frac{91057 \frac{\text{kgST}}{\text{año}}}{60 \frac{\text{kgST}}{\text{m}^2 * \text{año}}} = 1517.6 \text{ m}^2$$

Para tratar el lodo de la depuradora en un humedal artificial, tomando una población de 8539 he, sería necesario 1517.6 m<sup>2</sup>. Sin embargo, se propone disponer de una superficie de 200 m<sup>2</sup>, equivalente a 1125 he, lo que representaría tratar el 13.2% del fango total generado.

La determinada población equivalente es inferior a los 2000 he, valor límite superior, que desde el punto de vista económico empieza a ser similar al tratamiento de deshidratación de lodos mediante centrífuga. (Uggetti et al., 2011)

Por lo indicado, la superficie de 200 m<sup>2</sup>, se considera aceptable para aplicar el sistema de STW a escala real en la EDAR Vall dels Alcalans. Esta alternativa de tratamiento de una fracción de los fangos líquidos generados en la depuradora será un fundamento sólido, si su eficiencia es aceptable de acuerdo a las investigaciones realizadas, para cuando sea necesario pensar que tipo de tecnología aplicar una vez se alcance la vida útil de la centrifugadora actual.

## 5. Diseño de STW

### 5.1. Dimensionamiento

Como la superficie fue determinada, bajo los criterios técnicos y económicos indicados, es posible determinar la cantidad de fango destinado hacia su tratamiento en el humedal, así:

$$\text{Producción de Lodo} = 60 \frac{\text{kgST}}{\text{m}^2 * \text{año}} \times 200 \text{ m}^2 = 12000 \frac{\text{kgST}}{\text{año}} = 32.9 \frac{\text{kgST}}{\text{d}}$$

Conocido la cobertura que tendría el sistema es necesario en este punto determinar el número de camas adecuado.

La experiencia en Cataluña indica que el número mínimo de camas debe ser cuatro, por lo tanto, este es el valor considerado para el diseño. Ahora se determina la superficie asignada por unidad del STW.

$$\text{Superficie por cama} = \frac{\text{Superficie de humedal}}{\text{No. de camas}}$$

$$\text{Superficie por cama} = \frac{200}{4} = 50 \text{ m}^2$$

La altura o calado del humedal será el correspondiente resultado del siguiente cálculo:

$$\text{Calado} = A + F + H_s$$

Donde,

A: altura de acumulación de fango, en m.

F: espesor del medio filtrante, en m (0.5 m recomendado)

H<sub>s</sub>: altura de seguridad, en m

Si la tasa anual de acumulación de lodos corresponde a 0.1 m. Se propone que para una vida útil del sistema de humedales igual a 10 años, se corresponde un valor de 1.0 m para la altura de fango acumulado.

$$Calado = 1.0 + 0.5 + 0.1 = 1.6 \text{ m}$$

El medio filtrante como fue indicado tendrá una altura de 50 cm. El medio estará formado por tres materiales granulares, en su parte inferior se ubicará una capa de piedra (diámetro aproximado 5 cm) de 20 cm de espesor, en la mitad se dispondrá de una capa de grava (diámetro de 2 a 10 mm) de 20 cm de alto y finalmente, una última capa de arena (diámetro de 0.5 a 1 mm) de 10 cm de espesor.

En cuanto al sistema de alimentación se seguirá las recomendaciones del estudio base que indica instalar una tubería vertical por cada lado de la cuenca para asegurar una distribución homogénea del fango líquido. Por otro lado, se instalará un sistema de tuberías horizontales en la dirección longitudinal, separadas cada 2 metros en el sentido ancho y, por debajo el medio filtrante como sistema de drenaje y aireación pasiva.

Una vez definido el dimensionamiento principal del humedal para el tratamiento de lodos líquidos de la estación depuradora. En este punto se definirá el tipo y densidad de plantación de la vegetación apropiada para el sistema.

El trabajo base indica que la especie vegetal más común en los STW es el carrizo común o *Phragmites australis*, razón por la que este trabajo recomienda este tipo de vegetación. Por otro lado, la densidad de plantación debería ser 4 plantas/m<sup>2</sup> dispuestos en malla, es decir, un área de 0.50 x 0.50 por carrizo.

## 6. Operación del STW

### 6.1. Frecuencia de alimentación

La frecuencia de alimentación es un parámetro operativo que de acuerdo a lo investigado ha dejado ver buenos resultados. La alimentación de fango se plantea realizarla considerando una sola cama a la vez, de esta forma se asegura que las demás unidades se mantendrán drenando.

Básicamente, la fase de alimentación se haría depositando el lodo en un plazo de 2 días, seguido de una fase de descanso correspondiente a 6 días. Por lo tanto, el ciclo completo de funcionamiento del humedal sería de 8 días.

### 6.2. Carga hidráulica

Conocido la producción de lodo diario que se asignará al STW en peso seco y considerando que el contenido de sólidos totales en un típico fango líquido podría ser igual a 1%, se podría determinar el peso del fluido total que sería depositado en una cama.

$$\text{Peso lodo líquido} = \frac{\text{Producción de lodo}}{\% \text{ ST}}$$

Donde,

Producción de lodo: es el lodo a destinar al STW por día, en kgST/d

% ST: es el contenido de ST en el fango líquido, en %

$$\text{Peso lodo líquido} = \frac{32.9 \text{ kgST/d}}{0.01} = 3290 \text{ kg/d}$$

Ahora si se considera un peso específico del lodo líquido igual a 1000 kg/m<sup>3</sup> se puede determinar el volumen aproximado de carga.

$$\text{Volumen de carga} = \frac{\text{Peso lodo líquido}}{\gamma \text{ lodo}}$$

Donde,

$\gamma_{\text{lodo}}$ : peso específico del lodo líquido, en  $\text{Kg/m}^3$

$$\text{Volumen de carga} = \frac{3290 \text{ kg/d}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 3.29 \text{ m}^3/\text{d}$$

Si la carga de lodos se realiza en una cama por fase de alimentación, entonces la superficie a recibir el lodo líquido será el correspondiente a cada depósito, así:

$$\text{Carga Hidráulica} = \frac{\text{Volumen de carga}}{\text{Superficie}}$$

Donde,

Superficie, es el área asignada a cada cama del STW, en  $\text{m}^2$

$$\text{Carga Hidráulica} = \frac{3.29 \text{ m}^3/\text{d}}{50 \text{ m}^2} = 0.068 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} * d = 0.068 \text{ m/d}$$

### 6.3. Volumen de producto final

Como se ha indicado el sistema de humedales artificiales está diseñado para albergar una altura de 1.0 m de fango ya tratado. Por lo tanto, se puede determinar el volumen total de producto que se tendría que retirar en 10 años. Así:

$$VF = A \times \text{Superficie}$$

Donde,

VF: volumen total acumulado de fango, en  $\text{m}^3$

$$VF = 1.0 \text{ m} \times 200 \text{ m}^2 = 200 \text{ m}^3$$

La característica de este producto se espera que sea similar a las indicadas en las experiencias españolas, en cuanto al contenido de sólidos totales, sólidos volátiles, y



metales pesados; de esta manera los fangos podrían ser destinados a la aplicación agrícola conforme la legislación vigente.

#### **6.4. Tiempo de reposo final**

En clima mediterráneo, se recomienda mantener al sistema aproximadamente cuatro meses en descanso extendido, una vez se alcance el tiempo esperado de funcionamiento. Este podría empezar a fines de junio extendiéndose hasta fin de octubre, estación anual cálida (Stefanakis et al., 2012).

## **7. Proceso de construcción del STW**

### **7.1. Trabajos previos.**

La localización propuesta por el emplazamiento se encuentra en sobre áreas de estacionamiento aparentemente asfáltico rígido, por lo tanto es necesario realizar el derrocamiento del pavimento y aceras. Posterior a esto es necesario retirar del predio los residuos generados para así despejar la superficie del humedal.

### **7.2. Replanteo de la parcela**

Una vez este despejado el terreno se deben replantear todas las unidades del sistema; al ser de igual superficie y dimensión cada cuenca, el trabajo de replanteo se reduce de forma considerable.

### **7.3. Movimiento de tierras**

Tras el replanteo de la parcela se realiza la excavación del terreno para colocar todas las camas del sistema. Es importante que la coronación de los humedales artificiales se encuentre más alta que el nivel del terreno para evitar la entrada incontrolable de materiales por arrastre.

### **7.4. Construcción de muros de hormigón**

Los muros de concreto tendrían un espesor de 8 cm y la altura de estos debe ser de 1.60 m para albergar la capa de medio filtrante y la acumulación de lodos por aproximadamente 10 años. El acero de refuerzo para la construcción del muro será el correspondiente al porcentaje mínimo de acero o, en su caso al resultado de realizar un diseño en hormigón armado asignando las cargas laterales del terreno natural y del material almacenado en el interior del humedal.

### **7.5. Nivelación y compactación**

Realizar correctamente esta fase constructiva es muy importante, pues si se realizase de forma incorrecta se producirían caminos preferenciales o corto circuitos, por los que fluiría el agua y de esta forma disminuiría la eficiencia del sistema.

Para nivelar el fondo del humedal es importante utilizar una capa de 0.2 m de zahorra artificial y tras la compactación aplicar herbicida que no genere problemas posteriores. Es imprescindible recordar que el fondo de las camas debe ser construida con una pendiente de 1% para permitir el escurrimiento del agua drenada.

### **7.6. Impermeabilización**

Una nueva metodología de impermeabilización es la de disponer una capa de arcilla bentonítica entre dos geotextiles. Esto genera un ahorro considerable en este proceso constructivo y disminuye el tiempo de construcción.

Una vez dispuesta la capa impermeabilizante de arcilla se procede a cubrir cada una de los depósitos destinados a las cuatro celdas del humedal. Se recomienda que las geomembranas se confeccionen previamente en fábrica para que cuando lleguen al predio las soldaduras a realizar in situ sean mínimas. Las empresas especialistas en este tipo de trabajos realizan el ensamblaje de las láminas mediante un equipo automático de soldadura térmica realizando un pequeño solape entre láminas.

### **7.7. Sistema de drenaje**

Esta red de tuberías se las debe colocar entre la capa de piedra inferior del medio filtrante, estos conductos deben ser adecuadamente dispuestos para formar una pendiente de igual valor a la de la plataforma base o mayor (> 1%). Es necesario trabajar con conductos con perforaciones para la recolección del agua drenada, estas tuberías vienen ya prefabricadas con esta característica solicitada. El diámetro mínimo que debe tener cada conducto será de 80 mm.

### **7.8. Material granular**

El relleno de las camas con el material granular en capas, tal como fue indicado en el diseño del humedal artificial, se realizará sin que camiones ingresen en ningún momento en las cuencas, por lo que es importante emplear un equipo pequeño de movimiento de tierras para extender el material. Cabe resaltar que solo se debe permitir que la maquina circule sobre el material granular o de lo contrario podría ocasionar cizallamiento o perforaciones de la geomembrana.

### **7.9. Vegetación**

La plantación de la vegetación se realiza al final de todo el proceso constructivo. En el diseño se estableció que se debe plantar 4 plantas por m<sup>2</sup> que, básicamente consistiría en hacer pequeños agujeros en el sustrato. Una vez plantadas, la capa de lodo acumulado otorgará de humedad necesaria para el crecimiento y madurez vegetal.

### **7.10. Sistema de alimentación**

Está compuesto básicamente por bombas, válvulas y tuberías que permitan impulsar el fango líquido presente en el reactor biológico hacia los puntos de alimentación localizados en cada una de las camas. Para que exista una alimentación continua y homogénea en todo el sistema se recomienda emplear electroválvulas, programadas con los rangos de tiempo adecuados para distribuir solo el volumen necesario para cada depósito, evitando por otro lado la presencia de personal de forma continua.

## **8. Explotación y operaciones de mantenimiento.**

Se informa que esta clase de sistemas requieren alrededor de una visita de control a la semana, correspondiéndole una o dos horas de trabajo al personal.

En ocasiones, es posible que deba removerse finas capas superficiales del medio faltante, esto únicamente en la puesta en marcha de las camas después de 8-10 años, y sea pertinente reponer con nuevo material de filtro.

Si se identifica unidades vegetales con altos indicios de haber sido estresadas y luego mueran, será necesario cambiarlas por otras para mantener una cubierta vegetada homogénea en la superficie de los humedales.

La flora debe mantenerse en un estado adecuado por lo que se recomienda realizar siegas cada año cuando comienzan a secarse las partes aéreas de las plantas (García y Corzo, 2008). Se propone también realizar esta siega a finales del invierno aunque la vegetación este inactiva ya que luego rebrota rápidamente en la primavera. Estas siegas reducirán el riesgo de que el propio material vegetal se acumule y descomponga con la torta de lodo almacenado.

## 9. Estimación de costes

En este apartado se indica una estimación de costes de la etapa de construcción y de la etapa de operación y mantenimiento.

### 9.1. Costes de construcción

En España, los costos de inversión de un sistema de STW incluyen la conformación y excavación del suelo, la construcción de humedales, la instalación de bombas y tuberías, la colocación de grava y la plantación.

Se indica que para un sistema de aproximadamente 1000 he, se ha determinado un valor de 252,3 €/m<sup>2</sup>. Por lo tanto, si consideramos proporcional el incremento de costes de inversión con el aumento de la población equivalente, se tendría para 1125 he un valor de 283,8 €/m<sup>2</sup>.

Finalmente, si se tiene una superficie de 200 m<sup>2</sup> destinados para la construcción de un humedal artificial para el tratamiento de lodos, se debería invertir aproximadamente 56.767,5 €.

### 9.2. Costes de operación

En la Tabla 8 se muestran los costes asociados a humedales artificiales para el tratamiento de lodo, considerando que se tratará el 13.4 % de la producción de lodos anual de la depuradora.

Tabla 8. Costes de explotación y mantenimiento de un STW. Fuente: Uggetti et al., 2011.

Operación	Frecuencia	Coste anual (€)
<b>Inspección general: comprobación dispositivo alternancia alimentación y reparto uniforme</b>	1 vez/semana	1130
<b>Siega de plantas</b>	1 vez/año	500
<b>Reemplazo de materiales</b>	1 vez/año	801
<b>Evacuación residuos poda</b>	1 vez/año	200
<b>Coste total explotación y mantenimiento (€/año)</b>		1830
<b>Coste total unitario (€/h-e. año)</b>		0.24

Un sistema convencional de deshidratación de lodos sumado un tratamiento de compostaje para la estabilización de residuos, tal como podría ser el manejo que actualmente presenta la EDAR en estudio visto que la totalidad de fangos evacuados se dirigen hacia la aplicación en agricultura, presentaría un costo operativo tal como se indica (tabla 9).

*Tabla 9. Costes de explotación probable de EDAR. Fuente: Uggetti et al., 2011.*

Operación	Coste anual (€)
<b>Costes de personal</b>	4.512
<b>Reemplazo de materiales</b>	1.560
<b>Transporte de lodo y pos tratamiento de compostaje</b>	4.786
<b>Consumo eléctrico</b>	541
<b>Coste total explotación (€/año)</b>	11.399
<b>Coste total unitario (€/h-e. año)</b>	1,33

Lo que representaría un ahorro anual de 9.569,0 € si se construye el sistema de STW. El período de amortización de la inversión (56.767,5 €), considerando el ahorro calculado, probablemente sería en 6 años.

Ahora, si el humedal artificial presenta un ciclo operativo de 10 años, como fue considerado en el diseño, la inversión podría ser cubierta mucho antes que el sistema de tratamiento requiera ser vaciado y puesto en marcha para otros diez años de funcionamiento.

## 10. Conclusiones

Generar una recopilación de investigaciones sobre el tema de tratamiento de lodos de depuradora empleando tecnologías de bajo coste, tal como el analizado, colabora con la expansión del conocimiento en cuanto a la reducción del impacto ambiental que engloba la gestión de fangos no solo en plantas de tratamiento de aguas residuales pequeñas, sino en medianas y grandes, debido a que su huella en el medio ambiente es más notable.

Para el diseño y operación de humedales de tratamiento de lodos en la Comunidad Valenciana la tasa de carga de lodo podría estar entre 50 – 60 kgST/m<sup>2</sup>\*año, la carga hidráulica entre 0.03 – 0.18 m/d, la frecuencia de alimentación en días (alimentación/descanso) entre 2/4 – 2/10, y el número mínimo de camas no debe ser menor a cuatro para poblaciones de hasta 2000 he.

El trabajo realizado aporta fundamentos para la implantación de un humedal artificial para el tratamiento de lodos generados en la EDAR Vall Dels Alcalans, lo cual desde el punto de vista económico y ambiental podría ser una alternativa fiable para la gestión de fangos, tanto así que se reduciría consumo energético, otorgaría sencillez en la operación y mantenimiento, y encajaría perfectamente en el medio natural.

El proceso de estabilización es una ventaja añadida que ha podido demostrarse que presenta un humedal artificial para el tratamiento de lodos de depuradora frente a sistemas de tratamiento mediante eras de secado, pues el rizoma junto con los microorganismos generados dentro de la matriz de las camas descompone la materia orgánica biodegradable sin depender de los cambios estacionales.



## 11. Bibliografía

- Armstrong, J., Jones, R., & Armstrong, W. (2006). Rhizome phyllosphere oxygenation in Phragmites and other species in relation to redox potential, convective gas flow, submergence and aeration pathways. . *New Phytol.* 172, 719-731.
- Bianchi, V., Peruzzi, E., Masciandaro, G., Ceccanti, B., Mora, S., & Iannelli, R. (2011). Efficiency assessment of a reed bed pilot plant (*Phragmites Australis*) for sludge stabilisation in Tuscany (Italy). *Ecological Engineering* 37, 779-785.
- Fytli, D., & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sludge in EU application of old and new methods - a review. *Sustain Energy Rev.* 12, 116-140.
- 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.
- Giraldi, D., Masciandaro, G., Peruzzi, E., Bianchi, V., Peruzzi, P., Ceccanti, B., & Iannelli, R. (2009). Hydraulic and biochemical analyses on full-scale sludge consolidation reed beds in Tuscany (Italy). *Water Science & Technology*, 1209-1216.
- Masciandaro, G., Iannelli, R., Chiarugi, M., & Peruzzi, E. (2015). Reed bed systems for sludge treatment: case studies in Italy. *Water Science Technology* (72), 1043-1050.
- Nielsen, S. (1990). Sludge dewatering and mineralization in reed beds systems. . *In: Constructed Wetlands in Water Pollution Control (Adv. Wat. Pollut. Control 11)*. Cooper, P.F. and Findlater B.C. (eds), 245-255.
- Nielsen, S. (2003). Sludge treatment in wetland systems. *Proceedings of the Conference on the Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands*. Lisbon, Portugal: In: Dias, V., Vymazal, J. (Eds).
- Nielsen, S. (2011). Sludge treatment reed bed facilities – organic load. *Water Science & Technology* (63), 941-947.
- Nielsen, S., & Willoughby, N. (2005). Sludge treatment and drying reed beds systems in Denmark. *Water and Environmental Journal* 19 (4) , 296-305.
- Obolewski, K., Skorbilowicz, E., Skorbilowicz, M., Glin'ska-Lewczuk, K., Astel, A., & Strzelczak, A. (2011). The effect of metals accumulated in reed (*Phragmites australis*) on the structure of periphyton. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74, 558-568.
- Oleszkiewicz, J., & Mavinic, D. (2002). Wastewater biosolids: an overview of processing, treatment and management. *J. Environ. Eng. Sci.* 1, 75-88.
- Stefanakis, A., & Tsihrintzis, V. (2011). Dewatering mechanisms in pilot-scale Sludge Drying Reed Beds: Effect of design and operational parameters. *Chemical Engineering Journal*, 430-443.

- Stefanakis, A., & Tsihrintzis, V. (2012). Effect of various design and operation parameters on performance of pilot-scale Sludge Drying Reed Beds. *Ecological Engineering*, 65-78.
- Stefanakis, A., Akratos, C., Melidis, P., & Tsihrintzis, V. (2009). Surplus activated sludge dewatering in pilot-scale sludge drying reed beds. *Journal of Hazardous Materials* 172, 1122-1130.
- Troesch, S., Liénard, A., Molle, P., Merlin, G., & Esser, D. (2009). Sludge drying reed beds: a full and pilot-scales study for activated sludge treatment. *Water Science Technology* 60, 1145-1154.
- Uggetti, E., Ferrer, I., Llorens, E., & García, J. (2010). Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. *Bioresource Technology* 101 (9), 2905-2912.
- Uggetti, E., Ferrer, I., Molist, J., & García, J. (2011). Technical, economic and environmental assessment of sludge. *Water Research* 45 (2), 573-582.
- Uggetti, E., Llorens, E., Pedescoll, A., Ferrer, I., Castellnou, R., & García, J. (2009). Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: characterization of three full-scale systems in Catalonia. *Bioresource Technology* 100, 3882-3890.
- Vincent, J., Forquet, N., Molle, P., & Wisniewski, C. (2012). Mechanical and hydraulic properties of sludge deposit on sludge drying reed beds (SDRBs): Influence of sludge characteristics and loading rates. *Bioresource Technology* 116, 161-169.
- Vincent, J., Molle, P., Wisniewski, C., & Lienard, A. (2011). Sludge drying reed beds for septage treatment: Towards design and operation recommendations. *Bioresource Technology* 102, 8327-8330.
- Von Sperling, M., & Gonçalves, R. F. (2007). Sludge characteristics and production. In: Cleverston, V.A., von Sperling, M., Fernandes, F. (Eds.), *Sludge Treatment and Disposal*. In I. Publishing (Ed.). London, UK.