

Trabajo Fin de Máster

Empleo de un humedal artificial como propuesta alternativa a la construcción de una EDAR en el municipio de La Acebeda (Comunidad de Madrid)

Intensificación: *ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS*

Autor:

JORGE GÓMEZ-CARRILLO GARCÍA

Tutor:

DR. MIGUEL MARTÍN MONERRIS

Cotutor/es:

DRA. CARMEN HERNÁNDEZ CRESPO

JUNIO, 2020



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: Empleo de un humedal artificial como propuesta alternativa a la construcción de una EDAR en el municipio de La Acebeda (Comunidad de Madrid)

Título del TFM en inglés: Using constructed wetland as alternative of wastewater plant in the municipality of La Acebeda (Comunidad de Madrid)

Título del TFM en Valenciano: Ús d'un aiguamoll artificial com a proposta alternativa a la construcció d'una EDAR al municipi de l'Acebeda (Comunitat de Madrid)

Alumno: JORGE GÓMEZ-CARRILLO GARCÍA

Tutor: MIGUEL MARTÍN MONERRIS

Cotutor/es: CARMEN HERNÁNDEZ CRESPO

Fecha de Lectura: JULIO, 2020

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo el diseño básico de un humedal artificial en el municipio de La Acebeda, en la Comunidad de Madrid. La problemática surge cuando se califica dicho municipio como uno de los pocos que en toda la Comunidad que carece de tratamiento de depuración para los vertidos urbanos. A consecuencia de este hecho, se redactó un Plan Especial para construir un colector y una EDAR, infraestructuras que requieren de grandes inversiones y costes.

El municipio de La Acebeda, contando con una población permanente de 65 habitantes, puede ver sus aguas depuradas mediante sistemas más económicos, con menores costes y ambientalmente más amigables.

Para ello, se propone emplear un humedal artificial como alternativa a la EDAR, donde en el presente Trabajo de Fin de Máster se realizará los cálculos de dimensionamiento, perfiles básicos e implantación de las instalaciones necesarias.

En la gestión de cuencas, la calidad del agua es una variable fundamental para determinar el buen estado ecológico de las masas de agua (según la Directiva Marco del Agua). Con el uso de sistemas no convencionales, como un humedal artificial, se consigue una mayor protección ambiental y permite un aprovechamiento de las aguas regeneradas para el mantenimiento de bosques y pastos, además de poder utilizar los lodos como abono natural y reducir notablemente el impacto paisajístico.

Con esto se espera hacer una mejor ilustración del gran servicio que ofrecen de los humedales artificiales en entornos rurales, integrándolos como sistemas que permiten mejorar la calidad de nuestras aguas sin requerir en grandes infraestructuras y que posibilitan la creación de hábitats que permiten una mejora de la biodiversidad.

Resum

Aquest treball té com a objectiu el disseny bàsic d'un aiguamoll artificial al municipi de l'Acebeda, a la Comunitat de Madrid. La problemàtica sorgeix quan es qualifica aquest municipi com un dels pocs que en tota la Comunitat que no té tractament de depuració per als abocaments urbans. A conseqüència d'aquest fet, es va redactar un pla especial per construir un col·lector i una EDAR, infraestructures que requereixen de grans inversions i costos.

El municipi de l'Acebeda, comptant amb una població permanent de 65 habitants, pot veure les seves aigües depurades mitjançant sistemes més econòmics, amb menors costos i ambientalment més amigables.

Per a això, es proposa emprar un aiguamoll artificial com a alternativa a l'EDAR, on en el present Treball de Fi de Màster es realitzarà els càlculs de dimensionament, perfils bàsics i implantació de les instal·lacions necessàries.

En la gestió de conques, la qualitat de l'aigua és una variable fonamental per determinar el bon estat ecològic de les masses d'aigua (segons la Directiva Marc de l'Aigua). Amb l'ús de sistemes no convencionals, com un aiguamoll artificial, s'aconsegueix una major protecció ambiental i permet un aprofitament de les aigües regenerades per al manteniment de boscos i pastures, a més de poder utilitzar els fangs com a adob natural i reduir notablement l'impacte paisatgístic.

Amb això s'espera fer una millor il·lustració de el gran servei que ofereixen dels aiguamolls artificials en entorns rurals, integrant-com sistemes que permeten millorar la qualitat de les nostres aigües sense requerir en grans infraestructures i que possibiliten la creació d'hàbitats que permeten una millora de la biodiversitat.

Summary

This work aims at the basic design of an artificial wetland in the municipality of La Acebeda, in the Community of Madrid. The problem arises when this municipality is classified as one of the few in the whole Community that lacks purification treatment for urban discharges. As a result of this fact, a Special Plan was drawn up to build a collector and a WWTP, infrastructures that require large investments and costs.

The municipality of La Acebeda, with a permanent population of 65 inhabitants, can see its purified water through cheaper systems, with lower costs and more environmentally friendly.

For this, it is proposed to use an artificial wetland as an alternative to the WWTP, where in this Final Master's Project the calculations of dimensioning, basic profiles and implementation of the necessary facilities will be carried out.

In watershed management, water quality is a fundamental variable to determine the good ecological status of water bodies (according to the Water Framework Directive). With the use of unconventional systems, such as an artificial wetland, greater environmental protection is achieved and allows the use of regenerated waters for the maintenance of forests and pastures, in addition to being able to use the sludge as natural fertilizer and significantly reduce the impact on the landscape. With this, it is hoped to make a better illustration of the great service that artificial wetlands offer in rural environments, integrating them as systems that allow us to improve the quality of our waters without requiring large infrastructures, and that enable the creation of habitats that allow an improvement in the biodiversity.



Palabras clave español (máximo 5): HUMEDAL ARTIFICIAL, EDAR, MEDIO AMBIENTE

Palabras clave valenciano (máximo 5): AIGUAMOLL ARTIFICIAL, EDAR, MEDI AMBIENT

Palabras clave inglés (máximo 5): CONSTRUCTED WETLAND, WWTP, ENVIRONMENT

Índice general

1. Introducción.....	5
1.1. Antecedentes	5
1.2. Problemática	7
2. Objetivos.....	8
3. Estado del arte.....	9
3.1. Definición de Humedal Artificial	9
3.2. Descripción de los Humedales Artificiales	10
3.3. Descripción de procesos	13
4. Descripción de la zona y proyecto anterior.....	17
4.1. Descripción del proyecto anterior	17
4.2. Climatología	20
4.3. Geología, geomorfología y edafología.....	21
4.4. Vegetación	22
4.5. Fauna.....	23
4.6. Usos del suelo y figuras de protección	24
4.7. Hidrografía	25
4.8. Población.....	26
4.9. Caudales.....	27
5. Diseño de las instalaciones.....	30
5.1. Justificación.....	30
5.2. Concentraciones de los contaminantes.....	30
5.3. Obra inicial	31
5.4. Humedal Artificial Vertical	48
5.5. Humedal Artificial Horizontal.....	52
5.6. Lecho adsorbente	55
5.7. Elementos de reutilización.....	58
5.8. Elección del tipo de humedal.....	64
5.9. Vegetación del humedal artificial vertical	65
5.10. Mantenimiento y operación	66
6. Conclusiones.....	68
7. Bibliografía.....	69

Índice de figuras

Figura 1. Arroyo de vertido. Fuente: (ICMA, 2018).....	6
Figura 2. Punto actual de vertido. Fuente: (ICMA, 2018).....	6
Figura 3. Esquema de humedal artificial horizontal (derecha) y vertical (izquierda). Fuente: (IWA, 2017).....	10
Figura 4. Dibujo esquemático del carrizo (<i>Phragmites australis</i>). Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).....	13
Figura 5. Esquema-resumen de los principales mecanismos de eliminación de la materia orgánica (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).....	14
Figura 6. Foto panorámica de la Acebeda. Fuente: R. Santos.....	17
Figura 7. Ubicación general del proyecto y zona de afección (amarillo). Fuente: ICMA, 2018.....	18
Figura 8. Alternativas de estudio para la realización del proyecto anterior. ICMA, 2018.....	19
Figura 9. Detalle EDAR proyectada. Fuente: Plan Especial de Depuración La Acebeda.....	20
Figura 10. Mapa base geológico. Fuente: IGME.....	22
Figura 11. Formación de helechos y ejemplar de fresa silvestre. Fuente: ICMA, 2018.....	23
Figura 12. Sapo partero. Fte: vertebradosibericos.com.....	24
Figura 13. Rana común. Fte: todoservivo.com.....	24
Figura 14. Mapa de usos del suelo de la zona de afección del proyecto. Fte: ICMA, 2018.....	25
Figura 15. Zona de estudio, con los arroyos de la Tiesa y de la Dehesa. Fuente: GeoPortal MAPAMA.....	26
Figura 16. Gráfico de líneas sobre la población permanente de T.M La Acebeda en los últimos 15 años. Fte: INE.....	27
Figura 17. Esquema básico del canal de desbaste y aliviadero. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).....	32
Figura 18. Esquema básico de un tanque Imhoff. Fuente: sswm.info.....	38
Figura 19. Esquema de cámara de decantación. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).....	39

Figura 20. Esquema de tanque Imhoff con dos puntos de recogida de lodos. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).....	42
Figura 21. Sección transversal de un SDRB. Fuente: (Silva, 2019).....	44
Figura 22. Esquema de humedal artificial vertical. Fuente: (IWA, 2017).....	48
Figura 23. Esquema básico de un humedal artificial horizontal subsuperficial. Fuente: (IWA, 2017).....	53
Figura 24. Pendientes y formas para la construcción de una charca de anfibios. Fuente: Manual CA Comunidad de Madrid.....	59
Figura 25. Detalle de acceso mediante piedras y gravas en una charca de anfibios. Fuente: Manual CA de la Comunidad de Valencia.....	59
Figura 26. Detalle de impermeabilización para la charca de anfibios. Fuente: Manual CA Comunidad de Valencia.....	60
Figura 27. Esquema básico de los 5 anillos de la charca de anfibios.....	61
Figura 28. Mapa con la ubicación potencial de la balsa de incendios y la charca de anfibios. Elaboración propia.....	64
Figura 29. Carrizo en estado silvestre, con alta densidad. Fuente: jardineriaon.com.....	66
Figura 30. Eliminación de la biomasa sobrante mediante maquinaria ligera. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).....	67

Índice de tablas

Tabla 1. Eficiencia de eliminación de contaminantes en los principales tipos de humedales artificiales. Fuente: (IWA, 2017)	11
Tabla 2. Principales mecanismos de eliminación para cada parámetro. Fuente: IWA.....	13
Tabla 3. Valores climáticos de Buitrago de Lozoya corregidos para La Acebeda. Fuente: AEMET. Corrección propia.....	21
Tabla 4. Caudales de trabajo para el diseño de los humedales artificiales. Elaboración propia.....	29
Tabla 5. Valores de emisión unitaria de cada tipo de contaminante por habitante y día. Fuente: IWA.....	30
Tabla 6. Límite legal de vertido al medio natural según la Directiva 91/271/CEE.....	31
Tabla 7. Valores supuestos para obtención de altura para caudal medio diario. Elaboración propia.....	34

Tabla 8. Valores supuestos para obtención de altura para el triple del caudal medio diario. Elaboración propia.....	34
Tabla 9. Valores recomendados para el diseño de rejas del canal de desbaste. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008)	35
Tabla 10. Parámetros de diseño para la reja del canal de desbaste. Elaboración propia.....	37
Tabla 11. Valores recomendados para los parámetros de diseño del tanque Imhoff. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008)	38
Tabla 12. Valores iniciales escogidos para el diseño del tanque Imhoff. Elaboración propia.....	39
Tabla 13. Principales parámetros propuesto para SDRB. Fuente: (Silva,2019).....	46
Tabla 14. Valores de referencia para población similar al T.M de la Acebeda. Fuente (Silva, 2019)	46
Tabla 15. Valores iniciales supuestos por bibliografía para el diseño de SDRB. Elaboración propia.....	46
Tabla 16. Concentraciones (g/m ³) antes y después del Tanque Imhoff (TI), y sus rendimientos. Elaboración propia.....	49
Tabla 17. Parámetros de diseño para dos tipos de sustrato diferentes en humedales verticales. Fuente: (IWA, 2017).....	49
Tabla 18. Concentraciones a la salida del humedal vertical. Fuente: IWA.....	52
Tabla 19. Valores iniciales supuestos mediante bibliografía para el diseño del HAHSb. Fuente: (IWA, 2017).....	53
Tabla 20. Concentración final para los contaminantes después de la depuración mediante humedal horizontal subsuperficial. Fuente: (IWA, 2017).....	55
Tabla 21. Valores para los parámetros de diseño de cada anillo de la charca de anfibios. Elaboración propia.....	62
Tabla 22. Riesgo de Incendios Forestales del periodo 2001-2010. Fuente: MAPAMA.....	63
Tabla 23. Concentraciones de salida según los rendimientos consultados en la bibliografía. Elaboración propia.....	64

1. Introducción

Es ampliamente reconocido el gran impacto generado en los ecosistemas acuáticos mediante el uso que hacemos de los recursos naturales para el crecimiento de nuestra sociedad. Si bien siempre se ha dado una gran importancia histórica y actual en el desarrollo del aspecto socioeconómico, son las últimas décadas el momento en el que el cuidado y el respeto al medio natural (y en concreto a los sistemas acuáticos) están tomando, afortunadamente, una importancia mayor.

En lo referente al medio ambiente y al conjunto de acciones llevadas a cabo para su cuidado en el ámbito de la gestión y depuración de aguas residuales, las tecnologías no convencionales se han ganado su reconocimiento a lo largo de los últimos años. Estas tecnologías, también llamadas sistemas de bajo coste o sistemas verdes, cumplen la misma función que las tecnologías convencionales, como la estación de depuración de aguas residuales de fangos activados, pero presentan una serie de ventajas frente a éstas a la hora de hacer uso de ellas.

Estas ventajas, que serán descritas más adelante, invitan cuanto menos a plantear como alternativa al uso de tecnologías convencionales el empleo de sistemas naturales de depuración, con el fin de lograr una mayor protección ambiental y conseguir darle un valor añadido al proceso de depuración de las aguas residuales.

Cabe destacar su amplia aplicación a un gran abanico de contaminantes, ya que se logran una serie de sinergias entre las distintas comunidades de organismos para llevar a cabo los procesos que posibilitan la eliminación de los contaminantes (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).

La manera de conseguir todo lo anterior se basa en conocer y ser consciente de las relaciones ecológicas de los sistemas naturales, y buscar simularlas para obtener el máximo beneficio ambiental de su uso, a la vez que se consigue mejorar la calidad de nuestras masas de agua.

1.1. Antecedentes

La actual legislación en materia de aguas, regida por nuestra Ley 29/1985, de 2 de agosto y sucesivas modificaciones, (y a su vez regulada tanto por la Directiva Marco del Agua (DMA) como por la Directiva de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas 91/271/CEE), establece una serie de objetivos y parámetros para garantizar el cumplimiento del buen estado ecológico de las masas de agua. Esto implica que en términos de calidad las masas de agua deben cumplir con una serie de parámetros fisicoquímicos en su medio natural, objetivo que sólo puede verse cumplido mediante la depuración de las aguas residuales antes de su vertido al río/arroyo correspondiente.

En la Comunidad de Madrid se ha conseguido depurar las aguas de casi todos sus municipios. En el presente TFM se aborda la gestión de las aguas residuales de uno en concreto, La Acebeda, ubicado en la Sierra Norte de la misma Comunidad. Dicho municipio, cuya población ronda los 80 habitantes, no cuenta con ningún sistema de

depuración, y aunque se trata de una zona muy poco poblada el impacto sobre los ecosistemas acuáticos será mayor a lo largo del tiempo, además de provocar malos olores en la zona de vertido y un gran impacto paisajístico.

En este municipio, que goza de un gran atractivo turístico, no se puede permitir que dicha situación suceda, ya no sólo por lo marcado en la normativa, sino que además el término municipal se encuentra en una zona rica en biodiversidad en donde sus pequeños ríos y arroyos juegan un gran papel ecológico en el desarrollo de las comunidades biológicas. Sería triste no dar solución a este problema, y de darse una solución, habría que tener cuidado con el impacto generado.



Figura 1. Arroyo de vertido. Fuente: (ICMA, 2018)



Figura 2. Punto actual de vertido. Fuente: (ICMA, 2018)

Para solventar este problema, el Ayuntamiento de Madrid en conjunto con la entidad encargada de la gestión de la aguas en la zona, el Canal de Isabel II, redactaron un Plan Especial de Depuración y Saneamiento, donde tras una serie de estudios de impacto ambiental y casi 18 años de procesos, se presupuestó la construcción de un colector y una EDAR con capacidad para 800 habitantes equivalentes (en adelante he), que alcanzaba la suma un total de 1.444.000€.

A fecha de hoy, este proyecto todavía no ha sido llevado a cabo, por lo que se decidió tomar como base para la elaboración del presente TFM la documentación oficial ya generada en el estudio preliminar (Estudio Ambiental ICMA, 2018) y emplear dicha información para resaltar la depuración mediante humedales artificiales como una alternativa más natural y que puede ser una solución a este problema.

1.2. Problemática

La larga y difícil relación que tenemos los seres humanos con el resto de los seres vivos ha puesto en jaque una serie de valores y servicios ecosistémicos que nos aportan los sistemas naturales, servicios fundamentales a la hora de mantener un planeta que goce de buena salud y pueda producir los recursos de una manera independiente y autónoma.

A medida que avanzamos como sociedad y crecemos en población, nuestras actividades son mayores y por tanto el impacto en el medio natural y en los sistemas acuáticos se acentúa, comprometiendo el bienestar de fauna y flora al verse mermada la capacidad del medio y, por ende, generando grandes problemas a escala social, ambiental y económica.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, en el ámbito de la gestión de cuencas la calidad del agua es una variable fundamental para determinar el buen estado ecológico de las masas de agua, según lo recogido en varias directivas europeas.

Por ello, aunque la depuración de las aguas residuales es un tema ampliamente abordado en la Comunidad de Madrid, aún le falta adecuar los parámetros de vertido del municipio de La Acebeda a lo que manda la legislación, y así terminar de ganarse la excelencia de la que goza.

Si bien con los años se ha dado solución a los problemas de la contaminación por vertidos ingeniando sistemas que permiten reducir el impacto que se produce con las actividades del ser humano, con el tiempo se ha visto que aun así hay que repensar el uso que se hace de los sistemas convencionales y dar un nuevo concepto a la depuración de las aguas residuales.

Como consecuencia, han sido las últimas décadas el momento del nacimiento de nuevas tecnologías que intentan reproducir el comportamiento de los ecosistemas naturales, buscando reducir la degradación del medio y por tanto generar los mismos beneficios y servicios ecológicos que aporta la propia naturaleza.

El fin último es, lógicamente, la depuración de las aguas, por lo que la referencia para lograrlo son los sistemas acuáticos y en concreto los humedales naturales. Estos se definen, según la Convención sobre Humedales de Ramsar en 1975, como “las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”.

En esta misma Convención se destaca entre sus funciones principales la depuración de aguas, además de ser sistemas capaces de retener nutrientes, sedimentos y contaminantes. Por ello, mediante el empleo de humedales (artificiales), se consigue una mayor protección ambiental y permite un aprovechamiento de las aguas regeneradas para el mantenimiento de bosques y pastos, además de poder utilizar los lodos como abono natural y reducir notablemente el impacto paisajístico.

2. Objetivos

El objetivo general es poner en valor las tecnologías basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales urbanas, haciendo una mejor Figura del gran servicio que ofrecen de los humedales artificiales en entornos rurales.

Más específicamente, se propone el empleo de dichos sistemas para la depuración de las aguas residuales en el municipio de La Acebeda, ubicado en la Sierra Norte de la Comunidad de Madrid.

Para ello se diseñarán dos tipologías de humedales distintas, se seleccionará el sistema que mejor se adecúe a las características de la zona, se describirá la infraestructura diseñada por la administración con el fin de comparar este diseño con los que se van a proponer, y se justificará el porqué de las decisiones tomadas.

Además, como objetivos secundarios se propondrá la creación de una charca de anfibios, con la idea de potenciar los efectos beneficiosos que este tipo de sistemas tienen en la biodiversidad, y una balsa que recoge las aguas depuradas como medida que ayude a la extinción de incendios forestales de la zona.

Por tanto, en el presente Trabajo de Fin de Máster se busca destacar el uso los humedales artificiales como alternativa a sistemas de depuración convencionales, mediante su empleo en una zona con un problema real donde este tipo de tecnología puede considerarse como una opción muy apropiada en este contexto de trabajo.

3. Estado del arte

3.1. Definición de Humedal Artificial

Los humedales artificiales se han definido de muchas maneras a lo largo de toda su trayectoria, coincidiendo diferentes autores y manuales en unas características básicas. En este caso, y tomando el “Manual de diseño de humedales artificiales” de la International Water Association (IWA, 2017) como documento fundamental de trabajo, se definen los humedales artificiales como tecnologías de depuración natural que tratan eficientemente diferentes tipos de agua contaminada. Los humedales artificiales son, por tanto, sistemas de ingeniería diseñados para optimizar los procesos que se encuentran en los ambientes naturales y de ahí su consideración de opciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente para el tratamiento de las aguas residuales.

Según el “Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales” del CENTA (2007), estos sistemas se catalogan como “artificiales” por tres motivos principales:

- Su delimitación y confinamiento se construye de forma mecánica, y cuenta con una base impermeable para evitar pérdidas de agua y que los lixiviados contaminen el suelo.
- El sustrato es distinto al suelo original, al ser una parte fundamental para los mecanismos de depuración y presentar distintas capas heterogéneas.
- La colonización de las plantas no se produce de forma natural, si no que las especies son elegidas conforme a una serie de criterios basados en la compatibilidad de estas plantas con los ecosistemas autóctonos.

Los humedales artificiales, por tanto, son sistemas de depuración que pueden estar formados por lagunas o canales poco profundos (<1 m) en donde se han plantado vegetación propia de sistemas húmedos. Los que los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la propia fauna (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).

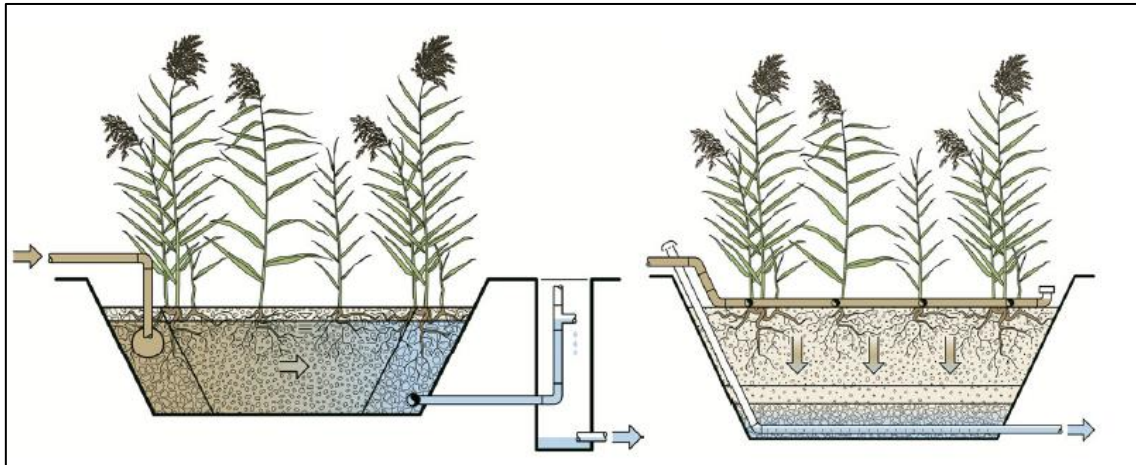


Figura 3. Esquema de humedal artificial horizontal (derecha) y vertical (izquierda). Fuente: (IWA, 2017)

Este tipo de sistemas se diferencian de los sistemas de depuración convencionales por presentar un consumo energético mínimo o nulo, y por requerir una mayor superficie de tratamiento. Además, suele presentar un coste de inversión mucho menor que otro tipo instalaciones para depuración, requiere menos personal y la frecuencia de generación de lodos es muy baja (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).

3.2. Descripción de los Humedales Artificiales

El humedal artificial, a pesar de los distintos tipos que existen, tienen en común una serie de características. Independientemente de su entrada de agua al sistema, todos se caracterizan por presentar un sustrato heterogéneo en el que en casi todos se asientan distintos tipos de macrófitas. El agua va discurriendo por el sistema viéndose afectada por una serie de procesos y mecanismos que poco a poco irán eliminando las concentraciones de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y demás contaminantes que serán descritos posteriormente.

Se pueden encontrar, principalmente, 4 tipos de humedales artificiales, aunque existen numerosas modificaciones de estos y actualmente se está trabajando en la creación de nuevos sistemas. Según la IWA (2017), las principales características de cada uno de los 4 tipos son las siguientes:

- **Humedal artificial horizontal subsuperficial:** el agua residual circula horizontalmente a través de un filtro compuesto por gravas y arenas, haciendo que el nivel del agua sea inferior a la superficie del sistema. Esto provoca una situación de saturación, facilitando que los procesos de degradación principales sean anaeróbicos. Necesitan de un pretratamiento para evitar obstrucción del lecho, utilizan macrófitas, y se usan como tratamiento secundario o terciario.
- **Humedal artificial vertical:** el agua es introducida desde la superficie del sistema de forma intermitente, es decir, dosificada, y percola verticalmente por el filtro. El descanso entre dosis permite que el oxígeno pueda entrar en el humedal, favoreciendo que la mayoría de los procesos sean aeróbicos. También se emplean macrófitas, y como el humedal artificial horizontal requiere de un pretratamiento para evitar su colmatación.

- **Sistema francés:** No necesita un pretratamiento, ya que es un sistema de humedales artificiales verticales que operan en dos fases, pudiendo trabajar en serie o en paralelo. Tienen como ventaja el tratamiento de agua y de fangos al mismo tiempo.
- **Humedal artificial horizontal superficial:** es el sistema más parecido a un humedal natural ya que no todo el medio está saturado, existiendo cierto nivel de agua fuera del sustrato. Suelen operar con bajas cargas, y requieren grandes extensiones para su empleo. Permiten el uso de un mayor número de plantas en comparación con otro tipo de humedales.

Se aprecia que una de las principales diferencias entre los distintos tipos es el lugar donde ocurre el proceso, pudiendo ser por encima del sustrato o mediante el mismo. A continuación, se adjunta una tabla resumen con los porcentajes de eliminación de contaminantes para cada tipo de humedal. Cabe destacar que existen múltiples modificaciones en los mismos que pueden dar lugar a rendimientos mayores.

Tabla 1. Eficiencia de eliminación de contaminantes en los principales tipos de humedales artificiales. Fuente: (IWA, 2017)

Parametros	Horizontal subsuperficial	Vertical	Sistema francés	Horizontal superficial
Etapas de tratamiento	Secundario	Secundario	Primario y secundario	Terciario
Elim. Sólidos Suspensos	>80%	>90%	>90%	>80%
Elim. Mat Orgánica	>80%	>90%	>90%	>80%
Nitrógeno (NH₄⁺)	20 - 30%	>90%	>90%	>80%
Nitrógeno total	30 - 50%	<20%	<20%	30 - 50%
Fósforo total	10 - 20%	10 - 20%	10 - 20%	10 - 20%
Coliformes	2log ₁₀	2 - 4log ₁₀	1 - 3log ₁₀	1log ₁₀

Aunque las características de los humedales son distintas según el tipo de sistema, si se encuentran ciertas similitudes entre ellos. Todos cuentan con un sistema de **impermeabilización**, por ejemplo un revestimiento con hormigón, láminas sintéticas (como por ejemplo el giscolene u otro material que impida salidas del agua del sistema, lixiviados de contaminantes o alteraciones en el proceso de funcionamiento). En ocasiones la propia compactación del terreno puede ser suficiente, sobre todo en sustratos donde en su composición dominen las arcillas.

En cuanto al **sustrato**, cabe destacar que en algunos de los tipos de humedales artificiales el medio granular es heterogéneo y por tanto presentan distintos tamaños. De esta manera, se consiguen distintos valores de conductividad hidráulica, parámetro que varía en función de la porosidad efectiva, y a su vez esta del tamaño de las partículas del medio granular. De esta forma, la filtración mediante distintos tipos de sustrato favorece más unos procesos que otros, y a que el paso del agua se verá facilitado o dificultado. Un ejemplo claro de esto son los humedales verticales, donde se utilizan desde arenas finas en la capa más superficial hasta grandes gravas en la zona más profunda.

Según (García Serrano y Corzo Hernández, 2008) en el **medio granular** ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y

la inactivación de los microorganismos patógenos. Además, requiere que el tipo de material empleado reúna una serie de características:

- a) Homogéneo y duro
- b) Durable y capaz de mantener su morfología a largo plazo
- c) Exento de finos

Otro de los elementos fundamentales y ampliamente utilizado es la **vegetación**. Se suelen utilizar pantas en las que su ciclo vital sea compatible con ambientes completamente anegados, con raíces colonizadoras en medios saturados y que fisiológicamente presenten sistemas de aireación en los tejidos internos. La especie más utilizada para climas templados, según la (IWA, 2017) es el carrizo *Phragmites australis*, aunque en el manual de (García Serrano y Corzo Hernández, 2008) se recogen los géneros que mejor resultado dan en el clima mediterráneo como el ya mencionado *Phragmites*, el género *Thypha*, o el *Scirpus* (juncos).

Se encuentran en dicho manual recogidos tres efectos principales de la vegetación en el funcionamiento de los humedales:

- i. La superficie existentes en las raíces y rizomas de las macrófitas permiten crear microambientes ricos en oxígeno donde se facilitan procesos en donde este elemento es fundamental, como la nitrificación o la degradación de la materia orgánica.
- ii. Su cobertura vegetal genera un fenómeno de amortiguamiento, bien será reduciendo el grado de insolación sobre la masa de agua o bien protegiéndola en ambientes fríos del proceso de congelación.
- iii. La asimilación de nutrientes para su ciclo vital genera unos rendimientos que aun siendo moderados, oscilan entre el 10% de nitrógeno y el 20% de fósforo, pudiendo aumentar hasta el 50% si las aguas residuales se encuentran más diluidas.

Además, García Serrano y Corzo Hernández recogen en su manual las siguientes recomendaciones:

- Se aconseja una densidad media de 3 – 4 plantas por cada metro cuadrado.
- Las especies deben ser colonizadoras, lo que genera un mayor crecimiento de su sistema radical y por ende una mayor superficie para la creación de la biopelícula y los microambientes ricos en oxígeno.
- Las plantas deben presentar un alto crecimiento en biomasa, para asegurar una mayor asimilación de nutrientes.
- Que las especies elegidas presenten un sistema eficaz de transporte de oxígeno.
- Presentar elevada productividad.
- Las plantas deben tolerar ambientes muy húmedos o anegados, con alta concentración de contaminantes.
- Se recomienda que sean plantas autóctonas o en su caso que pertenezcan a la flora local.

La combinación de plantas acuáticas con el medio filtrante impide la interrupción de la conductividad hidráulica, por baja que sea su valor. Además, la IWA recoge en su manual que una característica única que presentan los humedales artificiales es el escenario multiproceso que ocurre en el sistema, gracias a que en las raíces y rizomas de las plantas se sustentan un gran abanico de bacterias, como aeróbicas facultativas y estrictas, y anaeróbicas estrictas, distribuidas en un amplio gradiente redox.

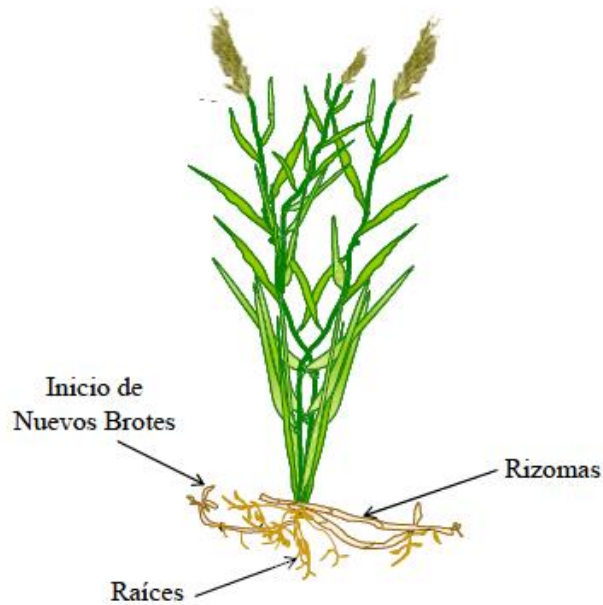


Figura 4. Dibujo esquemático del carrizo (*Phragmites australis*). Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008)

3.3. Descripción de procesos

En este apartado se hará una breve reseña de los principales procesos que afectan a cada contaminante real o potencial que podemos encontrar en las aguas residuales domésticas, las comúnmente denominadas aguas grises. En el manual de la IWA de 2017 se recoge la siguiente tabla resumen, que se añade traducida al castellano:

Tabla 2. Principales mecanismos de eliminación para cada parámetro. Fuente: IWA

Parámetros	Principales mecanismos de eliminación
Sólidos suspendidos	Sedimentación y filtración
Materia Orgánica	Sedimentación y filtración para materia orgánica particulada y degradación biológica aerobia y anaerobia para la materia orgánica disuelta
Nitrógeno	Amonificación, nitrificación y desnitrificación. Captación por planta
Fósforo	Adsorción y precipitación por medio granular. Captación por planta
Patógenos	Sedimentación, filtración, muerte natural y predación

A continuación se describen los principales mecanismos de eliminación, basados en el manual de la IWA de 2017 y en el manual de García Serrano y Corzo Hernández de 2008:

- **Eliminación de sólidos en suspensión (SS):** la materia en suspensión se retiene mediante una serie de procesos físicos denominados filtración del sustrato, entre los que se destacan la sedimentación por velocidades bajas y el tamizado de los intersticios del medio granular, fenómenos potenciados por fuerzas de adhesión que genera tanto las algas que se generan con el tiempo como las mismas partículas.

En los humedales artificiales de tipo horizontal la mayoría de la eliminación de los SS ocurre en el primer cuarto de la longitud del sistema (Sanz et al., 2009). Sin embargo, en humedales de tipo vertical la eliminación de SS sucede en la capa más superficial del medio granular. Ambos sistemas presentan rendimientos superiores al 80%, pudiendo alcanzar hasta el 90%.

- **Eliminación de materia orgánica:** la materia orgánica se clasifica según el estado en el que se encuentre en materia orgánica disuelta (**MOD**) y materia orgánica particulada (**MOP**). Se suele medir en términos generales según dos diferentes métodos siendo estos la Demanda Biológica de Oxígeno a los 5 días (**DBO₅**) y la Demanda Química de Oxígeno (**DQO**).

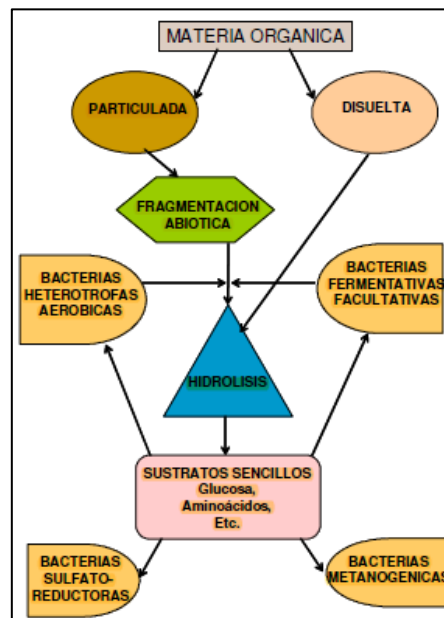


Figura 5. Esquema-resumen de los principales mecanismos de eliminación de la materia orgánica (García Serrano y Corzo Hernández, 2008)

Materia Orgánica Disuelta: su eliminación proviene de procesos químicos, en una reacción producida por bacterias las cuales transfieren electrones de la materia orgánica a un compuesto específico (electrón aceptor), liberando así energía. Esta reacción se da en mecanismos como la respiración aeróbica (donde el electrón aceptor es el oxígeno y el producto es dióxido de carbono); desnitrificación, donde los nitratos y nitritos son el electrón aceptor y el nitrógeno gas y dióxido de carbono son el producto; sulfato reducción, sulfato en la reacción se transforma en sulfito y dióxido de carbono; y finalmente la denominada metanogénesis, donde la materia orgánica es tanto aceptora como donante y produce dióxido de carbono y metano. El proceso general de estas reacciones se encuentra fundamentado en la hidrólisis.

Materia Orgánica Particulada: una vez entra al sistema, esta queda retenida en la capa más superficial por procesos físicos como filtración o sedimentación. Las partículas retenidas, mediante acumulación, se ven afectadas por el proceso de hidrólisis y se van transformando en materia orgánica disuelta, compuesto que será degradado o hidrolizado por procesos anteriormente descritos. La acumulación de la MOP provoca atascos sobre todo en los humedales artificiales horizontales de flujo subsuperficial, ya que no solamente entra al sistema por el caudal aguas residuales, si no que el crecimiento de la biopelícula de las raíces genera en sí mismo un aumento del detrito.

Respiración aerobia: las bacterias heterótrofas existentes utilizan mayoritariamente el oxígeno (disponible) como el electrón aceptor. Las heterótrofas facultativas, además, pueden usar nitratos y nitritos como aceptor cuando el oxígeno es limitado (proceso anaerobio). La disponibilidad de este compuesto varía según el tipo de humedal artificial empleado, siendo mayor por ejemplo en los humedales artificiales verticales al ser un sistema de pulsos que permite una entrada adicional de oxígeno entre pulsos, lo que supone que la reacción de degradación de la materia orgánica dominante sea aeróbica. Sin embargo, en los humedales de tipo subsuperficial la entrada de oxígeno se debe exclusivamente al proveniente del caudal de entrada, la reaireación física o el otorgado por las plantas. En estos humedales, al ser la demanda de oxígeno mayor que el oxígeno disponible, predominan mecanismos propios de bacterias facultativas.

Desnitrificación: este proceso se da en ausencia de oxígeno, donde las bacterias degradan biológicamente el nitrógeno, reduciendo los nitratos a nitrógeno gas mediante una serie de pasos intermedios. La desnitrificación puede convertirse en el principal mecanismo de degradación de la materia orgánica en humedales artificiales que no cuenten con la necesaria aireación, siempre y cuando la disponibilidad de nitratos sea suficiente en el afluente (ya que no puede autogenerarse en el sistema por nitrificación autótrofa sin haber sido eliminada cierta cantidad de materia orgánica previamente).

Sulfato reducción: el sulfato es un común constituyente de las aguas residuales urbanas y es usado por un amplio grupo de bacterias heterótrofas anaerobias como electrón aceptor, produciendo principalmente sulfuro (compuesto causante de malos olores y que puede causar la inhibición de la actividad microbiana y el crecimiento de la vegetación).

Metanogénesis: reacción anaerobia donde la materia orgánica es oxidada a dióxido de carbono y reducida a metano. Aun no siendo estrictamente un mecanismo de eliminación de la materia orgánica en términos de DQO, la baja solubilidad del metano en agua posibilita la eliminación de la materia orgánica mediante la desgasificación del metano. Esta reacción guarda similitudes con las condiciones requeridas en la sulfatoreducción, tanto en potencial redox como en el empleo de sustratos orgánicos.

- **Eliminación del nitrógeno:** la entrada de este compuesto al sistema suele ser mediante nitrógeno orgánico y amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), aunque también puede ser mediante nitratos. Los principales mecanismos de eliminación de este compuesto son la

amonificación, que consiste en transformar nitrógeno orgánico a amonio a través de las enzimas excretadas por los microorganismos; la nitrificación, en donde se oxida el amonio para resultar nitrato mediante bacterias autótrofas nitrificadoras. El producto intermedio de esta reacción es el nitrito, y para que el proceso de transformación suceda de forma completa y más o menos rápida se necesitan altas concentraciones de oxígeno, situación que se consigue en los humedales artificiales verticales.

Por otro lado, el proceso anóxico de desnitrificación ya ha sido descrito anteriormente, pero cabe destacar su importancia para transformar los nitratos resultantes de la nitrificación a nitrógeno gas, que será posteriormente liberado a la atmósfera. Este proceso es difícil que suceda enteramente pues depende del proceso anterior de nitrificación, y a su vez este no se da hasta que el suficiente carbono orgánico ha sido consumido.

En resumen el proceso de eliminación del nitrógeno total se ve difícil de realizar en su totalidad con un solo humedal artificial porque se requieren situaciones de bajas y altas concentraciones de oxígeno casi simultáneamente. Humedales de tipo vertical por su mayor capacidad de oxigenación permitirán encontrar en el efluente bajas concentraciones de amonio pero altas de nitratos, siendo a la inversa en los humedales horizontales.

Otros procesos menores de eliminación de nitrógeno son la adsorción, consistiendo en que el amonio al ser un catión puede ser adsorbido por el medio filtrante, aunque con capacidad finita. A su vez, la eliminación mediante plantas del nitrógeno al ser un nutriente puede tenerse en cuenta aunque su rendimiento es mucho menor que el resto de los procesos, eliminando entre 0.2 – 0.8 g N/m²/día según el tipo de planta (Vymazal, 2007).

- **Eliminación del fósforo:** el fósforo entra en el sistema como ortofosfato o fósforo orgánico (el cual mucho se convertirá en ortofosfato como parte de la degradación de la materia orgánica). Su eliminación se basa en los procesos de precipitación, sedimentación, adsorción, y eliminación mediante plantas. Realmente, el proceso que mayor cantidad de fósforo elimina es la adsorción, y aunque el medio tiene una capacidad finita de adsorción (momento en el cual los rendimientos son mínimos) se ha conseguido encontrar sustratos donde es posible retrasar su saturación en unos cuantos años, o en su defecto utilizar lechos móviles que no afecten al conjunto del sistema y que puedan ser cambiados periódicamente.

- **Eliminación de organismos patógenos:** este proceso es altamente complejo al estar interrelacionados un gran número de mecanismos que inactivan o eliminan bacterias, virus, protozoos o parásitos. Se agrupan en procesos físicos, como la filtración o la sedimentación; químicos (oxidación y adsorción) y biológicos, donde destacan la liberación de oxígeno y la actividad microbiana en las zonas radicales, así como muerte natural, predación, o competencia. De forma general, se acepta en los humedales horizontales subsuperficiales una eliminación de 3 log₁₀ unidades de bacterias fecales (por ejemplo *E. coli*).

4. Descripción de la zona y proyecto anterior

El municipio de La Acebeda se encuentra asentado situado entre la Sierra de Guadarrama, el valle del río Madarquillos y la Sierra de Somosierra. A 88 km de la capital, descansa en el sector sierra norte de Madrid y es fronterizo con el municipio de Prádena, en la Comunidad Autónoma de Segovia. El término municipal es relativamente pequeño, contando con una superficie total 22.06 km² y ubicado en las coordenadas UTM: 4548160 448202, Huso 30. Presenta un desnivel importante, ya que aunque su altitud media es de 1272 msnm, la cota mínima se encuentra a 1100 msnm y la máxima a 1829 msnm. La Acebeda está incluida en la hoja 458 de la serie 1:50000 del mapa topográfico del Instituto Topográfico Nacional.



Figura 6. Foto panorámica de la Acebeda. Fuente: R. Santos

4.1. Descripción del proyecto anterior

Para el empleo del humedal artificial en el T.M La Acebeda se ha tomado como referencia el proyecto propuesto por la Comunidad de Madrid (CM), decidiendo mantener tanto las zonas propuestas (ya que se determinó como favorable teniendo en cuenta la titularidad y regímenes especiales de protección) como la parte del proyecto referente a la construcción del colector, de forma que lleve las aguas a depurar hasta la zona en donde se instalará la estación de depuración de aguas residuales de fangos activados (en nuestro caso el humedal artificial).

Cabe destacar que todo lo referente al colector (y al proyecto en su totalidad de la CM) se encuentra recogido en la documentación oficial proporcionada en la sede electrónica de la Comunidad de Madrid, y que aunque en el presente trabajo académico se tome dicha información como base y referencia, no es objeto de este TFM la construcción, instalación o descripción de acciones y/o actuaciones en lo referente al proyecto de la Administración. Además, se limitará el contenido de este trabajo a lo establecido en el apartado 2) *Objetivos* del presente documento. Aun así, para un mejor entendimiento de los supuestos y consideraciones a la hora de diseñar el humedal artificial se incluye una breve reseña del proyecto anterior.

El proyecto previo pertenece al “Programa de Depuración 100x100” de la Comunidad de Madrid, aprobado en el año 2000. El expediente de construcción se llevó a cabo en el año 2001, y no fue hasta el 2007 donde se empezó a iniciar una serie de Expedientes de Evaluación Ambiental con el objetivo de proponer una zona donde ubicar la EDAR. Este proceso resultó especialmente difícil ya que la Sección de Gestión Forestal I y Área de Conservación de Montes, y la Dirección General de Patrimonio Histórico negaron las alternativas propuestas.

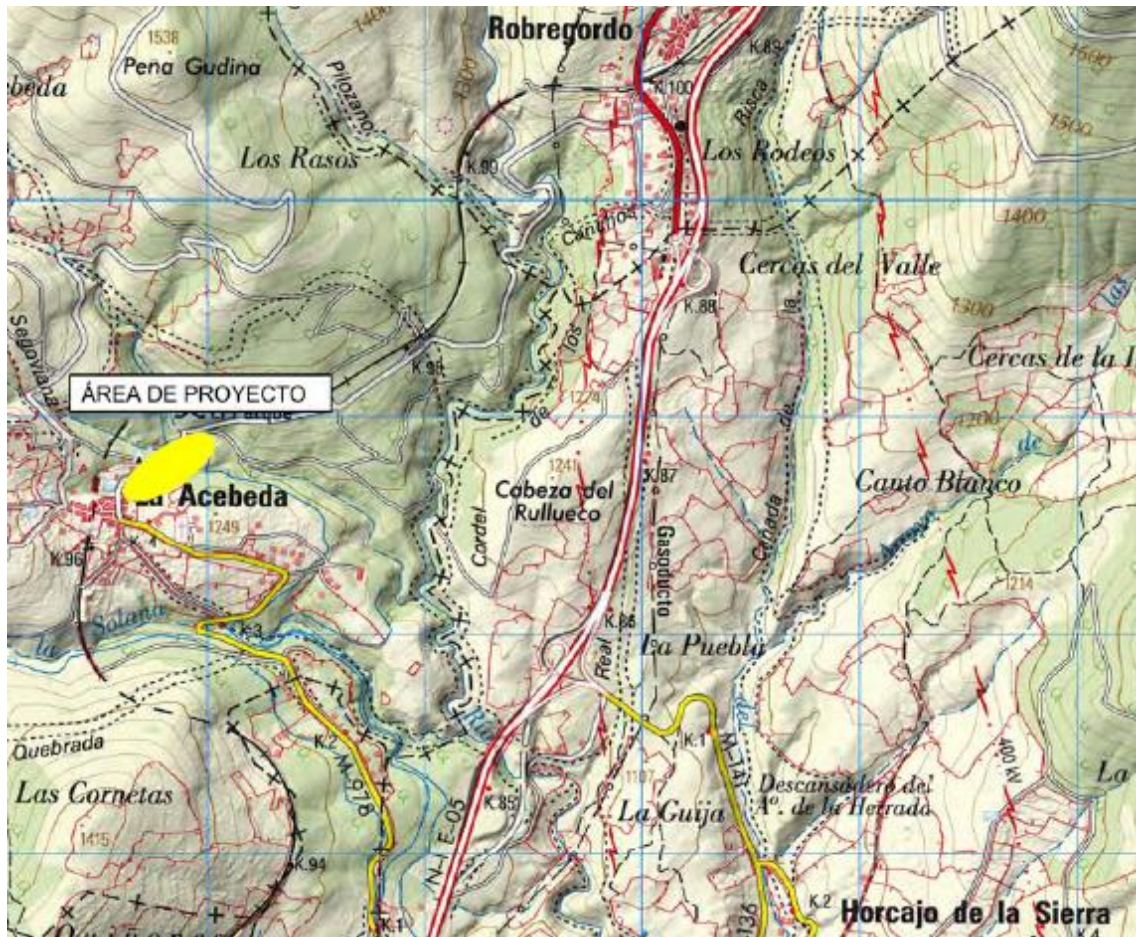


Figura 7. Ubicación general del proyecto y zona de afectación (amarillo). Fuente: ICMA, 2018

Finalmente, en 2018 se declaró tras un análisis exhaustivo 4 posibles alternativas para la realización del proyecto, en la que la 3ª alternativa (Ver Documento Ambiental ICMA, 2018) fue elegida por presentar las siguientes características:

- Estar lo más alejada posible del núcleo urbano.
- No se necesita realizar expropiaciones.
- El trazado del colector propuesto facilita obras y el sistema actúa por gravedad.
- La afectación al Monte de Utilidad Pública y Monte preservado se considera aceptable con las medidas compensatorias propuestas en dicho documento.

- La Zona de Aprovechamiento Ordenado de los Recursos Naturales del Plan de Ordenación de recursos Naturales de la Sierra del Guadarrama permite su construcción al ser una infraestructura de interés público.

La figura siguiente muestra las alternativas estudiadas, haciendo especial hincapié en la de color morado (alternativa 3), donde el trazado del colector sería el mismo y la zona reservada para la estación depuradora de fangos activados correspondería con la misma zona en la que se establecería el humedal artificial propuesto.

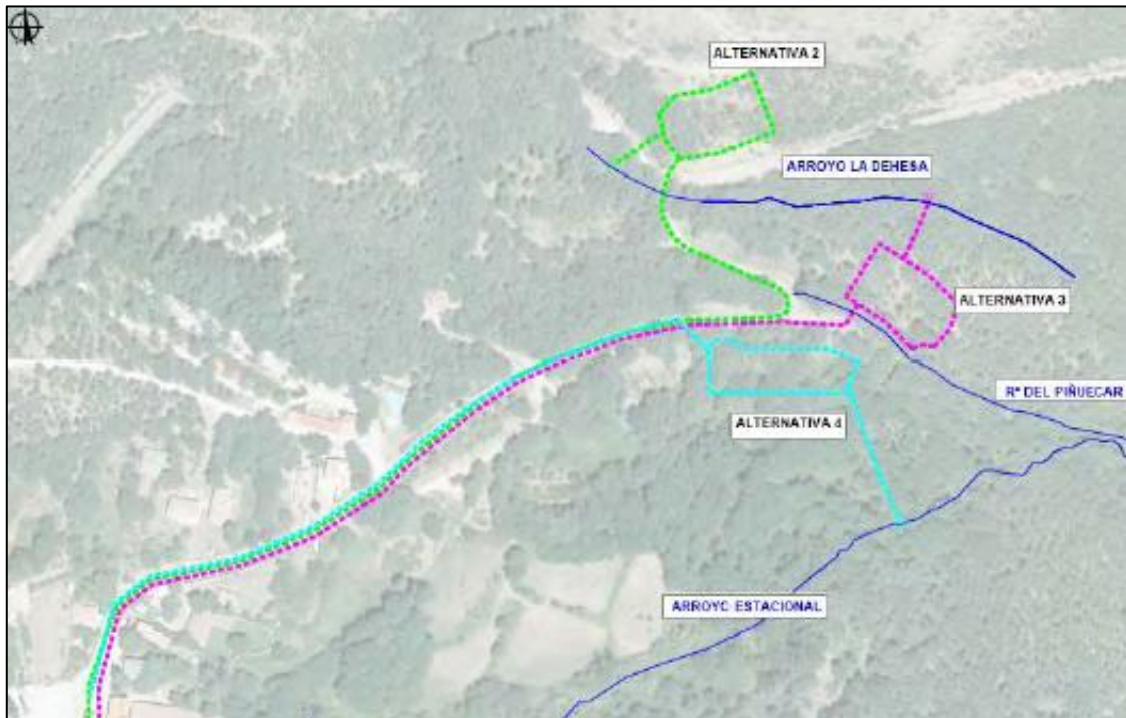


Figura 8. Alternativas de estudio para la realización del proyecto anterior. (ICMA, 2018)

El colector cuenta con una longitud total de 472 m, empezando en la plaza Nicasio González Moreno y recorriendo la carretera de Robregordo hasta la parcela elegida. La Administración propuso que el colector sea de PVC corrugado de 500 mm de diámetro. En la totalidad del recorrido se ha propuesto la instalación de 15 pozos de registro.

Por otro lado, la parcela de ocupación de la EDAR de la Administración cuenta con una superficie total de 1682 m², en donde se propuso ubicar la estación de depuración que cuenta con una capacidad de 200 m³/día (800 he). El cálculo de esta capacidad se considera sobredimensionado, al ser la población 8 veces menor a lo propuesto (ver apartado 4.8) Población).

La estación depuradora de aguas residuales de fangos activados propuesta por la Administración cuenta con dos líneas de tratamiento:

- a) Pretratamiento con pozo de gruesos, desbaste y desarenador-desengrasador
- b) Decantación primaria y secundaria y un tratamiento biológico.
- c) Espesador y almacenamiento de fangos
- d) Las respectivas instalaciones eléctricas y de control.

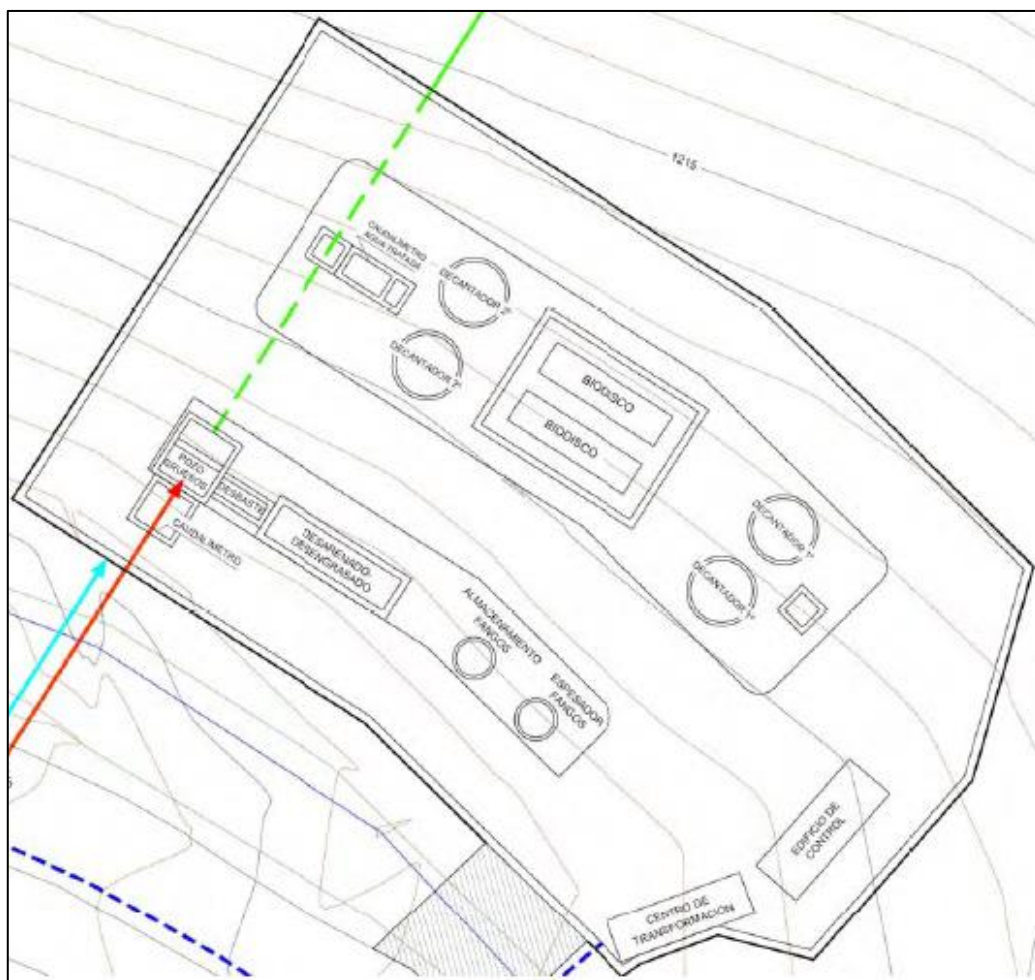


Figura 9. Detalle EDAR proyectada. Fuente: Plan Especial de Depuración La Acebeda

4.2. Climatología

Para la caracterización del clima de La Acebeda se ha tomado usando como referencia la estación meteorológica de mayor cercanía, correspondiente a la ubicada en el municipio de Buitrago de Lozoya, con una altitud media de 978 msnm. En esta estación las series de precipitación y demás valores meteorológicos están completas y sus datos son extrapolables ya que ambos municipios cuentan con una altitud similar.

Aun así, se debe hacer una corrección de temperatura y precipitación, ya que respecto a la altitud media del municipio hay una diferencia de unos 300 m. La precipitación aumenta un 8% por cada 100 m ascendidos, mientras que la temperatura disminuye 0.65 °C por cada 100 metros ascendidos. En la tabla 3 se adjunta los valores tomados de la serie más larga proporcionada por la AEMET, que corresponde al periodo 1982-2012, es decir, 24 años, con las correcciones pertinentes. La precipitación media anual por tanto es de 704.24 mm y la temperatura media 9.4 °C, siendo el mes más caluroso julio con 19.25 °C y el mes más frío enero con temperatura media de aproximadamente 1 °C.

Esto corresponde a un clima según la clasificación bioclimática de Köppen de tipo **Csb**, ya que se trata de un clima templado, con temperatura media entre 0 °C y 18 °C (tipo C), con un periodo moderadamente seco en verano (tipo Cs) y con la temperatura media

del mes más cálido inferior a 22 °C (tipo Csb). Este resultado se ha contrastado y validado con la información oficial del Ministerio de Transición Ecológica (MITECO).

Tabla 3. Valores climáticos de Buitrago de Lozoya corregidos para La Acebeda. Fuente: AEMET. Corrección propia

Mes	Tmedia (°C)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	P (mm)	Tmedia* (°C)	Tmin* (°C)	Tmax* (°C)	P* (mm)
Enero	3.00	-0.50	6.50	38.00	1.05	-2.45	4.55	47.12
Febrero	4.40	0.00	8.80	41.00	2.45	-1.95	6.85	60.68
Marzo	7.10	2.10	12.20	41.00	5.15	0.15	10.25	60.68
Abril	9.50	4.20	14.80	46.00	7.55	2.25	12.85	68.08
Mayo	13.00	7.20	18.90	54.00	11.05	5.25	16.95	79.92
Junio	17.60	11.30	24.00	41.00	15.65	9.35	22.05	60.68
Julio	21.20	14.60	27.90	18.00	19.25	12.65	25.95	26.64
Agosto	21.10	14.60	27.60	15.00	19.15	12.65	25.65	22.2
Septiembre	17.40	11.40	23.40	36.00	15.45	9.45	21.45	53.28
Octubre	11.60	7.10	16.20	48.00	9.65	5.15	14.25	71.04
Noviembre	6.60	2.50	10.80	55.00	4.65	0.55	8.85	81.4
Diciembre	3.80	0.50	7.10	49.00	1.85	-1.45	5.15	72.52
					9.4			704.24

4.3. Geología, geomorfología y edafología

En cuanto a la **geología**, la zona de emplazamiento del colector propuesto por la Administración la conforman pizarras, conglomerados y caliza de la era del proterozoico-Paleozoico. En la zona donde se pretende construir la EDAR de la Administración (y a su vez zona propuesta para la ubicación del humedal artificial propuesto) se encuentran rocas plutónicas prehercínicas compuestas por granitoides pertenecientes a la era del Proterozoico. Se considera un periodo de 325 y 300 millones de años desde su emplazamiento.

La **litología** en general que encontramos en la zona de trabajo se basa en esquistos y rocas metamórficas de tipo granítico cuya permeabilidad se considera baja, como cuarcitas, pizarras, gneises y granitos. La **geomorfología** de la zona presenta pendientes bajas dentro del rango del 3 – 12% según la cartografía ambiental de la Comunidad de Madrid, incluyendo todo el área dentro del dominio fisiográfico de *pedemontes tipo depresión-corredor*.

El Estudio de Impacto Ambiental (ICMA, 2018) en el que se fundamenta esta información contempla que en términos geotécnicos las características mecánicas de este tipo de terrenos permiten capacidades de carga de tipo medio, donde las condiciones constructivas son aceptables.

Finalmente y en cuanto a la **edafología** de la zona se aprecian suelos delgados, muy poco evolucionados a causa de la erosión que corresponden a *Etnisoles Orthents*, y que están presente en gran parte de la zona del humedal. En la zona del colector, el suelo se reparte entre suelo urbano y suelo de tipo *Inceptisoles Xerepts*, suelos moderadamente profundos, con buena capacidad de drenaje y alta fertilidad. La clasificación de estos suelos corresponde con lo dispuesto en el Sistema de Clasificación de Suelos de EE. UU (Soil Taxonomy), aunque según la FAO el área corresponde a cambisoles de tipo CM7 Grupo CMD.

A continuación se adjunta un mapa geológico de la zona, donde el azul corresponde a pizarras y conglomerados, y el amarillo a rocas plutónicas prehercínicas.

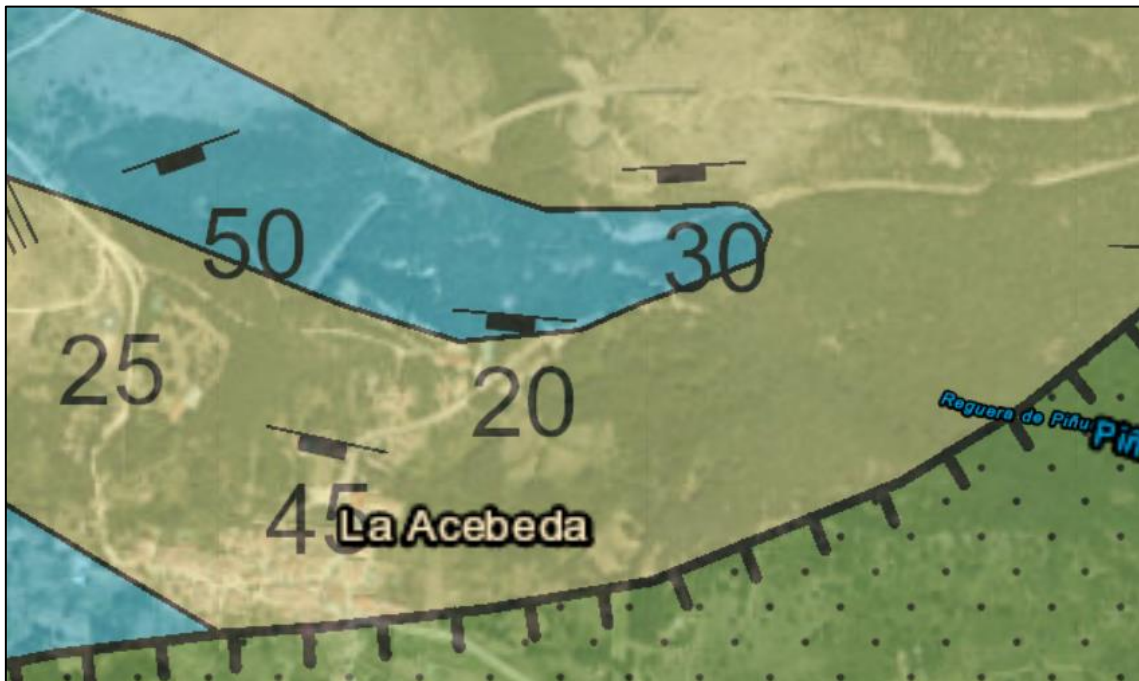


Figura 10. Mapa base geológico. Fuente: IGME

4.4. Vegetación

Para la determinación de la vegetación potencial se ha tomado como referencia la clasificación fitosociológica de Rivas-Martínez, donde la unidad básica de trabajo es la *asociación de especies vegetales*, lo que da lugar a comunidades vegetales (con un número de especies suficientes y con características contrastadas y fiables que permiten separar una asociación de otras, de tipo ecológico, geográfico, florístico, etc.).

Rivas-Martínez, en su clasificación de estas asociaciones vegetales creó los denominados mapas de vegetación potencial. Haciendo uso de esta herramienta encontramos que la asociación que cabe esperar en la zona de estudio está dentro de las series de robledales supramediterráneos. Exactamente corresponde a la región II y **serie de vegetación 18a**, “Serie supramediterránea carpetano-ibérico-alcarrena subhúmeda silicícola de *Quercus pyrenaica* o roble melojo (*Luzulo forsteri-Querceto pyrenaicae sigmetum*). VP, robledales de melojos.”

En esta serie encontramos en sus distintas etapas:

- Especie de tipo arbustivo dominante: *Quercus pyrenaica* (Roble melojo)
- Especie de tipo matorral denso dominante: *Cytisus scoparius* (retamar negro)
- Especie de tipo matorral degradado dominante: *Cistus lauriflorus* (jara)
- Especie de tipo pastizal dominante: *Stipa gigantea* (banderilla)

En el Estudio Ambiental llevado a cabo por la consultora ICMA en 2018 se encontró, además de lo anteriormente mencionado, zarzamora (*Rubus ulmifolius*), fresa silvestre

(*Fragaria vesca*) y cerezo silvestre (*Prunus avium*) en las zonas próximas a los cauces, así como grandes formaciones de helechos (*Pteridium sp.*) y madreselva (*Lonicera peryclumenum subs hispánica*).

Cabe destacar que aunque el municipio recibe el nombre de “La Acebeda”, ya no quedan formaciones o comunidades vegetales de este árbol emblemático, el acebo, salvo algún individuo suelto de *Ilex aquifolium*.



Figura 11. Formación de helechos y ejemplar de fresa silvestre. Fuente: ICMA, 2018

Como mención especial, y teniendo en cuenta que la afección será favorable para los ecosistemas acuáticos y por ende la calidad del bosque de ribera, cabe destacar la presencia de saucedas (*Salix alba* y *Salix atrocinerea*), pies sueltos de fresno (*Fraxinus angustifolia*) y abedul (*Betula alba*), choperas de (*Populus alba* y *Populus termula*) y algún cerezo aliso (*Prunus padus*) en las márgenes y orillas de los arroyos adyacentes, según el Mapa Forestal Español (MFE).

4.5.Fauna

Ya que existe una falta de conocimiento de la fauna real que se puede encontrar en la zona, para su definición, y tomando como referencia el documento ambiental redactado por la consultora ICMA en el 2018 para la valorización ambiental de la EDAR de la Administración autonómica, se empleará la fauna potencial que se puede encontrar en el área de estudios e intermediaciones. Para la numeración de posibles especies que habitan se toma como base el listado elaborado por el MAGRAMA, en la parte de Inventario Nacional de la Biodiversidad correspondiente a la cuadrícula UM de 10 por 10 km: 30TVL44.

En este listado se encuentran recogidas un conjunto de 151 especies que de manera potencial puede criar, refugiarse o buscar alimentos en la zona de estudio. A continuación se recogen las más representativas:

Mamíferos: especies típicas del melojar (*Quercus pyrenaica*) son el jabalí (*Sus scrofa*), gamo (*Dama dama*), conejo (*Oryctolagus cuniculus*), y demás roedores como consumidores primarios. Como consumidor secundario destaca la gineta (*Genetta genetta*).

Aves: destacan el carbonero (*Parus major*), la abubilla (*Upupa epops*), pito real (*Picus viridis*) o perdiz roja (*Alectoris rufa*). Como depredador típico de melojares se destaca el águila imperial de la península ibérica (*Aquila adalberti*). Todas estas aves encuentran alimento y lugares de nidificación en zona donde la cobertura arbórea es densa, característica propia del melojar.

Reptiles: mencionar el lagarto común (*Lacerta lepida*), culebras bastarda (*Malpolon monspessulanus*) y de escalera (*Rhinechis scalaris*) y lagartijas cenicienta y colilarga (*Psammodromus hispanicus* y *P. algirus* respectivamente).

Anfibios: se hace especial mención a este grupo faunístico ya que dentro de los objetivos del presente TFM, y como elementos secundarios del sistema de depuración propuesto, se encuentra la creación de una charca de anfibios. De este grupo cabe destacar la presencia potencial de rana común y ranita de San Antón (*Pelophilax perezi* e *Hyla arborea*), sapos común (*Bufo bufo*), corredor (*Epidalea calamita*) y partero (*Alytes obstetricans*), y salamandra común (*Salamandra salamandra*).



Figura 12. Sapo partero. Fte: vertebradosibericos.com



Figura 13. Rana común. Fte: todoservivo.com

4.6. Usos del suelo y figuras de protección

Aunque no afecta específicamente, el área de estudio se encuentra en las proximidades de un Lugar de Interés Comunitario L.I.C. ES3110002 “Cuenca del río Lozoya y Sierra Norte”, según la Directiva 92/43/CEE de conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres.

Cabe destacar que, según lo recogido en el documento ambiental de ICMA, el proyecto llevado a cabo por la Administración y en el que se basa dicha propuesta de humedal artificial ha evaluado que las zonas de afección se encuentran incluidas dentro de la Zona de Aprovechamiento Ordenado de los Recursos Naturales, bajo el régimen específico de protección de Área reservada para Parque y que afectan a un Monte de Utilidad Pública (MUP) y a monte preservado tipo II según la Ley 16/1995, de 4 de mayo, Forestal y de Protección de la Naturaleza de la Comunidad de Madrid.

Dado que la construcción de la EDAR propuesta por la Administración es compatible con dichas zonas y regímenes de protección, es por ello por lo que se propone mantener las zonas del proyecto original para la propuesta alternativa del humedal artificial (atendiendo a las recomendaciones y medidas que el documento ambiental refiera en cuanto a su ubicación).

Las zonas de afección previamente mencionadas se catalogan, en lo referente a usos del suelo, a suelo urbano y prados en el la primera mitad del trazado del colector, mientras que en la segunda mitad y la zona reservada para el humedal estaríamos en el uso del suelo melojar.

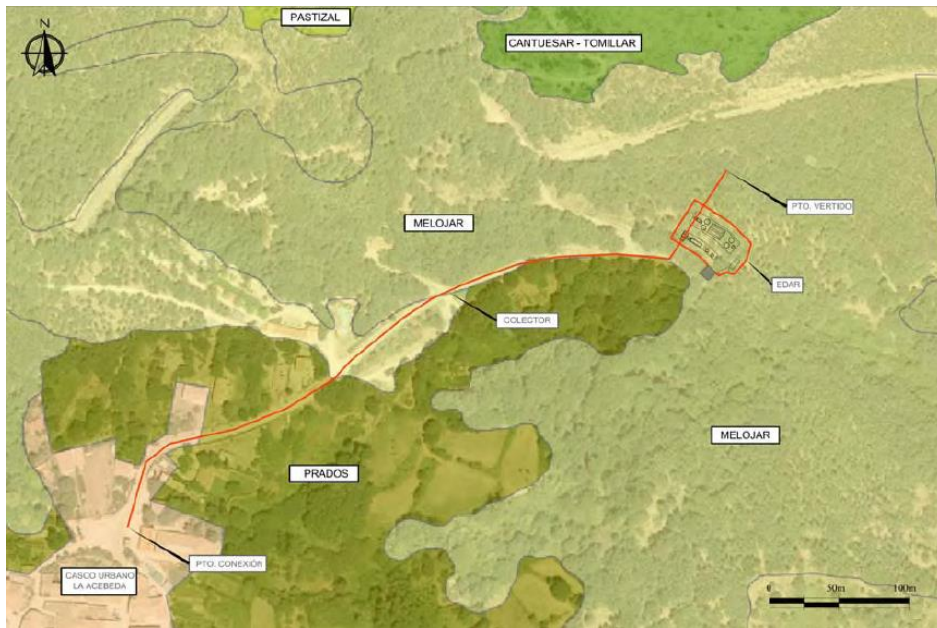


Figura 14. Mapa de usos del suelo de la zona de afección del proyecto. Fte: ICMA, 2018

4.7. Hidrografía

La zona de estudio se encuentra en su totalidad en la subcuenca del río Jarama, perteneciente a la Cuenca Hidrográfica del Tajo. Más concretamente, el área de trabajo se corresponde con la situada en subcuenca hidrográfica de 4º orden del río Madarquillos, en el arroyo permanente de la Dehesa o Arroyo de Piñuecar, el cual se considerará como punto de vertido de las aguas residuales una vez tratadas por el humedal.

Además, no se localizan ningún tipo de masa de agua subterránea y el área se ha catalogado como una zona no vulnerable por contaminación por nitratos. Aun así, se exigirá siempre el sellado e impermeabilización de márgenes y lechos del humedal artificial.

Todos los pequeños ríos y arroyos de la subcuenca ya sean estacionales o permanentes vierten en el río Madarquillos, que a su vez acaba desembocando varios kilómetros aguas abajo en el embalse de Puentes Viejas, gestionado por el Canal de Isabel II.



Figura 15. Zona de estudio, con los arroyos de la Tiesa y de la Dehesa. Fuente: GeoPortal MAPAMA

4.8. Población

La población del municipio de La Acebeda siempre se ha caracterizado por presentar una tasa de crecimiento baja, inferior al 1%, en concreto de 0.53% para un periodo de 14 años (periodo 2005-2018). Esta tasa de crecimiento poblacional ha mantenido como población permanente (entendida como empadronada) en torno a los 60-66 habitantes. De forma anómala, y según lo recogido en el Instituto Nacional de Estadística (INE), en el último año 2019 se ha experimentado un aumento de personas empadronadas muy acuciado, en donde se ha pasado de 65 habitantes a 84, aumentando la tasa de crecimiento poblacional de 0.53% al 2.26% en un total de 15 años.

Preguntando a la gente del pueblo, se sabe que la población real no corresponde con el número de empadronados, siendo sensiblemente inferior a la cifra proporcionada por el INE. Esto se debe a un proceso irregular y de carácter político, que está siendo atendido por los tribunales. Por lo tanto, se puede esperar que la instalación funcione bien durante un tiempo ilimitado, pues no se permite la construcción de nuevas viviendas y cabe esperar una tendencia similar a la tasa de crecimiento del 0.53%.

La tasa de crecimiento se ha calculado mediante la expresión proporcionada por el INE, la cual presenta la siguiente forma:

$$P = P_0 \times \left(1 + \frac{r}{100}\right)^n \quad (1)$$

- ✓ P (población futura, N.º de habitantes)
- ✓ P₀ (población actual, N.º de habitantes)
- ✓ r (tasa de crecimiento)
- ✓ n (número de años)

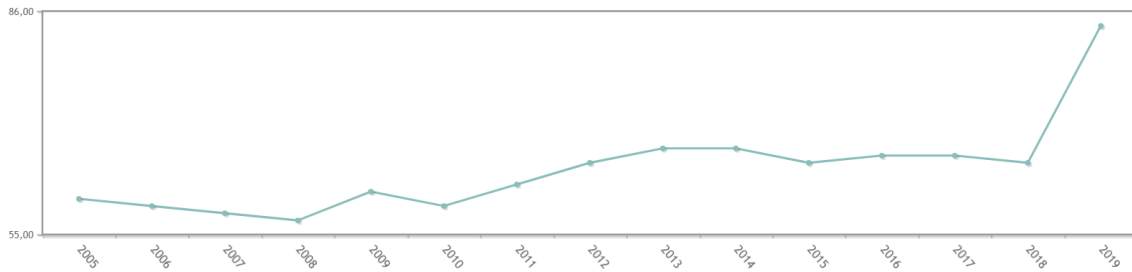


Figura 16. Gráfico de líneas sobre la población permanente de T.M La Acebeda en los últimos 15 años. Fte: INE

4.9. Caudales

Para el diseño del humedal artificial se debe tener en cuenta de cuanto caudal va a entrar al sistema. Para saber este dato, son varias las opciones propuestas por la bibliografía consultada, como campañas de aforo o a partir de datos de los consumos de agua de abastecimiento (García Serrano y Corzo Hernández, 2008). Como ninguno de los métodos propuestos era factible, se utilizó otro propuesto por los mismos autores, en el que a partir de una dotación obtenida por bibliografía se puede calcular un caudal medio diario, unidad fundamental de trabajo para el diseño.

Para ello, se determinó un número de habitantes equivalentes (he), suponiendo que si actualmente el padrón está en 84 habitantes podría crecer en el escenario más limitante a el doble, es decir, 168. Por seguridad, se ha decidido incrementar la cifra a 200 he, que será el dato de partida.

La dotación por valores bibliográficos se ha determinado en un total de **150 litros** por he y día. Por tanto, y atendiendo a lo propuesto en el manual de García Serrano y Corzo Hernández del 2008, el caudal medio diario (Q) tomaría un valor de 30 m³/día:

$$Q_{m,d} = \frac{\beta \times P \times D}{1000} \quad (2)$$

- ✓ Q_{m,d} (m³/día)
- ✓ β (adimensional, es la cantidad de agua de abastecimiento que se convierte en agua residual, expresada en tanto por uno. En este caso se supone de un 1)
- ✓ P (población, 200 hab.)
- ✓ D (dotación, litros/hab. día)

Para la determinación del caudal punta horario, medido en m³/h, es necesario conocer el coeficiente de mayoración, denominado Coeficiente Punta Horario (C_{ph}). Su expresión es de la siguiente forma:

$$C_{ph} = \frac{5}{P^{1/6}} \quad (3)$$

- ✓ C_{ph} (adimensional)
- ✓ P (población, 200 hab.)

El valor calculado del coeficiente punta horario es de 6.54. Por lo tanto, para obtener el caudal punta horario (Q_{ph}), basta con multiplicar el caudal medio horario (Q_h , entendido como el caudal medio diario (Q) entre 24h) por dicho coeficiente punta. El valor resultante es de 8.17 m³/hora.

$$Q_{punta h} = Q_{m,d} \times C_{ph} \quad (4)$$

- ✓ $Q_{punta h}$ (caudal punta horario, m³/h)
- ✓ $Q_{m,d}$ (caudal medio horario, m³/h)
- ✓ C_{ph} (adimensional)

Para calcular el caudal punta diario se basa en la misma expresión anterior, pero en vez de utilizar el coeficiente punta horario se utiliza el punta *diario*, valor adimensional de 1.7 tomado de la bibliografía. Por lo tanto, multiplicando dicho coeficiente por los 30 m³/día obtenemos el “día con más agua en todo el año”, siendo el caudal punta diario 51 m³/día.

$$Q_{punta d} = Q_{m,d} \times C_{pd} \quad (5)$$

- ✓ $Q_{punta d}$ (caudal punta diario, m³/día)
- ✓ $Q_{m,d}$ (m³/día)
- ✓ C_{pd} (adimensional)

De igual manera se calcula el caudal mínimo diario, supuesto como un 30% del caudal medio diario y tomando un valor de 9 m³/día

$$Q_{min,d} = Q_{medio diario} \times 0.3 \quad (6)$$

- ✓ $Q_{min,d}$ (caudal mínimo diario, en m³/día)
- ✓ $Q_{medio diario}$ (m³/día)

Por otro lado, el caudal máximo diario, supuesto el doble del caudal punta diario, con un valor de 102 m³/día.

$$Q_{max,d} = Q_{medio diario} \times 2 \quad (7)$$

- ✓ $Q_{max,d}$ (caudal máximo diario, en m³/día)
- ✓ $Q_{medio diario}$ (m³/día)

Finalmente, el último caudal necesario para el diseño de las instalaciones se corresponde como el caudal máximo instantáneo, entendido como tres veces el caudal medio diario, siendo su valor por tanto de 90 m³/día, según la siguiente expresión:

$$Q_{max,i} = Q_{m,d} \times 3 \quad (8)$$

✓ $Q_{max,i}$ (m³/día)

A continuación se recogen los valores de caudales de trabajo en la siguiente tabla, con el objetivo de clarificar y facilitar su uso:

Tabla 4. Caudales de trabajo para el diseño de los humedales artificiales. Elaboración propia

Variable	Unidades	Valor
he	nº	200
Qhe	l/habdia	150
Qmedd	m3/dia	30
Dotación	l/habdia	187.5
β (con 20% riego)	tantox1	0.8
Cph	-	6.54
Qmedh	m3/h	1.25
Qmed	l/s	0.35
Qpuntah	m3/h	8.17
Qpuntad	m3/dia	51
Qmind	m3/dia	9
Qmaxdiario	m3/dia	102
Qmaxinst	m3/dia	90

5. Diseño de las instalaciones

5.1. Justificación

Para determinar cuál de los 4 tipos principales de humedales artificiales encaja mejor de acuerdo con las características de la zona, se han valorado las principales peculiaridades de cada uno en base a la información descrita en el apartado 3.2) *Descripción de los humedales artificiales*.

De entre las opciones posibles, se ha descartado el humedal artificial horizontal superficial, al ser el humedal que mayor superficie requiere y en el que el agua circula en lámina libre, lo que favorece la aparición de insectos como mosquitos y moscas.

A su vez se ha descartado el sistema francés, ya que aunque no necesita pretratamiento y pueden tratar agua y fangos al mismo tiempo, se sabe por consultas a expertos que el sistema en sí mismo provoca malos olores. Esto en principio no es una desventaja teniendo en cuenta que el humedal va a estar a una distancia suficiente para evitar su afección al núcleo urbano, sin embargo la zona de emplazamiento está dentro de un paraje turístico y muy próxima a un camping, pudiendo causar afección al sector turístico. Por ello, se ha decidido evitar su empleo.

Finalmente, la decisión se reduce a si elegir la alternativa del humedal horizontal subsuperficial o emplear el humedal de tipo vertical. Ambos sistemas son adecuados y cumplen con los objetivos de reducción de la concentración de contaminantes a los niveles establecidos por la legislación, creación de entorno ambientalmente amigable y reducción del impacto paisajístico.

Por tanto, el estudio se fundamentará en el diseño de estos dos tipos de sistemas, además del resto de instalaciones que se requieren para el pretratamiento y el tratamiento de fangos.

5.2. Concentraciones de los contaminantes

Para la determinación de la concentración de los contaminantes a la entrada del sistema y sin ningún tipo de tratamiento, se ha tomado en consideración los valores propuestos en el manual de la IWA de 2017. Estos valores se corresponden con la emisión unitaria de cada tipo de contaminante por habitante y por día, cuyo acrónimo se denominará VEMU. Se adjuntan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Valores de emisión unitaria de cada tipo de contaminante por habitante y día. Fuente: IWA

Variable	Unidad	Valor
DBO he	gDBO/habdia	60
DQO he	gDQO/habdia	120
SS he	gSS/habdia	30
NKT he	gNT/habdia	11
PT he	gPT/habdia	1.7

Con estos valores se puede determinar la concentración de entrada de los contaminantes al sistema, mediante la expresión obtenida del manual de (García Serrano y Corzo Hernández, 2008):

$$C = \frac{VEMU \times 1000}{D} \quad (9)$$

- ✓ C (concentración, mg/l)
- ✓ VEMU (Valor de emisión másica unitaria, g/hab.día)
- ✓ D (dotación, l/hab.día)

Los valores de la concentración de entrada de los contaminantes son, por tanto:

$$DBO_5 = \frac{60 \times 1000}{150} = 400 \text{ mg/l}$$

$$DQO = \frac{120 \times 1000}{150} = 800 \text{ mg/l}$$

$$SS = \frac{30 \times 1000}{150} = 250 \text{ mg/l}$$

$$N_T = \frac{11 \times 1000}{150} = 73.33 \text{ mg/l}$$

$$P_T = \frac{1.7 \times 1000}{150} = 11.33 \text{ mg/l}$$

Estos valores deberán reducirse hasta los límites establecidos en la Directiva de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas 91/271/CEE, cuyos límites establecidos se indican en la siguiente tabla:

Tabla 6. Límite legal de vertido al medio natural según la Directiva 91/271/CEE

Parámetro	Límite legal	Unidades
DBO	25	mg/l
DQO	125	mg/l
SST	35	mg/l
NT	15	mg/l
PT	2	mg/l

5.3.Obra inicial

Como elementos de la obra inicial, antes de la puesta en marcha del humedal y con el fin de asegurar su correcto funcionamiento, se diseñarán los siguientes sistemas: canal de desbaste (que contará con un sistema de rejillas de separación y un aliviadero), un pretratamiento que asegure un mejor funcionamiento del humedal artificial, y un sistema de tratamiento de lodos.

Canal de desbaste

Aliviadero: el aliviadero es una estructura que es ineludible en el canal de desbaste siempre y cuando se trabajen con redes unitarias. Tras una previa consulta al Canal de Isabel II, se confirmó este hecho y por lo tanto su diseño es necesario.

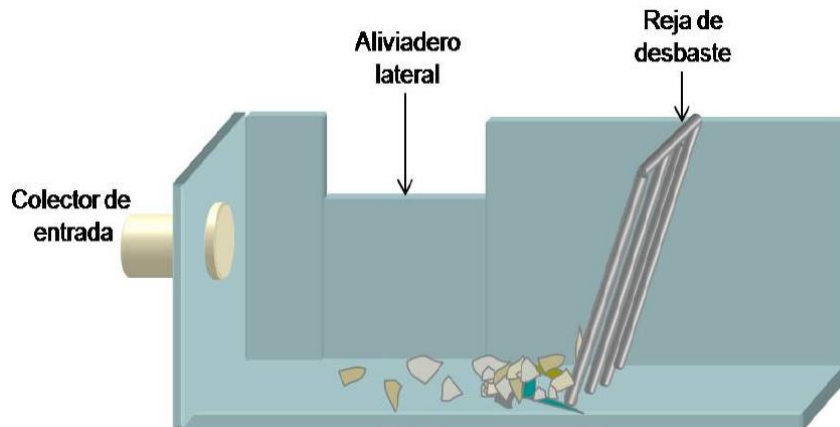


Figura 17. Esquema básico del canal de desbaste y aliviadero. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008)

Para el diseño de esta estructura se necesita determinar la longitud del brazo “rebajado” que aparece en la Figura 17. Dicha longitud se calcula mediante el cociente entre el caudal por metro lineal (Q) y caudal a aliviar (Q_v).

El Q_v se calcula como la diferencia entre caudal de lluvia y el caudal medio excesivo, mayorado según (García Serrano y Corzo Hernández, 2008) con un factor de 10:

$$Q_v = Q_{lluv} - 10 \times Q_{m,d} \quad (10)$$

- ✓ Q_v (caudal a aliviar, m^3/s)
- ✓ Q_{lluv} (caudal producido por las lluvias, m^3/s)
- ✓ $Q_{m,d}$ (caudal medio diario, m^3/s)

Sin embargo, bajo consulta de expertos del Departamento de Calidad de Aguas del Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, se considera que un factor de 10 es excesivo, siendo más adecuado un factor comprendido entre 2 y 5 veces el caudal medio diario. Para este diseño se ha considerado un factor de 3, por lo que el caudal medio diario corresponde con $90 m^3/día$, o $0.001042 m^3/s$.

Esto quiere decir que pasarían $30 m^3/día$ ($1.25 m^3/h$) de agua residual y $60 m^3/día$ ($2.5 m^3/h$) de agua de lluvia, por lo que la reducción de las concentraciones en la peor situación (al comienzo de la lluvia) es de $1/3$, siendo mayor cuanto más tiempo llueve. Este planteamiento se trata de una suposición, ya que habría que considerar para la dilución el caudal de residual el instante en que llueve en cada momento (dependiente de la intensidad de lluvia), pero la obtención de pluviogramas y la dificultad de cálculo complican este apartado y no es objeto de este TFM.

Por lo tanto, se hace la siguiente aproximación teniendo en cuenta el subapartado 4.2 *Climatología*:

- La precipitación del mes más lluvioso es de 79 mm/mes
- La precipitación se reparte en 10 días. El día de mayor precipitación llueve 25 mm
- De esos 25 mm, la máxima precipitación por hora es de 10 mm/h
- La superficie impermeable que genera escorrentía es de 10^4 m^2

La escorrentía generada es, por tanto:

$$Q_{lluv} = I \times Sup \quad (11)$$

- ✓ Q_{lluv} (caudal producido por las lluvias, m^3/s)
- ✓ I (intensidad de lluvia, $\text{l}/\text{m}^2 \text{ h}$)
- ✓ Sup (superficie, m^2)

$$Q_{lluv} = 10 \times 10^4 = 100 \text{ m}^3/\text{h}$$

Sumando dicho caudal de lluvias y el caudal medio diario, y teniendo en cuenta el factor de 3, de la *ecuación 10* obtenemos el caudal a aliviar:

$$Q_v = (100 + 1.25) - (1.25 + 2.5) = 97.5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dicho caudal expresado en m^3/s toma un valor de 0.0278. Con esto, queda determinar la altura y longitud del brazo del aliviadero. Para ello, primero se ha obtenido la altura mediante la ecuación de Manning, utilizando el método de aproximaciones sucesivas hasta alcanzar primero el valor del caudal medio diario y luego el valor del triple del caudal medio diario. La diferencia de alturas de las aproximaciones será la altura necesaria del brazo:

$$Q = \frac{(1/r) \times (h/w)^{5/3} \times pte^{1/2}}{(w + 2 \times h)^{2/3}} \quad (12)$$

- ✓ r (rugosidad, adimensional)
- ✓ h (altura, m)
- ✓ w (ancho, m)
- ✓ pte (pendiente, m/m)
- ✓ Q (caudal objetivo, m^3/s)

En esta ecuación ya se ha incluido la relación $Q = v(\text{m}/\text{s}) * h(\text{m}) * w(\text{m})$, de tal manera que el cálculo de la altura dando valores es inmediato. Suponiendo:

Tabla 7. Valores supuestos para obtención de altura para caudal medio diario. Elaboración propia

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal circulante	0.00035	m ³ /s
Anchura del canal	0.17	m
Rugosidad	0.014	-
Pendiente	0.001	m/m
h	0.016	m
Velocidad	0.12784	m/s

Tabla 8. Valores supuestos para obtención de altura para el triple del caudal medio diario. Elaboración propia

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal circulante	0.00104	m ³ /s
Anchura del canal	0.17	m
Rugosidad	0.014	-
Pendiente	0.001	m/m
h	0.033	m
Velocidad	0.18674	m/s

La diferencia de altura, por tanto, es de $0.033 - 0.016 = 0.017$ metros. Atendiendo a la ecuación propuesta por (García Serrano y Corzo Hernández, 2008), se obtiene el caudal por metro lineal:

$$Q_{m,l} = 1.83 \times (1 - (0.2 \times h)) \times h^{1.5} \quad (13)$$

- ✓ $Q_{m,l}$ (caudal por metro lineal, m³/m s)
- ✓ h (altura del aliviadero, m)

$$Q_{m,l} = 1.83 \times (1 - (0.2 \times 0.017)) \times 0.017^{1.5} = 0.00404 \text{ m}^3/\text{m s}$$

Teniendo en cuenta el caudal a aliviar, la longitud del brazo es de:

$$L = \frac{Q_v}{Q_{m,l}} \quad (14)$$

- ✓ L (longitud del brazo, m)

$$L = \frac{0.0278}{0.00404} = 6.70 \text{ m}$$

Rejas de separación: las rejas de separación, tomando de referencia el “manual para la implantación de sistemas de depuración para pequeñas poblaciones” (CEDEX, 2010), pueden ser de dos tipos según sea su limpieza: automáticas o manuales. Estas últimas serán las propuestas para su implementación en el sistema.

Las rejas, entendidas como estructuras de barras paralelas entre sí, que están espaciadas uniformemente y son perpendiculares a la dirección principal del flujo. Su función es evitar la entrada de elementos sólidos al sistema y asegurar por tanto un

buen funcionamiento del mismo. Suelen estar inclinadas respecto al plano horizontal en torno a los 70°.

Las rejas de limpieza manual son las más utilizadas en pequeñas poblaciones, y tienen como elementos principales de limpieza un cestillo perforado que guarda los sólidos resultantes de la limpieza con un rastrillo. La perforación permite el escurrimiento del agua de los sólidos, y permite que la gran mayoría del agua pueda retornar al sistema para ser depurada.

Existen, a su vez, dos tipos de rejas, según la dimensión de los sólidos que se quieran separar: rejas de finos, y rejas de gruesos. Se diferencian entre sí dependiendo del grosor del barrote, y del espaciamiento entre ellos (luz de barrotes). En este caso particular, se ha decidido diseñar sólo un tipo de rejas al tratarse de una población muy pequeña, en donde las rejas presentan una luz de barrotes propia de rejas de finos ya que se busca evitar la colmatación a medio y largo plazo del sistema por partículas de pequeño tamaño.

Tabla 9. Valores recomendados para el diseño de rejas del canal de desbaste. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008)

Características	Reja de Gruesos	Reja de Finos
Modo de funcionamiento	Manual	Automático
Anchura barrotes (mm)	>12	<6
Luz entre barrotes (mm)	50 - 100	oct-25
Pendiente con la vertical (°)	30 - 45	
Velocidad de aproximación (m/s)	0.3 - 0.6	
Pérdida de carga admisible (m)	0.15	0.15

Como datos de partida que se ha considerado en base a la bibliografía consultada (García Serrano y Corzo Hernández, 2008) se tiene:

- Ancho de barrote (propio de reja de gruesos): 10 mm
- Luz entre barrotes (propia de reja de finos): 15 mm
- Porcentaje de colmatación: 30%
- Inclinación de las rejas (plano vertical): 45°
- Ancho de canal: 20 cm
- Velocidad de aproximación: 0.3 m/s
- Tiempo de retención hidráulico (TRH): 10 segundos

El número de barrotes necesario será el número de espacios menos uno, obtenido mediante la siguiente expresión:

$$A_c = n_e \times l_b + n_b \times a_b \quad (15)$$

- ✓ A_c (ancho del canal, m)
- ✓ n_e (número de espacios, adimensional)
- ✓ l_b (luz de barrotes, m)
- ✓ n_b (número de barrotes, adimensional)
- ✓ a_b (ancho de barrote, m)

Simplificando y despejando de la ecuación anterior (15) se puede obtener el número de espacios necesarios, teniendo en cuenta que el número de barrotes necesario será el número de espacios menos uno:

$$n_e = \frac{A_c \times a_b}{l_b \times a_b} \quad (16)$$

$$n_e = \frac{0.2 + 0.01}{0.015 + 0.01} = 8$$

Por lo que el número de barrotes será de 7. Con estos parámetros se puede calcular el ancho útil de paso, respondiendo a la siguiente expresión:

$$W_u = (A_c - n_b \times a_b) \times \left(1 - \frac{G}{100}\right) \quad (17)$$

- ✓ W_u (ancho útil de paso, m)
- ✓ G (porcentaje de colmatación, en tanto por uno)

$$W_u = (0.2 - 7 \times 0.01) \times \left(1 - \frac{0.3}{100}\right) = 0.09 \text{ m}$$

Para calcular el calado resultante para dicho porcentaje de colmatación, y teniendo en cuenta el ancho útil de paso, se ha considerado una velocidad de aproximación no superior a 0.3 m/s para el caudal instantáneo calculado en el apartado 4.9) *Caudales*, cuyo valor es de 90 m³/día, o 0.001 m³/s. La ecuación es:

$$h = \frac{Q_{max,i}}{v \times W_u} \quad (18)$$

- ✓ h (calado, m)
- ✓ $Q_{max,i}$ (m³/s)
- ✓ v (m/s)

$$h = \frac{0.001}{0.3 \times 0.09} = 0.04 \text{ m}$$

El valor del calado es **4 cm** para que se cumplan las condiciones anteriormente descritas.

Finalmente, para determinar la longitud del canal y asumiendo un tiempo de retención hidráulico mínimo de 10 segundos, se obtiene una longitud de 3 m, según lo siguiente:

$$L = TRH \times v \quad (19)$$

- ✓ TRH (tiempo de retención hidráulico, segundos)

$$L = 10 * 0.3 = 3 \text{ m}$$

Se adjunta la tabla en donde se recoge todo lo anterior:

Tabla 10. Parámetros de diseño para la reja del canal de desbaste. Elaboración propia

Variable	Acrónimo	ud	Valor
Ancho canal	Ac	m	0.2
Nº espacios	ne	-	8
Luz barrotes	lb	m	0.015
Nº barrotes	nb	-	7
Ancho barrotes	Ab	m	0.01
Colmatación	G	tantox1	0.3
Pendiente	pte	º	45
v aprox	vapo	m/s	0.3
Ancho util paso	Wu	m	0.09
Qmaxhorario	Qmaxh	m ³ /s	0.0010
Calado	h	m	0.04
TiempoRH	TRH	s	10
Longitud	lb	m	3

Pretratamiento: Tanque Imhoff

El tanque Imhoff es una instalación en donde se producen dos procesos de forma simultánea: una decantación en la zona superior (zona de decantación) y una digestión en su zona inferior (zona de digestión). Estos procesos no se ven afectados el uno por el otro ya que en la zona de comunicación entre ambas cámaras existe un mecanismo que impide la ascensión de gases o fangos a la zona superior (CEDEX, 2010).

El mecanismo de decantación es físico, separando los elementos sedimentables de los flotantes mediante gravedad; sin embargo, el mecanismo de la digestión es biológico, siendo esta anaerobia y liberando biogás en forma de metano y dióxido de carbono, además de ácido sulfhídrico en algunos casos, lo que produce mal olor (CEDEX, 2010).

Los fangos son digeridos de 6 meses a un año, en función del tipo de clima que presente la zona, hasta ser extraídos del sistema. En nuestro caso, al tratarse de un clima frío se considerará un periodo de extracción de 1 año. El diseño que se ha realizado corresponde al de un tanque Imhoff de tipo rectangular.

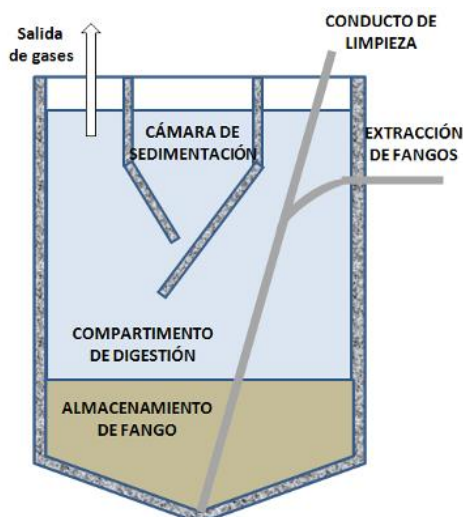


Figura 18. Esquema básico de un tanque Imhoff. Fuente: sswm.info

El diseño del tanque Imhoff propuesto para el caso particular de La Acebeda sigue las directrices y recomendaciones marcadas según el manual de (García Serrano y Corzo Hernández, 2008). Los valores de referencia se adjuntan en la siguiente tabla:

Tabla 11. Valores recomendados para los parámetros de diseño del tanque Imhoff. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008)

Parámetro	Unidades	Rango	Valor Usual
<i>Zona de decantación</i>			
Carga hidráulica superficial punta diaria	m ³ /m ² dia	24-40	32
Tiemp de retención a Qmed	h	2-4	3
Tiemp de retención a Qpunta horario	h	-	1
Velocidad horizontal punta horaria	m/min	-	<0.3
Relación long/ancho	-	2/1-5/1	3/1
Pendiente cámara de decantación	-	1.25:1-1.75/1	1.5:1
Obertura inferior	m	0.15-0.3	0.25
Pestaña inferior	m	0.15-0.3	0.25
Deflector debajo de la superficie	m	0.25-0.4	0.3
Deflector encima de la superficie	m	0.3	0.3
Resguardo	m	0.45-0.6	0.6
<i>Zona de escape de gases</i>			
Área (% superficie total)	%	15-30	20
Anchura	m	0.45-0.75	60
<i>Zona de digestión</i>			
Tiempo de digestión	años	0.5-1.5	1
Tasa de emisión unitaria de lodos	l/hab año	100-200	140
Tubería de extracción de lodos	m	0.2-0.3	0.25
Distancia libre hasta el nivel del lodo	m	0.3-0.9	0.6
Profundidad total del agua en el tanque	m	7-9	9

Zona de decantación

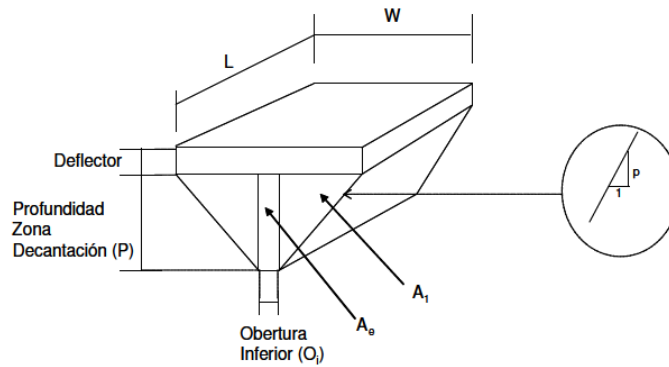


Figura 19. Esquema de cámara de decantación. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008)

A modo de facilitar al lector la identificación de valores utilizados en el siguiente diseño, se adjunta una tabla donde se recogen todos los valores iniciales seleccionados de entre los valores recomendados por el manual:

Tabla 12. Valores iniciales escogidos para el diseño del tanque Imhoff. Elaboración propia

Variable	ud	Valor	Variable	ud	Valor
habitantes	nº	200	Wdec	m	2.45
Qhe	l/habdia	150	Wgas	m	0.45
Qmed	m3/h	1.25	L/W	-	3/1
Qpunta	m3/h	8.173	p	m/m	1
Cph	-	6.54	Oi	m	0.3
Cs	m3/m2h	0.833	hresguardo	m	0.6
TRHmed	h	3	hdeflector	m	0.3
TRHpunta	h	1	hlibre	m	0.6
Ldec	m	4.00	VEU	l/habaño	140

La superficie de esta cámara se calcula escogiendo un valor de carga hidráulica superficial punta diaria (CHSPD) de la bibliografía, cuyo valor en este caso será de 20 m³/m²día, o lo que equivale a 0.833 m³/m²h. La expresión es:

$$S = \frac{Q_{punta,h}}{L_{Hpunta}} \quad (20)$$

- ✓ S (superficie, en m²)
- ✓ Q_{punta,h} (caudal punta, en m³/h)
- ✓ L_{Hpunta} (CHSPD, en m³/m²h)

$$S = \frac{8.173}{0.833} = 9.81 \text{ m}^2$$

Teniendo en cuenta esta superficie, y eligiendo una relación longitud/anchura de 3/1, obtenemos una **longitud (L)** del decantador de **4 metros** y un **ancho (W)** de **2.45 metros**. Con todo esto, se calcula la profundidad del decantador, parámetro que va en función de la geometría del prisma que se indica en la *Figura 18* y de sus parámetros:

$$P = \left[\frac{W - O_i}{2} \right] \times p \quad (21)$$

- ✓ P (profundidad, m)
- ✓ W (ancho, m)
- ✓ O_i (longitud obertura inferior, m)
- ✓ P (pendiente zona decantación, m/m)

$$P = \left[\frac{2.45 - 0.3}{2} \right] \times 1 = 1.08 \text{ m}$$

Una vez hallada la profundidad y habiendo calculado el largo, se realizan los cálculos restantes para obtener el valor de la sección del prisma, siendo esta un triángulo y un rectángulo:

$$A_e = O_i \times P \quad (22)$$

- ✓ A_e (área del rectángulo, m^2)

$$A_e = 0.3 \times 1.08 = 0.32 \text{ m}^2$$

Después de calcular el área de cada triángulo:

$$A_1 = \left[\frac{W - O_i}{2} \right] \times \frac{P}{2} \quad (23)$$

- ✓ A_1 (área del triángulo, m^2)

$$A_1 = \left[\frac{2.45 - 0.3}{2} \right] \times \frac{1.08}{2} = 0.58 \text{ m}^2$$

A continuación se obtiene la superficie total de la sección, siendo esta la suma de los dos triángulos y el rectángulo:

$$A_t = 2 \times A_1 + A_e \quad (24)$$

- ✓ A_t (área total de la sección triangular, m^2)

$$A_t = 2 \times 0.58 + 0.32 = 1.48 \text{ m}^2$$

Con todo esto, se procede a calcular el volumen del decantador, mediante la expresión siguiente:

$$V_{dec} = (h_{deflector} \times S) + (A_t \times L) \quad (25)$$

- ✓ V_{dec} (m^3)
- ✓ $h_{deflector}$ (altura zona sumergida deflector, m)
- ✓ L (longitud, m)

$$V_{dec} = (0.3 \times 9.81) + (1.48 \times 4) = 8.86 \text{ m}^3$$

Finalmente se procede a realizar las comprobaciones necesarias para asegurar su funcionamiento. Para ello, la velocidad punta debe de ser menor a 0.3 m/min , el tiempo de retención hidráulico medio no inferior a 2 horas y el tiempo de retención punta mayor a 1 hora .

$$v_{punta,h} = \frac{Q_{punta,h}}{A_t \times 60} < 0.3 \text{ m/min} \quad (26)$$

$$TRH_{medio} = \frac{V_{dec}}{Q_{medio,h}} > 2 \text{ horas} \quad (27)$$

- ✓ TRH_{medio} (tiempo de retención hidráulico medio, h)

$$TRH_{punta} = \frac{V_{dec}}{Q_{punta,h}} > 1 \text{ hora} \quad (28)$$

- ✓ TRH_{punta} (tiempo de retención hidráulico punta, h)

$$v_{punta,h} = \frac{8.173}{1.48 * \times 60} = 0.09 \text{ m/min}$$

$$TRH_{medio} = \frac{8.86}{1.25} = 7.09 \text{ horas}$$

$$TRH_{punta} = \frac{8.86}{8.173} = 1.44 \text{ horas}$$

Por tanto, todos los valores están dentro de sus parámetros y comprobados, lo que permite continuar con el diseño del tanque atendiendo a los gases y los lodos:

Superficie total (teniendo en cuenta el escape de gases)

La superficie total se calcula teniendo el porcentaje de la superficie de la zona de gases respecto a la superficie total, supuesta esta como un 20% del total, según la expresión:

$$S_t = (1 + \%S_{gas}) \times S_{dec} \quad (29)$$

- ✓ S_t (superficie total, m^2)
- ✓ $\%S_{gas}$ (superficie zona de gases, tanto por uno)
- ✓ S_{dec} (superficie del decantador, m^2)

$$S_t = (1 + 0.2) \times 9.81 = 11.77 \text{ m}^2$$

El ancho final será la suma del ancho de la zona de decantación más el ancho de la zona de escape de gases, siendo este de 0.45 m . Por tanto, el ancho total es de:

$$W_t = W_{dec} + W_{gas} \quad (30)$$

- ✓ W_t (ancho total, m)
- ✓ W_{dec} (ancho decantador, m)

✓ W_{gas} (ancho de la zona de gases, m)

$$W_t = 2.45 + 0.45 = 2.90 \text{ m}$$

El cálculo del largo total sabiendo el ancho y la superficie es inmediato, siendo el valor L_t de 4.06 m. A estos valores se le deben sumar 2 veces el espesor de pared, valor de 0.1 m por cada pared. De esta forma el ancho total es de 3.10 m, el largo total de 4.26. La multiplicación de ambos da una **superficie total contando con espesor de pared de 13.21 m²**.

Zona de digestión

Para la determinación del volumen de lodos generado, se debe tener en cuenta la geometría de la cámara de digestión, atendiendo al cálculo de diferentes alturas, según se muestra en el siguiente esquema:

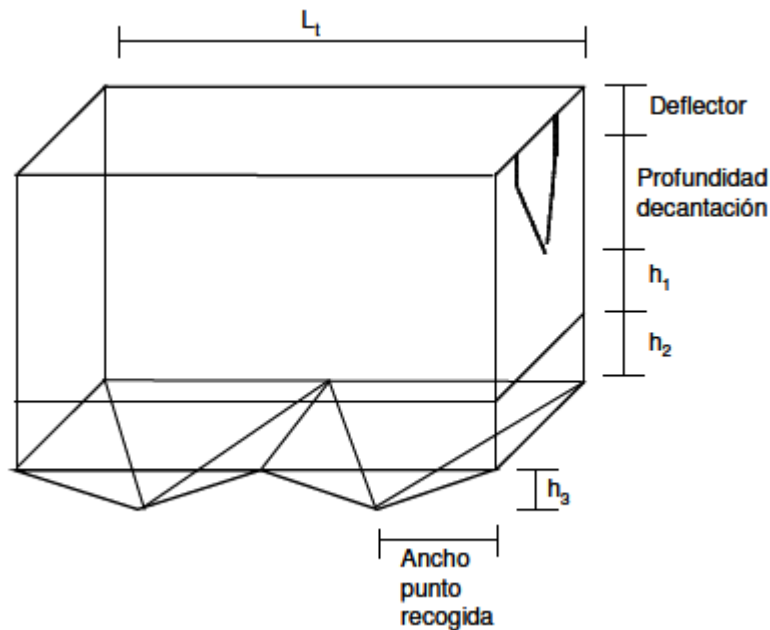


Figura 20. Esquema de tanque Imhoff con dos puntos de recogida de lodos. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008)

El volumen de lodos generados se obtiene mediante los parámetros de valor de emisión unitaria (VEU), en litros/hab·año, el número de habitantes, y el tiempo que se dejará digerir hasta la extracción del fango. La expresión es la siguiente:

$$V_{\text{lodos}} = \frac{VEU \times T_d \times N}{1000} \quad (31)$$

- ✓ V_{lodos} (m³)
- ✓ VEU (litros/hab·año)
- ✓ T_d (años)
- ✓ N (nº de habitantes)

$$V_{\text{lodos}} = \frac{140 \times 1 \times 200}{1000} = 28 \text{ m}^3$$

La altura de fondo de forma piramidal del tanque (h_3) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$h_3 = [(L_t/n)/2] \times tg \alpha \quad (32)$$

- ✓ h_3 (m)
- ✓ L_t (longitud total, m)
- ✓ n (número de punto de recogida)
- ✓ α (inclinación paredes de fondo, grados)

$$h_3 = [(4.06/2)/2] \times tg(40) = 0.85 \text{ m}$$

Sabiendo que el volumen de lodos, ya conocido, también se puede hallar mediante la siguiente expresión:

$$V_{lodos} = (h_2 \times L_t \times W_t) + \left(\frac{1}{3} \times L_t \times W_t \times h_3\right) \quad (33)$$

- ✓ h_2 (altura ocupada por los lodos sin tener en cuenta h_3 , m)

Mediante esta ecuación, y despejando, se puede hallar h_2 :

$$h_2 = \frac{V_{lodos} - \left(\frac{1}{3} \times L_t \times W_t \times h_3\right)}{L_t \times W_t} \quad (34)$$

$$h_2 = \frac{28 - \left(\frac{1}{3} \times 4.06 \times 2.90 \times 0.85\right)}{4.06 \times 2.90} = 2.10 \text{ m}$$

Finalmente, y teniendo en cuenta lo anteriormente calculado, se puede hallar la profundidad total del tanque (altura total) y el volumen total del mismo, tomando como resguardo 60 cm, altura de deflector 30 cm y altura libre 60 cm:

$$h_t = h_{resguardo} + h_{deflector} + P + h_1 + h_2 + h_3 \quad (35)$$

- ✓ h_t (altura total, m)
- ✓ $h_{resguardo}$ (altura del resguardo, m)
- ✓ h_1 (altura libre)

$$h_t = 0.6 + 0.3 + 1.08 + 0.6 + 2.10 + 0.85 = 5.52 \text{ m}$$

El volumen total del Tanque Imhoff es:

$$V = V_{resguardo} + V_{dec} + V_{lodos} + (h_1 \times L_t \times W_t) \quad (36)$$

- ✓ V (volumen total, m^3)
- ✓ $V_{resguardo}$ (producto altura resguardo y superficie decantador y gases, m^3)

$$V = (0.6 \times 11.77) + 8.86 + 28 + (0.6 \times 4.06 \times 2.90) = 50.98 \text{ m}^3$$

Sistema de tratamiento de fangos

Para el tratamiento de los fangos producidos por el tanque Imhoff, se pensó en dos alternativas que dieran respuesta a esta necesidad. La primera de ellas consistía en una era de secado, donde simplemente se dejarían secar los fangos hasta que su estabilización permitiera ser utilizado como compost para los agricultores del municipio.

Sin embargo, la segunda alternativa, que es la que se ha escogido y diseñado, aunque es de lejos más complicada muestra una serie de ventajas frente a la anterior, que se describirá más adelante. Dicha alternativa consiste en el uso de un Lecho de Carrizo de Secado de Lodos, o en sus siglas en inglés SDRB (Sludge Drying Reed Bed). Para su descripción y diseño en este apartado se ha tomado como referencia el Trabajo de Fin de Máster de Lenin Silva, sobre el “*Diseño de sistemas para el tratamiento de lodos mediante tecnologías de bajo coste para la EDAR Vall dels Alcalans (Valencia)*” de noviembre de 2019, ya que recoge una revisión muy completa de los diseños de este tipo en climas mediterráneos.

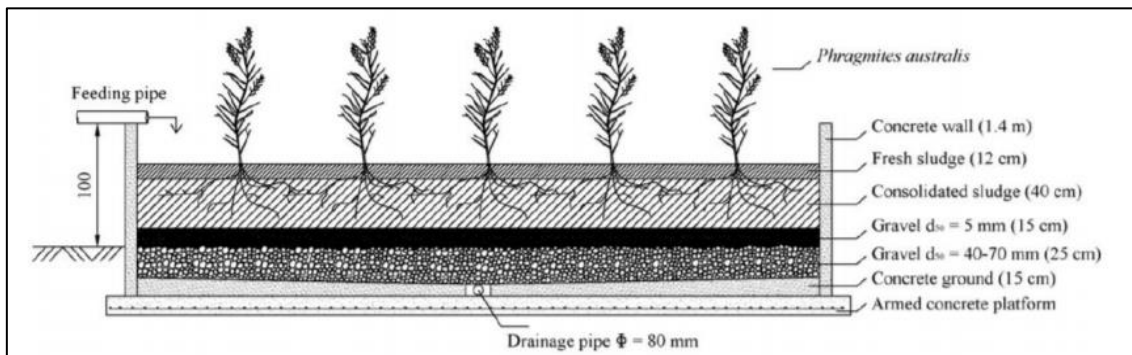


Figura 21. Sección transversal de un SDRB. Fuente: (Silva, 2019)

Este sistema mezcla por un lado 1) un sistema de secado en un lecho de arenas con 2) el funcionamiento de un humedal artificial de flujo vertical. Los dos procesos principales que se dan para la deshidratación y estabilización de los fangos son la percolación (mecanismo predominante en los primeros días) y la evapotranspiración. Ambos ayudan a reducir notablemente el volumen de fangos, ventaja frente a la era de secado en cuanto a rendimientos.

Todo esto sucede en una cámara excavada e impermeabilizada con material aislante u hormigón, que impide la aportación de lixiviados al suelo natural, cuya pendiente de lecho suele estar en torno a un valor de 1%, conduciendo las aguas de los lodos a una tubería central (como se aprecia en la Figura 20), de unos 80 mm de diámetro que estará perforada y conduce de nuevo estas aguas a la entrada de sistema de depuración.

El funcionamiento básico de los SDRB consiste en una alimentación de lodos discontinua y entubada, en la dirección vertical (de la superficie al lecho), que puede durar desde 1-2 días hasta 1-2 semanas. Estos lodos se van repartiendo en unidades autónomas de funcionamiento denominadas “camas”, donde se van utilizando las que se consideren necesarias según el volumen de lodos mientras el resto permanecen descansando. A

mayor número de camas, más largas serán las series de rotación, mayor serán los periodos de descanso de los lodos y por tanto estos estarán más deshidratados al final del proceso.

Una vez que finaliza la alimentación de fangos al sistema, el lodo se va deshidratando mientras la cama descansa, y el fango influente pasa a otra cama distinta, en donde también se dejará reposar, y así sucesivamente hasta completar el ciclo y alcanzar una altura de lodos máxima, momento en el que se les deja reposar en lo que se denomina el periodo de descanso final.

Una vez esto, se retiran los lodos con pala mecánica con cuidado de no retirar la capa inferior, pues es ahí donde están las raíces de las macrófitas y ellas mismas sin necesidad de plantación se auto-regeneran. Las especies propuestas por la bibliografía son el carrizo (*Phragmites australis*), la enea (*Typha sp.*) o el papiro (*Cyperus papyrus L.*).

La utilización de plantas en estos sistemas es una ventaja frente a las eras de secado ya que fomentan el mecanismo de evapotranspiración para la deshidratación de fangos ya que permiten una mayor oxigenación al producir grietas en la costra superficial formada por el secado de los fangos mediante el movimiento de los tallos por la acción del viento y los procesos existentes en las raíces (succión distribuida por todas las capas del lecho). Las plantas del humedal de deshidratación serán regadas periódicamente con agua tratada para evitar su decaimiento fisiológico.

Para el material filtrante que separa los sólidos totales (ST) de la fracción líquida se recomienda la utilización de piedras de diámetro de 5 cm que proteja la tubería de recogida como capa más profunda, junto con una capa superior de gravas de 2 a 10 cm. La capa más superficial será de arena (0.5 – 1 mm), lo que facilitará el enraizamiento y hará una filtración preliminar.

Los valores utilizados para el diseño básico de este sistema se han tomado como referencia de la bibliografía consultada, según (Silva L., 2019), y se recogen en las siguientes tablas:

Tabla 13. Principales parámetros propuesto para SDRB. Fuente: (Silva, 2019)

Parámetros	Valores recomendados
Máxima tasa de carga de lodos para EDAR con tratamiento biológico de fangos activados (kgST/m ² año)	30 - 60
Mínimo número de camas	8 - 10
Altura de camas sobre superficie del filtro (m)	1.7 - 1.8
Altura de acumulación de lodos (m)	1.5 - 1.6
Altura de seguridad (m)	0.2
Altura del medio filtrante (m)	0.55 - 0.6
Tiempo de almacenamiento en lodos (años)	8 - 10

Tabla 14. Valores de referencia para población similar al T.M de la Acebeda. Fuente (Silva, 2019)

EDAR	Alpens (Catalunya)
hab. equivalentes	1-3
%ST en fango generado	30
Producción de fango (kgST/d)	3
Nº de camas	198
Superficie (m ²)	66
Tasa de carga (kgST/m ² año)	55
Flujo de fango en humedales (m ³ /d)	2
Carga hidráulica (m ³ /m ² d)	0.03
%ST en capa superior	7-26
%ST en capa inferior	20-30

Con esta referencia, y haciendo especial mención a la *Tabla 14* por su similitud con la zona de estudio (ya que tanto La Acebeda como Alpens son poblaciones pequeñas), se han supuestos los siguientes valores iniciales para el diseño del sistema SDRB:

Tabla 15. Valores iniciales supuestos por bibliografía para el diseño de SDRB. Elaboración propia

Variable	Unidad	Valor
Producción de lodos	m ³ /año	28
Densidad	kg/m ³	1200
Tasa de carga lodos	kgST/m ² año	55
nº de camas	-	4
Máximo espesor de lodos	m	1
Espesor capa filtro	m	0.6
Resguardo seguridad	m	0.2
Flujo de fangos	m ³ /dia	2
%ST capa superior	%	26
%ST capa inferior	%	30

Una vez teniendo estos datos de partida, y sabiendo del anterior diseño del tanque Imhoff que los fangos generados al año son 28 m³/año (33600 kg/año), se calcula la producción de lodos en términos de Sólidos Totales (ST), sabiendo que en 1200 kg de lodos 200 kg son ST:

$$P_{lodos} = P_{lodos} \times \delta(ST) \quad (37)$$

- ✓ P_{lodos} (producción de lodos, kg/año)
- ✓ δ (porcentaje de ST en lodos)

$$P_{lodos} = 33600 * \frac{200}{1200} = 5600 \text{ kg ST/año}$$

Sabiendo la producción de lodos en términos de sólidos totales, y considerando una tasa de carga de lodos de 55 kg ST/m²año, la superficie del SDRB es:

$$S = \frac{P_{lodos}}{T_{CL}} \quad (38)$$

- ✓ S (superficie, m²)
- ✓ T_{CL} (tasa de carga de lodos, kg ST/m²año)

$$S = \frac{5600}{55} = 102 \text{ m}^2$$

Para poblaciones pequeñas con 3-4 camas es suficiente para realizar correctamente el ciclo rotativo del fango. En este caso se ha elegido emplear 2 camas, teniendo en cuenta que se sacará el fango del tanque Imhoff cada 6 meses (dos veces al año). Esto permite que una cama trabaje mientras la otra descansa o hace la función de reserva. Cada una tendrá una superficie de 51.1 m² (cálculo inmediato).

Considerando un máximo espesor de lodos de 1 metro, un espesor de la capa filtrante de 60 cm y un resguardo de seguridad de 20 cm, la profundidad total del SDRB es:

$$P_t = P_{max} + E_{cf} + R_s \quad (39)$$

- ✓ P_t (profundidad total, m)
- ✓ P_{max} (máximo espesor de lodos, m)
- ✓ E_{cf} (espesor capa filtrante, m)
- ✓ R_s (resguardo de seguridad, m)

$$P_t = 1 + 0.6 + 0.2 = 1.8 \text{ m}$$

Considerando un vaciado de los fangos del tanque Imhoff cada 6 meses, y contando con que la producción anual de fangos calculada anteriormente es de 28 m³ diarios, se obtiene la altura de los fangos en cada vaciado, según:

$$H = \frac{V_{\text{vaciado}}}{S} \quad (40)$$

- ✓ H (altura de los fangos en cada cama, m)
- ✓ V_{vaciado} (volumen de fangos retirados a los 6 meses, m³)

$$H = \frac{14}{102} = 0.137 \text{ m}$$

Finalmente, se calcula cuántos kilogramos de ST de fango se obtendrían a final de año para su uso como compost en los cultivos del municipio, considerando un % de ST en la capa superior del 26% y del 30% en la capa inferior:

$$P_{\text{final}} = P_{\text{lodos}} \times \%ST_{\text{sup}} + P_{\text{lodos}} \times \%ST_{\text{inf}} \quad (41)$$

- ✓ P_{final} (producto final, kg ST/año)
- ✓ $\%ST_{\text{sup}}$ (porcentaje ST capa superior)
- ✓ $\%ST_{\text{inf}}$ (porcentaje ST capa inferior)

$$P_{\text{final}} = 5600 \times 0.26 + 5600 \times 0.3 = 3136 \text{ kg ST/año}$$

5.4. Humedal Artificial Vertical

Para el diseño del humedal artificial de tipo vertical se ha utilizado el método propuesto por el manual de la International Water Association (IWA, 2017), salvo en lo referente al uso del pretratamiento, ya que en este caso se ha propuesto la utilización de un tanque Imhoff, a diferencia de la fosa séptica propuesta en el manual.

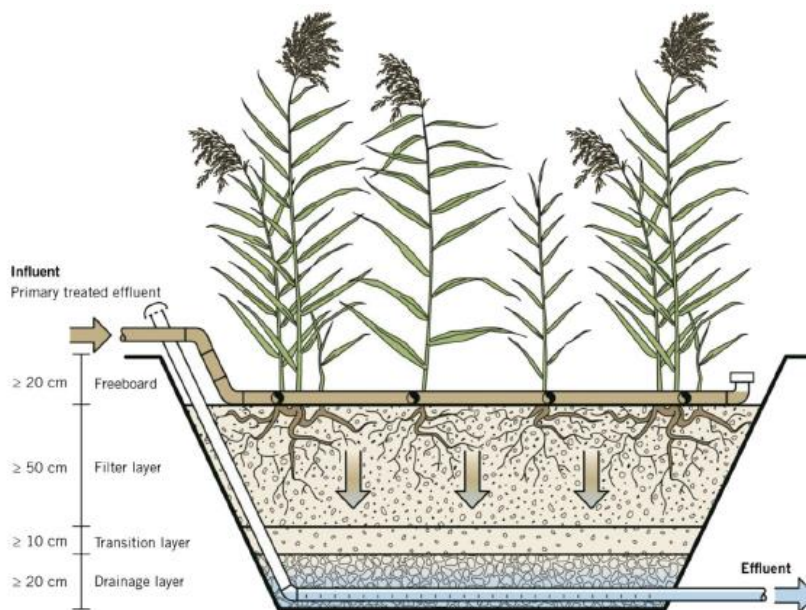


Figura 22. Esquema de humedal artificial vertical. Fuente: (IWA, 2017)

Para saber que concentración de contaminantes llegará a la entrada del sistema se necesita saber cuánto porcentaje de ellos ha sido eliminado en el pretratamiento (Tanque Imhoff). Atendiendo a los rendimientos propuestos (Seoánez, 2000), las

concentraciones de los contaminantes a la entrada del humedal y después del pretratamiento son las siguientes:

Tabla 16. Concentraciones (g/m³) antes y después del Tanque Imhoff (TI), y sus rendimientos. Elaboración propia

Variable	C0 antes de TI	% eliminación	C0 después TI
DBO	400.00	40	240.00
DQO	800.00	40	480.00
SS	250.00	55	112.50
NT	73.33	10	66.00
PT	11.33	10	10.20

El diseño se hará teniendo en cuenta los parámetros DBO₅, DQO y Sólidos Suspendidos (SS), aunque el parámetro utilizado para determinar los valores de diseño será la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Cabe destacar que el diseño del humedal puede hacerse utilizando material de mayor o menos granulometría en la capa principal o capa filtrante. Como regla general, a mayor grosor de material utilizado:

- El sistema aceptará una mayor carga hidráulica y orgánica
- Menor área requerida para el lecho del humedal
- Mayor conductividad hidráulica, y por tanto mejor distribución del agua residual
- Menor rendimiento del sistema, y por tanto mayor concentración de contaminante a en el efluente

La información aportada en el manual y la referencia para la elección de valores recomendados se adjunta en la siguiente tabla, donde se diferencian entre valores para humedales con arena fina (0.06 – 4 mm) y con arena gruesa (2 – 3 mm) para la capa filtrante:

Tabla 17. Parámetros de diseño para dos tipos de sustrato diferentes en humedales verticales. Fuente: (IWA, 2017)

Capa principal	Arena fina (0.06 - 4 mm)	Arena gruesa (2 - 3 mm)
<i>Área superficial</i>		
Carga orgánica por unidad de superficie (gDQO/m ² dia)	20	80
Carga orgánica (g DQO/dia)	4000	4000
Área requerida (m ²)	200	50
Configuración de celdas (m)	10 x 20	5 x 10
<i>Carga intermitente</i>		
Intervalo de las dosis (horas)	6	2
Volumen por dosis (m ³)	1.875	0.625
Superficie del tanque dosificador (m ²)	0.875	0.875
Diferencia de altura tanque-humedal (m)	2.2	0.7
<i>Tuberías de distribución</i>		
Apertura mínima (ap/m ²)	2	1
<i>Concentraciones esperadas del efluente (mg/l)</i>		
DBO ₅	<3	30-40
DQO	<20	80-100
SS	<5	oct-20
NH ₄ -N	<1	oct-20

Los datos anterior sirven como referencia a la hora de tomar decisiones para el diseño del humedal artificial vertical. Ya que se espera un mejor rendimiento para un material filtrante de menor diámetro, el diseño se hará considerando arena fina de tamaño 0.06 – 4 mm. Con esto se espera conseguir la máxima eliminación de los contaminantes a la salida del humedal.

Para determinar la carga orgánica con la que se va a trabajar, se tiene que hallar el producto del caudal medio diario que entrará al sistema con la concentración del efluente del tanque Imhoff, en términos de DQO:

$$C_{org} = Q_{m,d} \times DQO \quad (42)$$

- ✓ C_{org} (g DQO/día)
- ✓ $Q_{m,d}$ (m³/día)
- ✓ DQO (a la salida del Tanque Imhoff, g/m³)

$$C_{org} = 30 \times 480 = 14400 \text{ g DQO/día}$$

Suponiendo la utilización de material fino, se ha elegido una máxima carga orgánica por unidad de superficie de 20 g DQO/m² día lo que supone una superficie total de:

$$S = \frac{C_{org}}{C_{org,ud sup}} \quad (43)$$

- ✓ S (superficie, m²)
- ✓ $C_{org,ud sup}$ (máxima carga orgánica por unidad de superficie, g DQO/m² día)

$$S = \frac{14400}{20} = 720 \text{ m}^2$$

La profundidad del humedal vertical se determina en función del número de capas que se vaya a considerar. Según la (IWA, 2017), la capa filtrante debe tener al menos 50 cm de espesor. Sumado a esta, la capa de transición más de 10 cm, y las capas de drenaje y resguardo al menos 20 cm cada una (ver *Figura 22*).

Además, aunque no presenta carácter obligatorio, el manual aconseja el uso de una capa superficial de gravas de tamaño 4 – 8 mm, cuyo máximo espesor sea de 10 cm. Esta capa ayuda a mejorar el rendimiento del humedal, ya que la temperatura puede aumentar entre 1 y 2°C por cada 15 cm de espesor. Teniendo en cuenta que el clima de La Acebeda es frío, se ha decidido incluir dicha capa en el diseño. La profundidad del humedal será la suma de estas capas, siendo:

$$H = h_{sup} + h_{res} + h_{fil} + h_{trans} + h_{dr} \quad (44)$$

- ✓ H (profundidad total, m)
- ✓ h_{sup} (altura de capa superficial, m)
- ✓ h_{res} (altura de resguardo, m)
- ✓ h_{fil} (altura capa filtrante, m)

- ✓ h_{trans} (altura capa de transición, m)
- ✓ h_{dr} (altura capa de drenaje, m)

Ajustando los valores a lo recomendado en el manual, la profundidad total del humedal será:

$$H = 0.1 + 0.2 + 0.6 + 0.1 + 0.2 = 1.2 \text{ m}$$

De esto se deduce que el volumen del humedal es:

$$V = H \times S \quad (45)$$

- ✓ V (volumen del humedal, m^3)

$$V = 1.2 \times 720 = 864 \text{ m}^3$$

Como se ha descrito anteriormente, el humedal artificial vertical funciona mediante “cargas” o “dosis”, proceso que va regulando a intervalos la emisión de aguas residuales procedentes del pretratamiento y permite una mayor oxigenación del humedal, favoreciendo mayoritariamente procesos de tipo aeróbicos. Esta dosificación está controlada por un tanque o sifón a la entrada del sistema, que almacenará las aguas residuales el tiempo que se requiera hasta su emisión al humedal.

El intervalo de dosis propuesto para humedales con material fino es de 6 horas. Por tanto, para el cálculo de las dimensiones del tanque dosificador, se tiene:

$$V_{sifón} = 2 \times \frac{Q_{m,d}}{24/Int} \quad (46)$$

- ✓ $V_{sifón}$ (volumen, m^3)
- ✓ Int (intervalo de dosificación, horas)

$$V = \frac{30}{24/6} = 15 \text{ m}^3$$

Suponiendo una profundidad máxima de 1 metro del tanque dosificador, la superficie de este tendría, lógicamente, 15 m^2 . Según el manual, la diferencia de altura entre el tanque y el humedal artificial vertical sería:

$$h = \frac{V}{S_{sifón}} \quad (47)$$

- ✓ h (diferencia de altura entre el tanque dosificador y el humedal, m)
- ✓ $S_{sifón}$ (superficie del tanque dosificador, m^2)

$$h = \frac{15}{15} = 1 \text{ m}$$

El humedal debe trabajar por celdas, donde la IWA recomienda para material fino una configuración de 10 x 20 m, lo que suponen 200 m^2 de celda. Esto significa que si la superficie del humedal es de 720 m^2 , se necesitan:

$$N^{\circ} \text{ celdas} = \frac{S}{\text{sup celda}} \quad (48)$$

- ✓ N° celdas (adimensional)
- ✓ Sup celda (configuración de celdas, m²)

$$N^{\circ} \text{ celdas} = \frac{720}{200} = 3.5 \text{ celdas}$$

Dado que este número es inexacto, y por facilitar el diseño del humedal, se considera la repartición del agua residual en 4 celdas rectangulares de 180 m², de dimensiones 12 x 15 m.

Con los rendimientos medios propuestos por la (IWA, 2017), según el promedio de rendimientos de 6 años de un humedal con condiciones similares, se obtendría la siguiente concentración final de contaminantes:

Tabla 18. Concentraciones a la salida del humedal vertical. Fuente: IWA

Contaminante	Co entrada	% eliminación Humedal Vertical	Co salida
DBO	240	95	12
DQO	480	95	24
SS	112.5	90	11.25
NT	66	80	13.2
PT	10.2	20	8.16

Todos los valores de las concentraciones finales cumplen con la legislación actual a excepción del fósforo. Este incumplimiento se solventará mediante la circulación del efluente por un lecho adsorbente especializado en la adsorción de este tipo de compuesto, que se describe en el apartado 5.6) *Lecho adsorbente*.

Se considera que aunque en el manual de la IWA se hayan alcanzado rendimientos del 80% en la eliminación del nitrógeno el valor es excesivamente alto, por lo que se pone en duda. El rendimiento recomendado por consulta del Departamento de Calidad de Aguas es del 20%, ya que es cierto que la oxidación del nitrógeno amoniacal será casi completa, pero que la desnitrificación del nitrato será muy baja.

En función de los resultados observados en los primeros años se plantea la opción de recircular parte del efluente a la cabecera de la planta o emplear el humedal de deshidratación como humedal desnitrificador.

5.5. Humedal Artificial Horizontal

De igual manera, para el diseño del humedal artificial de horizontal de tipo subsuperficial se ha utilizado el método propuesto por el manual de la International Water Association (IWA, 2017).

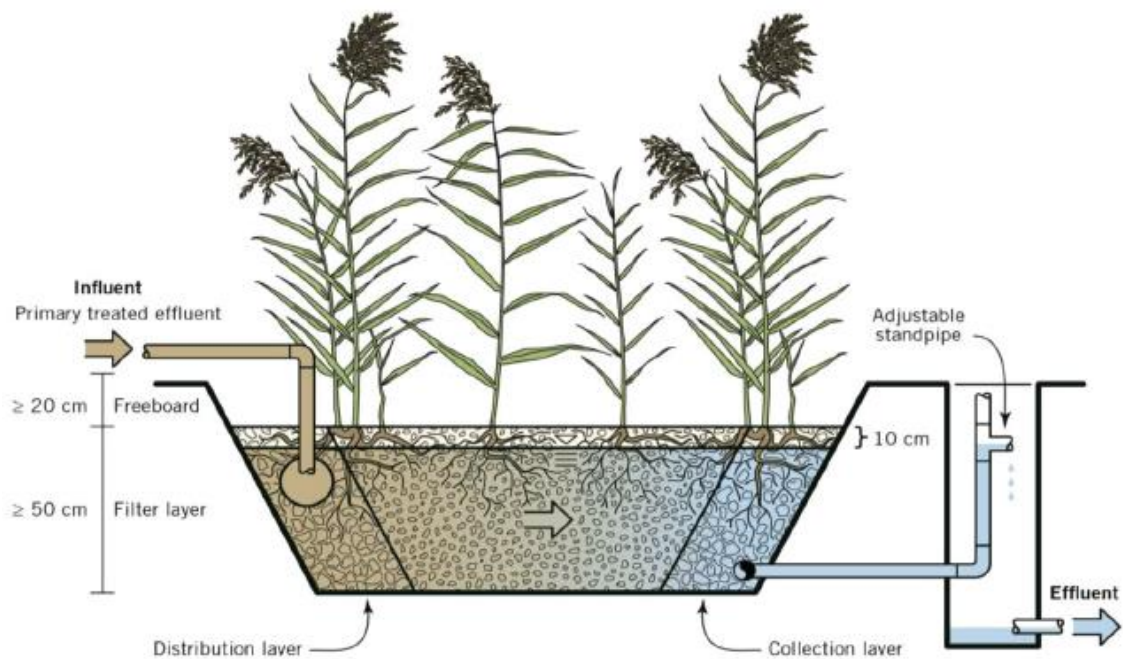


Figura 23. Esquema básico de un humedal artificial horizontal subsuperficial. Fuente: (IWA, 2017)

En este caso, existen varios métodos propuestos por el manual para el diseño del humedal horizontal de tipo subsuperficial. De entre todos los propuestos se ha elegido el método denominado *Aproximación P-k-C** (*P-k-C* approach*), donde se supone una concentración de fondo distinta a cero.

Las concentraciones iniciales de los contaminantes a la salida del pretratamiento son las mismas que en el apartado anterior (ver *Tabla 16*). Para este método de diseño del humedal artificial horizontal subsuperficial (HAHSb) el dimensionamiento será en base a la concentración de parámetro DBO_5 , a diferencia del humedal vertical cuyo parámetro de referencia fue la DQO.

Los parámetros iniciales propuestos por la bibliografía y obtenidos en apartados anteriores se adjuntan en la siguiente tabla:

Tabla 19. Valores iniciales supuestos mediante bibliografía para el diseño del HAHSb. Fuente: (IWA, 2017)

Variable	Unidad	Valor
K_a	m/año	25
C_i	mgDBO/l	240
C_o	mgDBO/l	25
factor P	-	3
L/W	-	3/1
C^*	mgDBO/l	10

Donde K_a es la constante de degradación de la materia orgánica (m/año), C_i es la concentración inicial (mg/l), C_o es la concentración final que debe salir del humedal mandada por la legislación (mg/l), factor P es un factor adimensional utilizado para el

cálculo de la superficie, L/W es la relación longitud-ancho y C* es la concentración en el fondo del sistema (mg/l).

Para poder trabajar en las mismas unidades que el manual, se debe calcular el caudal medio anual, tomando el valor de caudal medio diario calculado anteriormente:

$$Q_{m,a} = Q_{m,d} \times 365 \text{ días} \quad (49)$$

- ✓ Q_i (caudal medio anual, m³/año)
- ✓ $Q_{m,d}$ (caudal medio diario, m³/día)

$$Q_i = 30 \times 365 = 10950 \text{ m}^3/\text{año}$$

Con este valor y los valores de los parámetros iniciales se determina el área requerida:

$$A = \frac{P \times Q_i}{k_A} \times \left[\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right] \quad (50)$$

- ✓ A (superficie del humedal, m²)
- ✓ P (factor P, adimensional)
- ✓ K_a (constante de degradación, m/año)
- ✓ C_i (concentración a la entrada del sistema, mg/l)
- ✓ C_o (concentración a la salida del sistema, mg/l)
- ✓ C^* (concentración de fondo, mg/l)

$$A = \frac{3 \times 10950}{25} \times \left[\left(\frac{240 - 10}{25 - 10} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] = 1950.43 \text{ m}^2$$

Suponiendo una relación longitud-ancho de 3/1, las dimensiones del humedal serían:

$$A = L \times W \quad (51)$$

- ✓ L (longitud, m)
- ✓ W (ancho, m)

Despejando, y tomando como referencia que L/W = 3:

$$W = \sqrt{\frac{A}{3}}$$

$$W = \sqrt{\frac{1950.43}{3}} = 25.50 \text{ m}$$

Por otro lado, despejando de la *fórmula 51*:

$$L = \frac{A}{W} \quad (52)$$

$$L = \frac{1950.43}{25.50} = 76.49 \text{ m}$$

Para asegurar su correcto funcionamiento, se debe cumplir que la carga superficial orgánica por unidad de superficie sea menor o igual a 6 g DBO₅/m² día, según:

$$C_s = \frac{Q_{m,d} \times C_i}{A} \leq 6 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2 \text{ día} \quad (53)$$

✓ C_s (carga superficial orgánica por unidad de superficie, g DBO₅/m² día)

$$C_s = \frac{30 \times 240}{1950} = 3.69 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2 \text{ día}$$

Al ser la carga superficial orgánica menor que 6 g DBO₅/m² día, no es necesario aumentar la superficie del humedal.

Si bien, y solamente atendiendo a este parámetro, se quisiera disminuir la superficie hasta alcanzar un valor máximo de 6 para la carga superficial orgánica, despejando de la *ecuación 53* obtendríamos una superficie de:

$$6 = \frac{30 \times 240}{A^*}; A^* = 1200 \text{ m}^2$$

Sin embargo, esta superficie es acorde solamente con un criterio, y obtendríamos una concentración de DBO₅ a la salida de humedal de 43 mg/l, lo que no cumpliría con lo dispuesto en la normativa. Por tanto, la superficie correcta toma un valor de 1950.43 m².

La concentración final de los contaminantes según los rendimientos de la (IWA, 2017), es la siguiente:

Tabla 20. Concentración final para los contaminantes después de la depuración mediante humedal horizontal subsuperficial. Fuente: (IWA, 2017)

Parámetro	Co entrada	% eliminación	Co salida
DBO	240	90.00	24.00
DQO	480	85.00	72.00
SS	112.5	95.00	5.63
NT	66	78.00	14.52
PT	10.2	20.00	8.16

5.6. Lecho adsorbente

La eficiencia de eliminación del fósforo total a veces puede no ser suficiente con la utilización de un humedal artificial, ya que la concentración de este contaminante puede

ser superior a la requerida según la directiva europea 91/271/CEE sobre aguas residuales.

Para conseguir llegar al límite de 2 mg/l de fósforo total en el vertido final de las aguas depuradas al medio natural se propone la utilización de un material adsorbente que permita eliminar la concentración de fósforo necesaria para alcanzar el límite de vertido.

Este material adsorbente se crea a raíz de los lodos generados en el proceso de potabilización de agua para consumo humano, en una Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP), mezclado con policloruro de aluminio como coagulante. La mezcla permite que este material consiga una adsorción máxima del fósforo de 13.8 g P/kg lodo (Naranjo Ríos, 2017).

El lodo a base de aluminio resultante del proceso de potabilización presenta una alta conductividad hidráulica por lo que puede utilizarse en estado puro y evitar mezclarlo con otros materiales que aumenten dicha conductividad. Este lecho adsorbente se utilizará para un periodo máximo de 5 años, tiempo en el que la saturación del medio puede alcanzarse y perder su capacidad de adsorción. En ese momento, se reemplazará por nuevos lodos a base de aluminio, permitiendo así que se continúe la eliminación del fósforo hasta los límites indicados (Naranjo Ríos, 2017).

Para el diseño de la celda que contendrá el material adsorbente se hará suponiendo la eliminación del 20% del fósforo total en los dos humedales artificiales diseñados, y por tanto contando con una concentración a la entrada de la celda de 8.16 mg/l de fósforo total (PT). Todo el diseño siguiente se va a efectuar según lo expuesto en el Trabajo de Fin de Máster de (Naranjo Ríos, 2017).

La cantidad de fósforo necesaria para que la celda trabaje durante 5 años se calcula de la siguiente forma:

$$m_p = Q_{m,d} \times 365 \times C \times 5 \text{ años} \quad (54)$$

- ✓ m_p (cantidad de fósforo adsorbido, g P)
- ✓ $Q_{m,d}$ (caudal de entrada a la celda de materia adsorbente, m³/día)
- ✓ C (concentración de fósforo a la entrada del humedal, g/m³)

$$m_p = 30 \times 365 \times 8.16 \times 5 = 446760 \text{ g P}$$

Se sabe que una vez alcanzado el 80% de la capacidad máxima de adsorción el porcentaje de eliminación de fósforo por adsorción respecto su concentración inicial será del 40%, es decir, el sistema ver reducida su eficiencia en un 60%. Teniendo esto en cuenta, se calcula la cantidad de lodo a base de aluminio necesario para adsorber los 446760 g P:

$$m_L = \frac{m_p}{q_{max} \times 0.8} \quad (55)$$

- ✓ m_L (cantidad de lodo necesario, kg lodos)

- ✓ q_{\max} (capacidad máxima de adsorción del lodo, g P/kg lodo)

$$m_L = \frac{446760}{13.8 \times 0.8} = 40467.39 \text{ kg lodo}$$

Teniendo en cuenta que la densidad aparente del lodo a base de aluminio es de 690 kg/m³, el volumen de fangos es:

$$V = \frac{m_L}{\rho} \quad (56)$$

- ✓ V (volumen de lodo necesario, m³)
- ✓ ρ (densidad aparente, kg/m³)

$$V = \frac{40467.39}{690} = 58.65 \text{ m}^3$$

Se ha considerado una profundidad de la celda de medio metro, lo que nos resulta en una superficie total de:

$$S = \frac{V}{H} \quad (57)$$

- ✓ S (superficie, m²)
- ✓ H (profundidad, m)

$$S = \frac{58.65}{0.5} = 117.30 \text{ m}^2$$

Tomando como relación longitud-ancho (L/W) de 1/1, el valor del largo y del ancho es de 10.8 metros, siendo su valor real para trabajo en campo de 11 m (superficie final de 121 m²).

Finalmente, y considerando una porosidad efectiva del material adsorbente el 30%, el volumen ocupado por agua o volumen útil es de:

$$V_{\text{util}} = V \times \emptyset \quad (58)$$

- ✓ V_{util} (volumen útil, m³)
- ✓ \emptyset (porosidad efectiva, tanto por uno)

$$V_{\text{util}} = 58.65 \times 0.3 = 17.59 \text{ m}^3$$

El sistema podrá operar de forma discontinua (similar al humedal vertical) o continua. La preferencia en este caso es de forma continua, es decir, que el humedal siempre está lleno y el agua entra y sale de manera continua. Esto provoca condiciones anóxicas y facilita la desnitrificación eliminando otro 30% del NT. El uso del conjunto humedal vertical y este humedal de adsorción se eliminaría un 44% del NT.

5.7.Elementos de reutilización

Una vez finalizado el proceso de depuración de las aguas residuales, y para dar un valor añadido a la propuesta de empleo de un humedal artificial como alternativa a la construcción de la EDAR de la administración, se propone el acondicionamiento de dos zonas cercanas a la salida del humedal para la construcción de una charca para anfibios por un lado, y por otro una balsa que sirva de extinción de incendios.

Charca de Anfibios

Para el diseño de la charca de anfibios (CA) se han tomado como referencias dos manuales que aportan una serie de directrices y recomendaciones para la creación de charcas de anfibios, uno perteneciente a la Comunidad Autónoma de Madrid, y otro perteneciente a la Comunidad Autónoma de Valencia.

La creación de una charca de anfibios tiene varios propósitos en esta propuesta. Se sabe que las especies de anfibios son consumidoras de insectos, y por tanto presentan una función controladora de plagas. Además, muchas de sus especies son bioindicadoras, lo que significa que su presencia en un lugar determina la buena calidad del mismo (al igual que su ausencia determina el mal estado o deterioro de la naturaleza).

Esto se debe a que son especies con un alto grado de sensibilidad a entornos contaminados, agua de mala calidad, radiación, etc. Esto es detectado sobre todo por su sensibilidad cutánea, y al ser animales que viven tanto en el medio acuático como en el terrestre nos permiten identificar la calidad del medio en términos físicos, químicos y ecológicos.

En otras palabras, la creación de una charca de anfibios permitiría enriquecer la biodiversidad de la zona. Además, es un elemento del medio que no conllevará ningún gasto energético, y que además de su función ambiental, realiza una doble función en lo social, al ser un elemento que:

- Puede ser construido por voluntarios, sin necesidad de contratación especial
- Favorece el trabajo de construcción y mantenimiento por la población local
- Se puede catalogar como punto de interés en el ámbito de la educación ambiental

Todo esto aporta un valor añadido al proyecto, implicando a la población local y favoreciendo el conocimiento del medio y el respeto por la naturaleza, de forma educativa y ambientalmente amigable.

Si bien es verdad que en los manuales no vienen unas directrices concretas sobre el dimensionamiento, los parámetros hidráulicos o las condiciones necesarias para la construcción de una balsa de anfibios, si existen ciertas recomendaciones para su empleo:

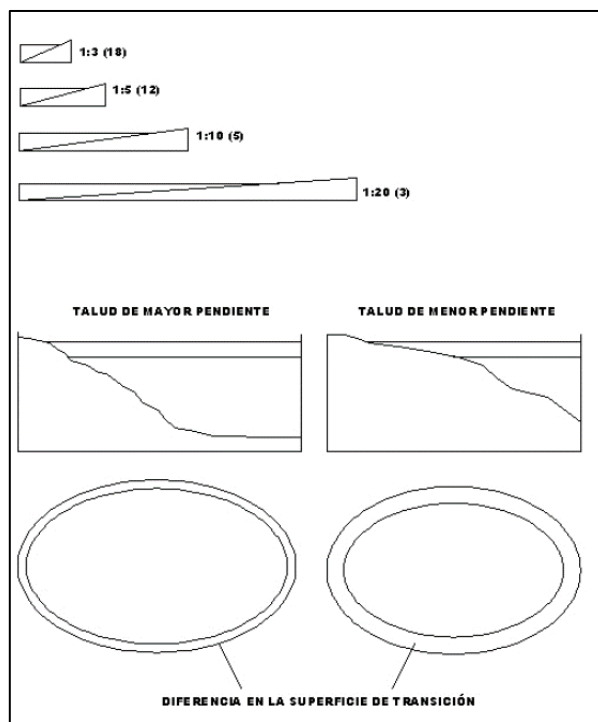


Figura 24. Pendientes y formas para la construcción de una charca de anfibios. Fuente: Manual CA Comunidad de Madrid

- Búsqueda de una zona de vaguada para evitar una excavación excesiva
- Se debe buscar formas que favorezcan el paso del flujo del agua y evitar la sinuosidad, para que no se produzcan estancamientos y por tanto la aparición de mosquitos
- Mantener la vegetación existente lo máximo posible para evitar una predación excesiva
- Mezclar zonas de sombra y semisombra, de forma que la radiación fomente el crecimiento de plantas acuáticas pero evitando la insolación intensa
- Buscar la facilidad de accesos, favoreciendo entradas y salidas de la charca
- Pendientes no muy excesivas
- Impermeabilización suficiente para evitar pérdidas de agua



Figura 25. Detalle de acceso mediante piedras y gravas en una charca de anfibios. Fuente: Manual CA de la Comunidad de Valencia



Figura 26. Detalle de impermeabilización para la charca de anfibios. Fuente: Manual CA Comunidad de Valencia

La charca de ubicará cerca de la salida del efluente de la celda de material adsorbente y cerca de punto de vertido en el arroyo de La Dehesa, de forma que dé continuidad ecológica entre el sistema de depuración y la masa de agua natural, favoreciendo las condiciones ecológicas de la zona. Por supuesto, se buscará una zona de vaguada para reducir esfuerzos y costes de construcción.

En este caso particular se ha decidido diseñar la charca para un caudal medio diario de 20 m³/día, lo que suponen 0.23 l/s, y un tiempo máximo de retención hidráulico (TRH) de 5 días, ya que con tiempos más altos se puede ver favorecida la proliferación excesiva de fitoplancton. Por tanto, el volumen de la charca de anfibios es de:

$$V = \frac{Q}{TRH} \quad (59)$$

- ✓ V (volumen, m³)
- ✓ Q (caudal, m³/día)
- ✓ TRH (tiempo de retención hidráulico, días)

$$V = \frac{20}{5} = 4 \text{ m}^3$$

Según los manuales, para una charca inferior a 6 – 8 m³ no se necesita utilización de maquinaria, lo que supone menor coste y mayor implicación de la población local o voluntarios para su construcción. Suponiendo un calado medio de 40 cm, la superficie de la charca es de:

$$S = \frac{V}{H} \quad (60)$$

- ✓ S (superficie, m²)
- ✓ H (calado medio, m)

$$S = \frac{4}{0.4} = 10 \text{ m}^2$$

Se ha elegido que la charca tenga una forma circular-elipsoidal, aunque para simplificaciones de cálculo se ha tomado como si fuera simplemente circular, teniendo en cuenta la posible dilatación en terreno y evitando la sinuosidad de la misma.

Asumiendo una profundidad máxima de 80 cm en la zona más profunda, se ha decidido construir la charca mediante subdivisiones por anillos, en total 5 anillos circulares. Teniendo en cuenta la ecuación que rige el área de un círculo, el radio de cada anillo se calcula como:

$$r = \sqrt{\frac{S_n}{\pi}} \quad (61)$$

- ✓ S_n (superficie de cada anillo, $n \in [1...5]$, m)
- ✓ r (radio de cada anillo, m)

Para el diseño de cada anillo se han supuesto los siguientes criterios:

- La suma de los volúmenes de los 5 anillos tiene que ser igual 4 m^3 .
- El anillo inferior siguiente tenga menor superficie que el anterior
- El cociente volumen de cada anillo y calado supuesto da la superficie de cada anillo
- La pendiente máxima entre cada nivel de la charca es de 12° , menos en el inferior que se admite de hasta 18° al ser el nivel donde sólo llegan especies con buena capacidad natatoria.

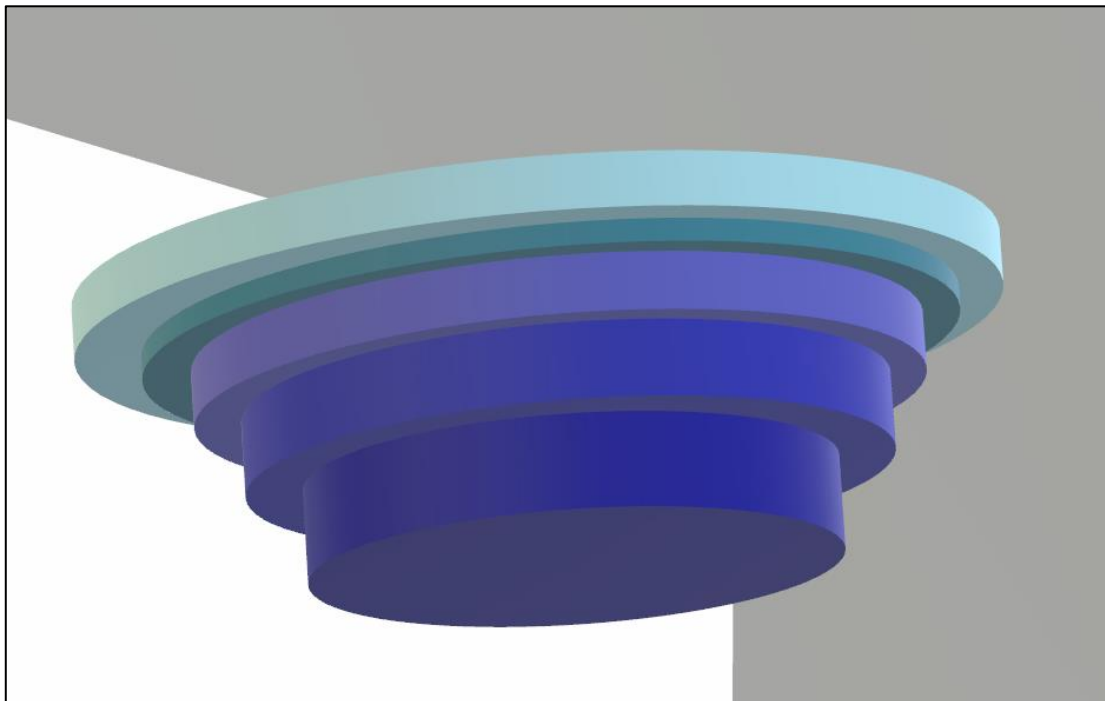


Figura 27. Esquema básico de los 5 anillos de la charca de anfibios. Elaboración propia

Los valores de cada parámetro se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 21. Valores para los parámetros de diseño de cada anillo de la charca de anfibios. Elaboración propia

Parámetro	Unidad	anillo 1	anillo 2	anillo 3	anillo 4	anillo 5
volumen	m ³	1	0.5	0.5	1	1
h	m ³	0.1	0.07	0.1	0.25	0.3
superficie	m ²	10.0	7.1	5.0	4.0	3.3
radio	m	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0
cociente	-	0.06	0.05	0.08	0.22	0.29
pendiente	grados	3	3	5	12	16

Se buscará que cada anillo provea con refugio para las distintas especies que vivan o utilicen la charca con fines reproductivos, mediante la colocación de pierdas y favoreciendo la vegetación acuática.

La charca será impermeabilizada para evitar que se seque en caso de que el humedal artificial trabaje con cargas mínimas. La impermeabilización se hará con el material propuesto por el manual, siendo este una membrana de caucho, conocida como *giscolene*. Para evitar que se vea y cause un impacto visual, se colocará una lámina geotextil que naturalice el suelo, sirviendo esta además de soporte para una fina capa de arena de aproximadamente 5 cm de espesor y que facilite la colonización de plantas acuáticas.

Además, se buscará la protección de la charca mediante un vallado que impida el paso a personas y por tanto evite su afección o destrucción, pero que a la vez no limite el movimiento de los anfibios. Se colocará un cartel con información divulgativa sobre los anfibios, la charca y sus beneficios, para facilitar su identificación y ser utilizado en cursos de educación ambiental.

Balsa de incendios

La construcción de la balsa de incendios en la zona de estudio presenta mayor complicación a la hora de encontrar una ubicación correcta que integre bien la balsa en el medio. Para tomar dicha decisión se ha tenido en cuenta las siguientes cuestiones:

- La zona de estudio de por sí se encuentra en una vaguada con árboles ampliamente repartidos alrededor y de gran frondosidad, por lo que se descarta su utilización como medio de utilización para unidades aéreas.
- Teniendo en cuenta la afirmación anterior, se buscará que se encuentre lo más próxima posible a la carretera para que sirva de apoyo a las Brigadas de Refuerzo de Incendios Forestales (BRIF) y demás medios terrestres de extinción de incendios.

Según el último periodo de estudio de incendios forestales, 2001 – 2010, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente proporciona la siguiente información:

Tabla 22. Riesgo de Incendios Forestales del periodo 2001-2010. Fuente: MAPAMA

Municipio	Sup Forestal Incendidada	Nº conatos	Nº incendios	Frecuencia
La Acebeda	0	3	0	3

Definiéndose “conato” como aquellos incendios forestales con superficie total menor a 1 ha. Esta información indica que el riesgo de incendio en la zona es prácticamente nulo, por lo que a modo de prevención se implementará una balsa con poco volumen que sirva de apoyo puntual ante circunstancias excepcionales, esté cerca de la carretera y dé cobertura integrándose bien en el medio.

La balsa de incendios se hará de forma circular, tipo “pozo”, donde la mayor parte de la estructura será soterrada. Se diseña para un volumen aproximado de 70 m³, y con una profundidad de 2.50 metros, de los cuales soterrados estarán 2.30 y superficiales 20 cm. Con esto, suponiendo un diámetro de la planta de 6 metros, el volumen queda:

$$S = \pi \times r^2 \quad (62)$$

- ✓ S (superficie, m²)
- ✓ r (radio, m)

$$S = \pi \times 3^2 = 28.27 \text{ m}^2$$

Con esto, el volumen total es de:

$$V = S \times H \quad (63)$$

- ✓ V (volumen, m³)
- ✓ S (superficie, m²)
- ✓ H (profundidad, m)

$$V = 28.27 \times 2.5 = 70.68 \text{ m}^3$$

Esto supone que la balsa dará apoyo aportando aproximadamente 70686 litros.

A continuación se adjunta un mapa tomado del Estudio Ambiental de (ICMA, 2018), en donde se ha especificado las ubicaciones potenciales de la balsa de incendios y la charca de anfibios teniendo en cuenta la proximidad a la carretera para el fácil acceso de los equipos de extinción (balsa de incendios) y la cercanía a la masa de agua natural (charca de anfibios).

En caso de no ser utilizada para la extinción de incendios forestales, la balsa podría usarse por agricultores de la zona para regadío de la misma manera: cargando cubas de la balsa y transportándolas con vehículos propios, aunque se aconseja dejar siempre un 40% de la capacidad total de la balsa para emergencias y no hacer uso de ella en época de máximo riesgo (junio – septiembre).

Además, habría que prever la instalación de un sistema sencillo de desinfección si se observa que no se cumplen los parámetros microbiológicos a la salida del humedal, teniendo en cuenta el uso como agua regenerada para riego esta concentración debería estar entre las 100 – 10000 ufc/ml (unidades formadoras de colonias/ml).



Figura 28. Mapa con la ubicación potencial de la balsa de incendios y la charca de anfibios. Elaboración propia

5.8. Elección del tipo de humedal

Se adjunta una tabla donde se resumen los rendimientos de cada humedal artificial según la bibliografía consultada por los manuales de (García Serrano y Corzo Hernández, 2008) y (IWA, 2017):

Tabla 23. Concentraciones de salida según los rendimientos consultados en la bibliografía. Elaboración propia

Parámetro	Humedal Subsuperficial		Humedal Vertical	
	% eliminación	Co salida	% eliminación	Co salida
DBO	90	24	95	12
DQO	85	72	95	24
SS	95	5.63	90	11.25
NT	78	14.52	80	13.2
PT	20	8.16	20	8.16

A priori, el humedal artificial horizontal subsuperficial presenta peores rendimientos a excepción de la eliminación de los Sólidos Suspendidos (con un 5% mayor que el humedal vertical), y de la eliminación del fósforo, ya que es igual para los dos humedales.

Igualmente, todos los parámetros están dentro de los niveles exigidos por la legislación vigente en materia de aguas residuales.

Además, el humedal horizontal requiere una mayor superficie, alrededor de **1950 m²** en comparación con los **720 m²** del humedal vertical y, aunque el humedal vertical precise de mayor elementos de instalación, como un sifón de descarga controlada, se considera su empleo como mejor opción.

5.9. Vegetación del humedal artificial vertical

Sobre la capa más superficial del sustrato se coloca la vegetación, atendiendo a distintos factores que determinan la selección de especies, según (Seoáñez, 2000):

- a. Factores fitogeográficos
- b. Factores edáficos
- c. Factores biológicos
- d. Factor climáticos
- e. Tipo de agua residual

La adaptación y tolerancia a la mezcla de ambientes y condiciones de estos factores es un factor fundamental a tener en cuenta para asegurar el correcto funcionamiento del humedal, ya que el papel de la vegetación es determinante para mantener condiciones de trabajo adecuadas del humedal y para la eliminación de nutrientes.

Además, se debe elegir una especie que sea propia de estos ambientes y autóctona del territorio, para evitar cualquier mezcla genética o competencia en las zonas adyacentes (en caso de existir propágulos).

Se sabe por diversos estudios bibliográficos (García Serrano y Corzo Hernández, 2008) que una especie que trabaja adecuadamente bajo estas condiciones y da buenos resultados es el carrizo (*Phragmites australis*), en forma de plantación monoespecífica. Por ello, se elige como especie a utilizar en este caso en concreto.

La instalación de la vegetación se hará mediante plantación y no siembra, al ser un proceso más rápido y que permite mayor capacidad de colonización. Para la obtención de plántulas, se hará la compra en un vivero certificado que asegure buenos resultados. La densidad de plantación será de 4 unidades/m², según lo dispuesto en el manual de (CEDEX, 2010).



Figura 29. Carrizo en estado silvestre, con alta densidad. Fuente: jardineriaon.com

El método de plantación será el tresbolillo, haciéndose preferiblemente en los meses de abril y mayo. Se harán agujeros, se insertará la planta, y se tapaná el agujero para asegurar un buen asentamiento de raíces. Además, se recomienda que una vez realizada la plantación se anegue el sustrato aumentando el nivel del agua entre 1 y 2 cm por encima de la capa superficial, evitando el crecimiento de malas hierbas, durante el tiempo suficiente para evitar malos olores o la presencia de mosquitos (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).

Si al año la vegetación no ha sido consolidada, se considerarán como marras aquellos individuos que no hayan terminado su ciclo biológico completo, procediendo por tanto a su reposición.

5.10. Mantenimiento y operación

Una vez completado el primer ciclo biológico de la vegetación y se considera consolidada, se puede asumir que el desarrollo de las bacterias responsables de la eliminación de nutrientes ha sido terminado, pues tardan entre 3 y 6 meses, por lo que el sistema está listo para la puesta en marcha.

Se debe tener especial cuidado en el crecimiento de malas hierbas que compitan con la vegetación deseada, por lo que se recomienda el encharcamiento intermitente siempre que sea posible, y si no, el arrancamiento individual de cada especie competidora.

La revisión del sistema de pretratamiento, tanto del tanque Imhoff como del canal de desbaste, será semanal, entre 1 o 2 veces por semanas, certificando la correcta separación de los fangos de la fracción líquida y asegurando que el nivel de inundación

del humedal se encuentra dentro de los límites. De igual forma, se revisará periódicamente el proceso de dosificación del sifón, asegurando que descarga como se ha diseñado (cada 6 horas).

Por otra parte, se esperará hasta el primer año de funcionamiento para comenzar con la primera extracción de lodos del tanque Imhoff, mediante un camión cisterna de capacidad aproximada de entre 10 y 15 m³ (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).

Finalmente, se recomienda como tratamiento de la vegetación a largo plazo la siega anual de las partes secas del carrizo, que podrá ser mecanizada con maquinaria ligera cuando no comprometa otros elementos del sistema, o manual si precisa de mayor detalle. La eliminación de esta biomasa permite evitar la colmatación precoz del humedal y la eliminación de nutrientes presentes en ella, y puede ser quemada o compostada.



Figura 30. Eliminación de la biomasa sobrante mediante maquinaria ligera. Fuente: (García Serrano y Corzo Hernández, 2008).

6. Conclusiones

Como se ha visto en la presente memoria, los sistemas de depuración de aguas residuales basados en la utilización de humedales artificiales dan solución y respuesta al problema de la contaminación de masas de agua naturales. Los impactos ambientales generados por infraestructuras más complejas se ven solventados haciendo uso de tecnologías más integradas con los valores naturales de los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Su facilidad de diseño, mantenimiento y operación permiten su uso en entornos rurales donde la independencia energética juega un papel fundamental, propiciando que los humedales artificiales sean una alternativa eficaz y resolutiva ante los sistemas de depuración convencionales, demostrando su utilidad en este tipo de entornos al cumplir con los parámetros de calidad del agua establecidos por la normativa.

La baja producción de lodos residuales, la ausencia de consumo energético y de reactivos químicos artificiales, y la simplicidad de su infraestructura son características que invitan cuanto menos a plantear su uso en aquellas localidades donde no se necesiten métodos tan amplios o sofisticados.

Como se ha visto, los humedales artificiales son compatibles con otros elementos que pueden mejorar no sólo el aspecto ambiental, sino también el aspecto socioeconómico, implicando a la población local en su construcción, operación y mantenimiento (debido a su sencillez y facilidad), y aportando la biomasa de los fangos como abono natural para los agricultores y ganaderos de la zona.

Además, la reutilización de sus aguas permite un mayor acercamiento a la población, en términos divulgativos de educación ambiental con elementos como la charca de anfibios, y en su función logística utilizando las aguas depuradas como complemento a los medios de extinción de incendios forestales.

En este caso, el humedal vertical ha sido la opción escogida por su menor superficie y buenos resultados en los rendimientos. Esto permite que la integración con el entorno sea la máxima posible, y pueda generar efectos beneficiosos tanto en la salud de los ecosistemas como en la socioeconomía del municipio, ya que este tipo de elementos naturalizados son un atractivo turístico y sirven de ejemplo de buenas prácticas en los entornos naturales.

Por tanto queda demostrado que el posible empleo de un sistema de este tipo es una opción viable y ambientalmente más amigable frente a las propuestas por la Administración en proyectos anteriores. Por ello, se anima a este tipo de organismos administrativos a tener en cuenta en futuros proyectos de depuración de aguas este tipo de alternativas, con el fin de generar un equilibrio real entre nuestras necesidades como sociedad y nuestras responsabilidades como seres vivos.

7. Bibliografía

CEDEX. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración para pequeñas poblaciones. España: Ministerios de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Natural y Marino y Centro de Estudios y experimentación de obras públicas.

CENTA. (2007). Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. En J. Salas Rodríguez, J. Pidre Bocado, L. Sánchez Fernández, & I. d. Andalucía (Ed.). Andalucía: Coria Gráfica. ISBN 13: 978-84-611-6885-9

Comunidad de Madrid. Consejería del Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. *Manual de creación de charcas de anfibios*. 2007.

Comunidad de Madrid. Dirección General de Medio Ambiente y Sostenibilidad. ICMA, 2018. Documento Ambiental del *Proyecto de construcción de colector y estación depuradora de aguas residuales*. [En línea]. Disponible en Web: https://www.comunidad.madrid/transparencia/sites/default/files/regulation/documentos/doc.ambientallaacebeda_2018.pdf. [Consultado: 02/05/2020]

Comunidad de Madrid. Dirección General de Medio Ambiente y Sostenibilidad. ICMA, 2018. Plan Especial del *Proyecto de construcción de colector y estación depuradora de aguas residuales*. [En línea]. Disponible en Web: https://www.comunidad.madrid/transparencia/sites/default/files/regulation/documentos/16-132_plan_especial.pdf. [Consultado: 02/05/2020]

Empresa Pública Española Canal de Isabel II. Consulta mediante sistema de citas.

España. Ley 16/1995, de 4 de mayo, Forestal y de Protección de la Naturaleza de la Comunidad de Madrid, núm. 190, pp. 24949-24972.

García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Generalitat Valenciana. Conselleria del Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge. *Guía metodológica de actuaciones de restauración de puntos de agua en ecosistemas mediterráneos*. 2009.

Instituto Nacional de Estadística. *Cifras oficiales de población resultantes de la revisión del Padrón municipal a 1 de enero*. [En línea]. Disponible en Web: <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2881&L=0>. [Consultado: 26/04/2020]

IWA. (2017). Biological wastewater treatment series. En G. Dotro, G. Langergraber, P. Molle, J. Nivala, J. Puigagut, O. Stein, & M. Von Sperling. Chennai, India: IWA Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London SW1H 0QS, UK. doi:10.2166/9781780408774, ISBN: 9781780408774 (ebook)

Ministerio para la Transición Ecológica (España). Mapa Forestal Español (MFE). [En línea]. Disponible en Web: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe50.aspx>. [Consultado: 21/05/2020]

Naranjo Ríos, Y. (2017). *ESTUDIO PARA MEJORAR LA ELIMINACIÓN DE FÓSFORO EN HUMEDALES ARTIFICIALES EMPLEANDO FANGOS GENERADOS EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA, MEDIANTE PROCESOS DE ADSORCIÓN. APLICACIÓN A LA POTABILIZADORA LA PRESA (MANISES, VALENCIA)*. Trabajo Fin de Máster, Universitat Politècnica de València, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Valencia.

Sanz, J. M., Martín, N., & Camacho, J. V. (2009). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos*. Castilla, España: CONAMA.

Seoánez Calvo, M. (2000). *Aguas residuales: Tratamiento por humedales artificiales*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa. ISBN: 84-7114-821-8

Silva Tipantasig, L. (2019). *DISEÑO DE SISTEMAS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE BAJO COSTE PARA LA EDAR VALL DELS ALCALANS (VALENCIA)*. Trabajo Fin de Máster. Universitat Politècnica de València, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Valencia.

Unión Europea. Directiva (UE) 91/271/CE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Diario Oficial de la Unión Europea L 135, pp. 40-52.

Unión Europea. Directiva (UE) 92/43/CE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. Diario Oficial de la Unión Europea L 206 pp. 7-50.

Unión Europea. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de la Unión Europea L 327, pp. 1-73)

Vymazal J. (2007) *Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. Science of the Total Environment*, 380 (1-3): 48-65.