

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ciencias Ambientales

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# **“Propuesta de un humedal artificial para el tratamiento de las aguas residuales de Benisuera (Valencia)”**

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Autor/a:  
**Amelia Agudo Llorens**

Tutor/a:  
**Juan Andrés González Romero  
Jesús Mengual Cuquerella**

**GANDIA, 2021**

## Resumen

Actualmente, debido a la limitación de recursos hídricos, la contaminación del agua constituye una gran problemática ambiental. No obstante, si bien existen diferentes tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales urbanas, los sistemas naturales de depuración pueden constituir una solución más adecuada para pequeñas poblaciones ya que no requieren grandes costes de inversión ni de mantenimiento.

En este sentido, los humedales artificiales son tecnologías de tratamiento con una operación simple, baja producción de lodos, escaso consumo energético y que no requieren el uso de reactivos químicos. Además, los humedales artificiales aportan numerosos beneficios a las zonas de implantación, como una mejora en la calidad de las aguas, un menor impacto visual, facilidad de integración en el paisaje y constituir lugares de interés para el estudio de flora y fauna característica de estos ambientes.

Por este motivo, en el presente trabajo se ha realizado el dimensionamiento básico de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas para la población de Benisuera (Valencia). El sistema se ha proyectado para una población de 207 habitantes y un caudal medio de 25 m<sup>3</sup>/día de agua residual doméstica. El sistema incluye un pretratamiento, con canal de desbaste y desarenador, un tratamiento primario mediante un tanque Imhoff y un tratamiento secundario basado en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. Además, se ha incluido una propuesta para su ubicación y sus principales características constructivas.

El sistema propuesto cumpliría con los requisitos de reducción de contaminantes establecidos por la legislación, resultando una opción viable y ambientalmente más amigable frente al sistema existente.

**Palabras clave:** Humedal Artificial; depuración; agua residual.

## Resum

Actualment, a causa de la limitació de recursos hídrics, la contaminació de l'aigua constitueix una gran problemàtica ambiental. No obstant això, si bé hi ha diferents tecnologies per al tractament de les aigües residuals urbanes, els sistemes naturals de depuració poden constituir una solució més adequada per a xicotetes poblacions ja que no requereixen grans costos d'inversió ni de manteniment.

En aquest sentit, els aiguamolls artificials són tecnologies de tractament amb una operació simple, baixa producció de fangs, escàs consum energètic i que no requereixen l'ús de reactius químics. A més, els aiguamolls artificials aporten nombrosos beneficis a les zones d'implantació, com una millora en la qualitat de les aigües, un menor impacte visual, facilitat d'integració en el paisatge i constituir llocs d'interés per a l'estudi de flora i fauna característica d'estos ambients.

Per aquest motiu, en el present treball s'ha realitzat el dimensionament bàsic d'un sistema de tractament d'aigües residuals domèstiques per a la població de Benisuera (València). El sistema s'ha projectat per a una població de 207 habitants i un cabal mitjà de 25 m<sup>3</sup>/día d'aigua residual domèstica. El sistema inclou un pretractament, amb canal de desbast i desarenador, un tractament primari per mitjà d'un tanc Imhoff i un tractament secundari basat en aiguamolls artificials de flux subsuperficial horitzontal. A més, s'ha inclòs una proposta per a la seua ubicació i els seus principals característiques constructives.

El sistema proposat compliria amb els requisits de reducció de contaminants establits per la legislació, resultant una opció viablement i ambientalment més amigable enfront del sistema existent.

**Paraules clau:** Aiguamoll Artificial; depuració; aigua residual.

### **Abstract**

Currently, due to limited water resources, water pollution is a major environmental problem. However, although there are different technologies for the treatment of urban wastewater, natural wastewater treatment systems can be a more suitable solution for small populations because they do not require large investment and maintenance costs.

In this sense, artificial wetlands are treatment technologies with simple operation, low sludge production, low energy consumption and do not require the use of chemical reagents. In addition, artificial wetlands bring numerous benefits to the areas where they are installed, such as improved water quality, reduced visual impact, ease of integration into the landscape, and constitute places of interest for the study of the flora and fauna characteristic of these environments.

For this reason, in the present work the basic sizing of a domestic wastewater treatment system for the town of Benisuera (Valencia) has been carried out. The system has been designed for a population of 207 inhabitants and an average flow of 25 m<sup>3</sup>/day of domestic wastewater. The system includes a pretreatment, with a roughing channel and sand trap, a primary treatment by means of an Imhoff tank and a secondary treatment based on artificial wetlands with horizontal subsurface flow. In addition, a proposal for its location and main construction features has been included.

The proposed system would comply with the pollutant reduction requirements established by law, making it a viable and environmentally friendlier option compared to the existing system.

**Keywords:** constructed wetland; natural treatment; wastewater

## Índice

1	Introducción .....	1
1.1	Tipos de humedales artificiales .....	1
1.2	Justificación .....	2
2	Objetivos .....	4
2.1	Objetivo principal .....	4
2.2	Objetivos secundarios .....	4
3	Área de estudio .....	5
3.1	Ubicación .....	5
3.2	Área de proyecto .....	5
3.3	Población de diseño .....	5
3.4	Condiciones meteorológicas .....	6
3.4.1	Temperatura .....	7
3.4.2	Precipitación .....	7
4	Caracterización del agua residual influente .....	9
5	Dimensionado básico del sistema de depuración .....	10
5.1	Pretratamiento .....	10
5.1.1	Aliviadero de entrada .....	10
5.1.2	Canal de desbaste .....	11
5.1.3	Desarenador .....	13
5.2	Tratamiento primario .....	14
5.2.1	Dimensionamiento Tanque Imhoff .....	14
5.2.2	Calidad del agua después del Tanque Imhoff .....	19
5.3	Gestión de lodos .....	20
5.4	Tratamiento secundario .....	20
5.4.1	Dimensionamiento Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal .....	20
5.4.2	Determinación de vida útil .....	25
5.5	Selección de la ubicación .....	28
5.6	Sistema de distribución y recogida .....	30
5.7	Medio Granular .....	31
5.8	Impermeabilización .....	31
5.9	Plantación .....	32
5.10	Resumen de Cálculos .....	32
6	Análisis de los beneficios ambientales de su implantación .....	39
7	Conclusiones .....	40
8	Bibliografía .....	41

## Índice de Figuras

Figura 1: Humedal artificial horizontal con flujo superficial y con flujo subsuperficial. Fuente: García Serrano y Corzo Hernández (2008). .....	1
Figura 2: Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical. Fuente: García Serrano y Corzo Hernández (2008). .....	2
Figura 3: Plano por municipios de la comarca de la Vall d'Albaida. Fuente: Montxo Vicente i Sempere. ....	5
Figura 4: Evolución demográfica en los años. Fuente: elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística. ....	6
Figura 5: Croquis del enrejado. Fuente: elaboración propia. ....	13
Figura 6: Esquema de tanque Imhoff. Fuente: elaboración propia .....	19
Figura 7: Parcelas adyacentes a las instalaciones de la EDAR. Fuente: ICV. Escala aprox.: 1/600 Coord. UTM (ETRS89, Huso 30) X:718.655,60 m, Y:4.309.928,83 m .....	28
Figura 8: Croquis de la instalación final con ortofoto de base. Fuente: elaboración propia. Escala aprox.: 1/600 Coord. UTM (ETRS89, Huso 30) X:718.655,60 m, Y:4.309.928,83 m .....	29
Figura 9: Croquis de la instalación final. Fuente: elaboración propia. Escala aprox.: 1/600. ....	29
Figura 10: Arqueta de distribución. Fuente: elaboración propia. ....	30
Figura 11: Zona de entrada y de salida en un humedal de flujo subsuperficial horizontal. Fuente: García Serrano y Corzo Hernández (2008). .....	31

## Índice de Tablas

Tabla 1: Temperaturas medias, mínimas y máximas a lo largo del año. Fuente: Instituto Valenciano de investigaciones agrarias. ....	7
Tabla 2: Precipitaciones características de Benisuera. Fuente: Instituto Valenciano de investigaciones agrarias. ....	7
Tabla 3: Precipitaciones características de Benisuera. Fuente: Instituto Valenciano de investigaciones agrarias. ....	8
Tabla 4: Contaminantes y sus concentraciones del agua residual influente. Fuente: EPSAR. ....	9
Tabla 5: Concentración de contaminantes tras el Tanque Imhoff. Fuente: Seoáñez, 2000. ....	19
Tabla 6: Concentración de contaminantes tras el Tanque Imhoff. Fuente: Seoáñez, 2000. ....	20
Tabla 7: Valores de $K_A$ para cada parámetro. Fuente: elaboración propia. ....	22
Tabla 8: Contaminantes del agua residual efluente. Fuente: elaboración propia .....	23
Tabla 9: Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica ( $K_s$ ) en función del tipo de material granular utilizado como substrato en un humedal construido de flujo subsuperficial. Fuente: Reed et al. ,1995. ....	24
Tabla 10: Población de diseño. Fuente: elaboración propia. ....	32
Tabla 11: Concentración de contaminantes en el agua residual al ingreso del sistema. Fuente: elaboración propia. ....	32
Tabla 12: Caracterización del caudal para el humedal artificial. Fuente: elaboración propia. ....	33
Tabla 13: Valores para el aliviadero de entrada. Fuente: elaboración propia .....	33
Tabla 14: Parámetros para la reja de gruesos. Fuente: elaboración propia .....	33
Tabla 15: Parámetros para el cálculo del desarenador. Fuente: elaboración propia .....	34
Tabla 16: Calidad del agua después del tratamiento secundario. Fuente: elaboración propia. ....	34
Tabla 17: Parámetros para el Tanque Imhoff. Fuente: elaboración propia .....	35
Tabla 18: Calidad del agua después del Tanque Imhoff. Fuente: elaboración propia .....	36
Tabla 19: Parámetros para la gestión de los lodos. Fuente: elaboración propia .....	36

Tabla 20: Parámetros para el dimensionamiento biológico del humedal. Fuente: elaboración propia .....	37
Tabla 21: Parámetros para el dimensionamiento hidráulico del humedal. Fuente: elaboración propia .....	37
Tabla 22: Parámetros para la determinación de vida útil del humedal. Fuente: elaboración propia .....	38

## 1 Introducción

### 1.1 Tipos de humedales artificiales

Los humedales se definen como “Las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no excede de seis metros” (Ramsar, 1971).

En cuanto a los humedales artificiales, a lo largo de toda su trayectoria se han definido como una tecnología de depuración natural que actúa de una manera muy eficiente para el tratamiento de distintos tipos de agua contaminada.

En las últimas décadas ha aumentado el uso de los humedales artificiales ya que estos presentan una serie de ventajas en relación con los sistemas de depuración convencionales, ya que tienen un consumo energético nulo, su coste de inversión es mucho menor que otro tipo de instalaciones, requiere menos personal y la frecuencia de generación de lodos es muy baja.

Todos los humedales tienen en común una serie de características como la profundidad, los vegetales utilizados los cuales son distintos tipos de macrófitos y la interacción entre el agua, el sustrato, la vegetación, los microorganismos e incluso la fauna lo cual hace que la carga de contaminantes disminuya.

Según el tipo de circulación del agua, los humedales se pueden clasificar en flujo superficial o flujo subsuperficial. En los de flujo superficial, el agua está en contacto directo con la atmósfera, circula a través de la vegetación. Este tipo de humedal se utiliza para mejorar la calidad del agua efluente de una depuradora. En cuanto a los humedales de flujo subsuperficial, el agua circula de forma subterránea, a través de un medio granular y en contacto con las raíces de la vegetación plantada en estos.

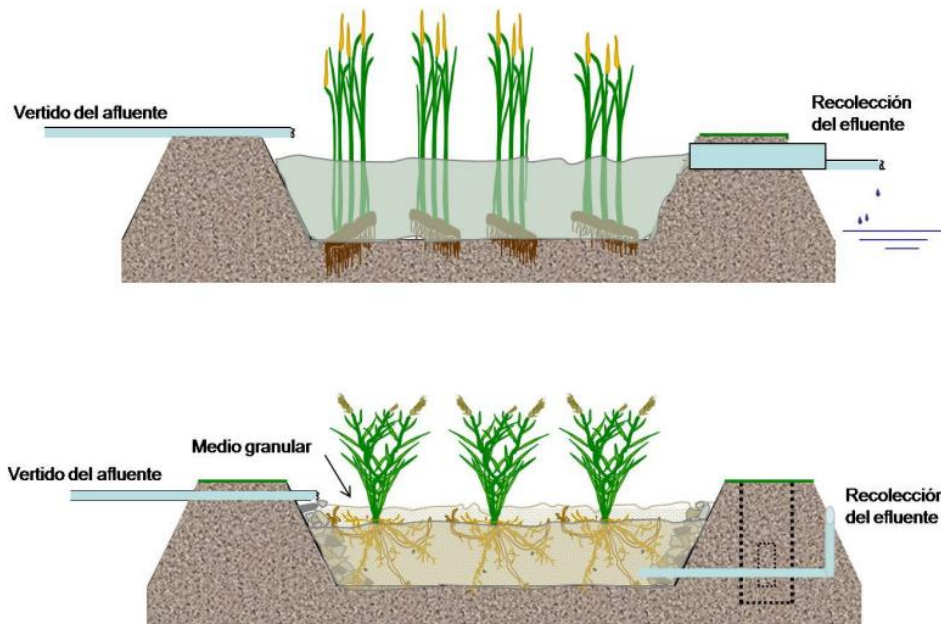


Figura 1: Humedal artificial horizontal con flujo superficial y con flujo subsuperficial. Fuente: García Serrano y Corzo Hernández (2008).

Dentro de los humedales de flujo subsuperficial, podemos encontrar distintos tipos en relación con la dirección de la circulación del agua. En primer lugar, el Humedal de flujo horizontal (figura 1), en el cual, como su nombre indica, el agua circula horizontalmente a través de este. En segundo lugar, el Humedal de flujo vertical (figura 2), en el que el agua circula verticalmente, de manera que el sustrato no está permanentemente inundado. Estos últimos, tienen una mayor capacidad de tratamiento y requieren de menor superficie, por otra parte, son menos susceptibles a la contaminación, García Serrano y Corzo Hernández (2008).

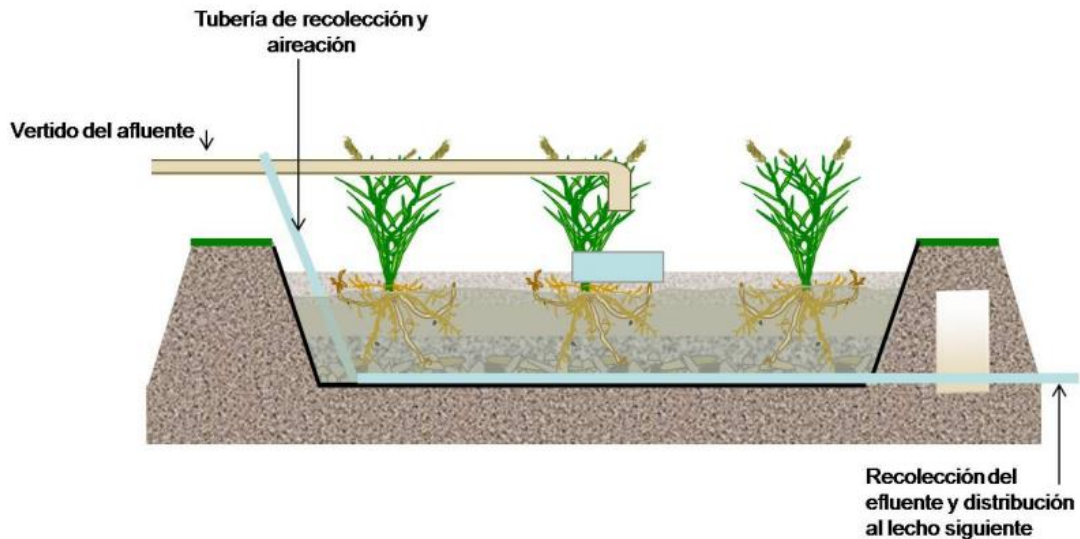


Figura 2: Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical. Fuente: García Serrano y Corzo Hernández (2008).

## 1.2 Justificación

Para la selección del tipo de humedal que mejor encaja en el municipio, los objetivos que se buscan son principalmente cumplir con la reducción de la concentración de contaminantes, crear un entorno ambientalmente amigable y reducir el impacto paisajístico. Para ello, se tienen en cuenta los siguientes motivos:

- La población actual del municipio de Benisuera es de 185 habitantes, con una tasa de crecimiento demográfico negativa.
- No existe ni se pretende que exista actividad industrial en el municipio.
- Existen parcelas agrícolas en situación de abandono alrededor de la instalación actual de la EDAR.
- El agua tratada se podría reutilizar para uso agrícola.

Se podrían plantear alternativas con costes moderados para el tratamiento de las aguas residuales del municipio, sin embargo, los rendimientos son similares pero el coste de los humedales es inferior.

Para determinar cuál de los cuatro tipos de humedales artificiales encaja mejor con las características del municipio, se han valorado las características de cada uno en base a la información descrita en el apartado anterior. En primer lugar, se descarta el humedal artificial horizontal superficial, ya que es el humedal que requiere de mayor superficie y al circular el agua por la superficie, puede favorecer a la aparición de insectos no deseados como mosquitos y moscas. En cuanto a los humedales de flujo subsuperficial, se descarta también el humedal de



flujo vertical ya que este requiere de una mayor frecuencia de mantenimiento y un periodo inicial largo antes de trabajar a capacidad plena.

Con lo cual, el estudio consistirá en el diseño de un humedal horizontal subsuperficial, además del resto de instalaciones que se requieren para el pretratamiento y el tratamiento de fangos.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo principal**

El objetivo principal de este estudio es realizar un dimensionado de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales, tanto para la situación actual, como para la futura, así como una propuesta para su ubicación y sus principales características constructivas.

Este diseño debe cumplir con la calidad de vertido que exige la normativa actual. Los parámetros de calidad del agua a considerar son: Demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), Nitrógeno total (Nt), Fósforo total (Pt) y Sólidos suspendidos Totales (SST).

### **2.2 Objetivos secundarios**

Los objetivos secundarios para este proyecto es ofrecer al municipio de Benisuera una alternativa para tratar las aguas residuales con más sencillez de operación, además de ser más ambientalmente amigable y mejor integrada paisajísticamente. También se persiguen objetivos como crear un espacio aprovechable para la educación ambiental o aprovechar el fango producido para las actividades agrarias del municipio.

### 3 Área de estudio

#### 3.1 Ubicación

Benisuera, es un municipio de la provincia de Valencia, situado en la comarca de la Vall d'Albaida.

En la figura 3 se muestra la localización del municipio en la provincia.

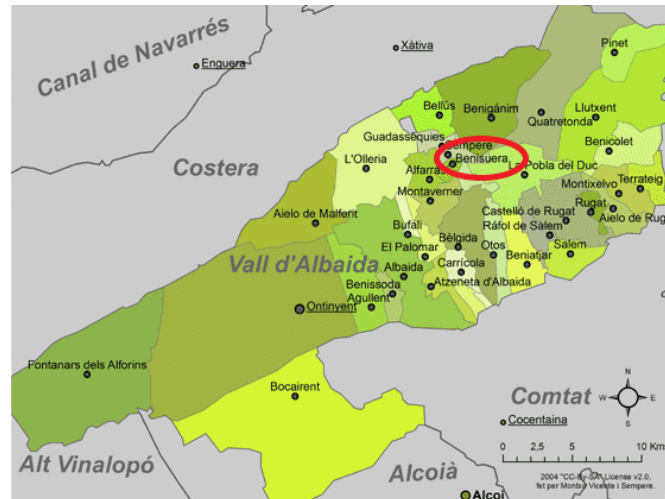


Figura 3: Plano por municipios de la comarca de la Vall d'Albaida. Fuente: Montxo Vicente i Sempere.

El término municipal de Benisuera tiene una superficie de 1,90km<sup>2</sup>, linda al Norte con Sempere, al Sur, separado por el Rio Albaida con Montaverner, al Este separado también por el Rio Albaida con Otos y al Oeste con Alfarrasí.

Actualmente, tiene una población de 185 habitantes y su principal actividad es la Agricultura, ya que este municipio carece de industria.

#### 3.2 Área de proyecto

El área seleccionada para la ubicación del sistema de depuración es el área donde se encuentra la actual estación depuradora y el área de los dos campos de cultivo adyacentes a esta, ya que el sistema de depuración por humedales artificiales requiere más superficie que el sistema de depuración actual que existe en Benisuera.

Los campos adyacentes serían adquiridos por la municipalidad ya que actualmente se encuentran en desuso.

#### 3.3 Población de diseño

Para la determinación de la población de diseño se ha utilizado el registro del Padrón municipal del Instituto Nacional de estadística. Se han recogido los datos mostrados en la figura 4:

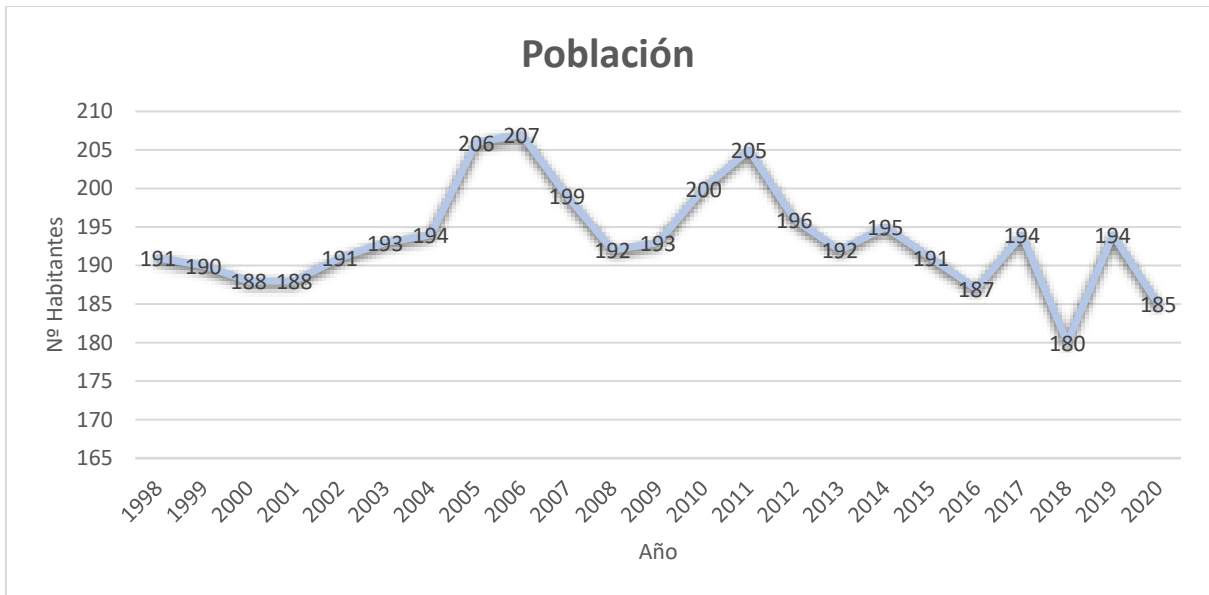


Figura 4: Evolución demográfica en los años. Fuente: elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística.

Para poder realizar una previsión de la evolución de la población en los próximos años, se ha procedido a realizar el cálculo de la tasa de crecimiento demográfico según la ecuación 1.

$$TCD = \left( \left( \frac{p^{t+n}}{p^t} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \cdot 100$$

Ecuación 1

TCD= Tasa de crecimiento demográfico (en %)

$p^{t+n}$ = Población final en el período de referencia

$p^t$ = Población inicial en el período de referencia

n= Años transcurridos entre el intervalo

$$TCD = \left( \left( \frac{185}{191} \right)^{\frac{1}{22}} - 1 \right) \cdot 100$$

Una vez realizado el cálculo, obtenemos una tasa de crecimiento demográfico de -0,14%. Al obtener una tasa de crecimiento negativa, se ha decidido utilizar el número máximo de habitantes que ha habido en el municipio desde que se tienen datos, por lo tanto, tomamos como población de diseño, 207 habitantes.

### 3.4 Condiciones meteorológicas

Los parámetros climáticos han sido obtenidos de la página web del Instituto Valenciano de investigaciones agrarias, procedentes de la estación meteorológica de Xàtiva, próxima a la zona donde se realiza el presente proyecto.

- Término: Xàtiva
- Latitud: 39°00'06.0"N

- Longitud: 0°31'25.0"O
- Altura sobre el nivel del mar: 88m
- Periodo analizado: 2016-2019

### 3.4.1 Temperatura

A continuación, se indican los datos climatológicos de una serie de 3 años (2016-2019), correspondientes a las temperaturas recogidas desde la estación meteorológica de Xàtiva, la cual es la más cercana al término.

*Tabla 1: Temperaturas medias, mínimas y máximas a lo largo del año. Fuente: Instituto Valenciano de investigaciones agrarias.*

Mes	T media (Cº)	T <sub>mín, med</sub> (Cº)	T <sub>máx, media</sub> (Cº)
Enero	11,80	5,96	17,65
Febrero	12,19	6,58	17,80
Marzo	14,51	7,98	21,35
Abril	16,75	10,08	23,42
Mayo	20,52	13,38	27,66
Junio	25,42	18,00	32,83
Julio	27,99	21,16	34,82
Agosto	27,71	21,36	34,05
Septiembre	24,61	18,30	30,93
Octubre	20,28	14,59	25,97
Noviembre	14,02	8,15	19,89
Diciembre	11,94	5,77	18,11
ANUAL	18,98	12,61	25,37

El municipio de Benisuera se caracteriza por presentar un clima mediterráneo, con una temperatura media de 19°C, con pocos días de helada leve. El mes más frío suele ser enero, con 11,8°C de media y el más caluroso julio con 28°C. Las temperaturas máximas y mínimas son suaves situándose en los 43,6°C de máxima y unos -2,1°C de mínima, las cuales se dan en situaciones puntuales como entradas de viento saharianos y de aire gélido de Siberia o del Ártico.

### 3.4.2 Precipitación

En cuanto a las precipitaciones, podemos observar que el mes con mayor abundancia de estas es enero y el mes más seco julio.

*Tabla 2: Precipitaciones características de Benisuera. Fuente: Instituto Valenciano de investigaciones agrarias.*

Mes	Precipitación media (l/m <sup>2</sup> )
Enero	1,07
Febrero	0,39
Marzo	0,12
Abril	0,27
Mayo	0,05

Tabla 3: Precipitaciones características de Benisuera. Fuente: Instituto Valenciano de investigaciones agrarias.

<b>Mes</b>	<b>Precipitación media (l/m<sup>2</sup>)</b>
Junio	0,24
Julio	0,00
Agosto	0,10
Septiembre	0,24
Octubre	0,55
Noviembre	0,49
Diciembre	1,05

#### 4 Caracterización del agua residual influente

Para la realización del estudio del caudal, la Entidad pública de Saneamiento de Aguas residuales nos ha proporcionado las concentraciones medias mensuales de los parámetros de Demanda química de oxígeno (DQO), Demanda biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Fósforo total (Pt), Nitrógeno total (Nt) y Sólidos Solubles (SS). También nos ha proporcionado la media del caudal de agua que entra al actual sistema.

Tabla 4: Contaminantes y sus concentraciones del agua residual influente. Fuente: EPSAR

Año 2020	Q medio (m <sup>3</sup> /día)	DQO influente (mg O <sub>2</sub> /l)	DBO <sub>5</sub> influente (mg O <sub>2</sub> /l)	Pt influente (mg/l)	Nt influente (mg/l)	SS influente (mg/l)
Enero	26	464	236	6,0	50,4	156
Febrero	16	367	180	4,4	43,2	141
Marzo	25	406	207	5,9	54,6	152
Abril	23	297	154	3,4	37,3	85
Mayo	21	552	258	8,6	63,5	188
Junio	38	280	136	5,5	39,4	69
Julio	22	495	232	7,7	63,2	177
Agosto	28	373	191	5,2	45,6	157
Septiembre	40	306	153	4,9	40,4	72
Octubre	16	594	309	6,6	60,0	273
Noviembre	21	479	260	7,3	63,8	173
Diciembre	19	423	224	5,7	51,4	113
Media 2020	25	420	212	5,9	51,1	146

Los datos de referencia para el cálculo del dimensionado serán las medias de 2020. Para la realización del dimensionado, previamente es necesario calcular y establecer los caudales que se usarán en el dimensionado. Los caudales que se han considerado son los siguientes.

- Caudal medio diario:

$$Q_{\text{med, d}} = 25 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Caudal máximo diario: Se calcula con la mayoración del caudal punta diario en 2 veces.

$$Q_{\text{max, d}} = 85 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Caudal punta diario: Se calcula multiplicando el caudal medio diario por el coeficiente punta, el cual en este caso se trata de 1,7.

$$Q_{\text{punta}} = 42,5 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Caudal máximo instantáneo: Se calcula como mayoración del caudal medio diario en 10 veces.

$$Q_{\text{max, i}} = 0,0029 \text{ m}^3/\text{s}$$

## 5 Dimensionado básico del sistema de depuración

### 5.1 Pretratamiento

El primer paso al que se somete el agua residual es al canal de desbaste, proceso en el cual se separa los sólidos que son interceptados en las rejillas. En el canal también se produce un desarenado debido a la disminución de la velocidad del agua.

En el canal se incluye un aliviadero lateral y una rejilla de gruesos. Para el cálculo del aliviadero lateral, el caudal en exceso a evacuar por el aliviadero lateral se ha calculado asumiendo que el caudal de lluvia y agua residual que puede llegar al sistema en un instante sea como máximo de  $0,1\text{m}^3/\text{s}$  (valor asumido para poblaciones pequeñas en la guía de García Serrano y Corzo Hernández (2008)).

#### 5.1.1 Aliviadero de entrada

Para calcular el caudal de vertido por el aliviadero se hace uso de la ecuación 2.

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

*Ecuación 2*

$Q_v$ = Caudal de vertido que debe evacuar el aliviadero (en  $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_{lluv}$ = Caudal de lluvia + agua residual que llega a la instalación (en  $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_{med}$ = Caudal medio (en  $\text{m}^3/\text{s}$ )

Se obtiene un caudal de vertido a aliviar de:

$$Q_v = 0,1 - 10 \cdot 0,00029$$

$$Q_v = 0,097\text{m}^3/\text{s}$$

Para calcular la altura de la lámina sobre el vertedero, previamente se calcula la altura para el caudal de lluvia más alto y para el caudal máximo instantáneo, obteniendo  $H_{lluv}$  y  $H_{max}$  mediante la ecuación 3.

$$H = \frac{Q}{vel \cdot ancho}$$

*Ecuación 3*

H= Altura (en m)

Q= Caudal (en  $\text{m}^3/\text{s}$ )

vel= Velocidad (en m/s)

ancho= Ancho del canal (en m)

$$H_{lluv} = \frac{0,1}{0,9 \cdot 0,6}$$

$$H_{lluv} = 0,19\text{m}$$

$$H_{max} = \frac{0,0029}{0,9 \cdot 0,6}$$



$$H_{max} = 0,0053m$$

Se restan las dos alturas obtenidas y se obtiene la altura de la lámina del agua sobre el vertedero (H).

$$H = 0,18m$$

A continuación, ya se puede determinar el caudal por metro lineal de vertedero que se requiere para este valor de H mediante la ecuación 4.

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

*Ecuación 4*

Q= Caudal por metro lineal (en m<sup>3</sup>/m·s)

H= Altura de la lámina del agua sobre el vertedero (en m)

$$Q = 1,83 \cdot (1 - (0,2 \cdot 0,18)) \cdot (0,18)^{1,5}$$

$$Q = 0,1345m^3/m \cdot s$$

Se divide el caudal a aliviar entre el caudal por metro lineal y se obtiene la longitud de vertedero.

$$L = \frac{0,097}{0,1345}$$

$$L = 0,72m \approx 0,75m$$

## 5.1.2 Canal de desbaste

En las pequeñas poblaciones, el canal de desbaste es en general el primer proceso en el tratamiento de las aguas residuales. En este proceso, se separan los sólidos que son interceptados con las rejillas y se produce un desarenado, debido a la disminución de la velocidad del agua. Se diseña un canal de desbaste con un enrejado para gruesos.

### 5.1.2.1 Reja de gruesos

Se dimensionará una reja con barrotes de 21mm de ancho, 50mm de luz entre barrotes y un grado de colmatación de 50%.

A partir del ancho del canal de 0,6m establecido en el apartado anterior, se calculará el ancho útil de paso mediante la ecuación 5.

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

*Ecuación 5*

W<sub>u</sub>= Ancho útil de paso (en m)

A<sub>c</sub>= Ancho de canal (en m)

n= Número de barrotes

A<sub>b</sub>= Ancho de barrotes (en m)

G= Grado de colmatación (normalmente se utiliza un valor de 30%)

$$W_u = (0,6 - 9 \cdot 0,021) \cdot \left(1 - \frac{50}{100}\right)$$

$$W_u = 0,2055m$$

Con la ecuación 6, se calcula el calado necesario para el grado de colmatación establecido, el caudal máximo horario y una velocidad de paso de 0,2m/s.

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

*Ecuación 6*

h= Calado (en m)

Q= Caudal de paso (en m<sup>3</sup>/s)

v= velocidad de aproximación (en m/s)

$$h = \frac{0,00098}{0,2} \cdot \frac{1}{0,2055}$$

$$h = 0,024m$$

Como se ha obtenido un valor tan bajo, se toma como valor h=0,3m

Para la longitud del canal, tomamos un tiempo de retención de 10s y una velocidad de paso del agua de 0,2m/s y aplicando la ecuación 7 obtenemos el siguiente dato.

$$L = T_H \cdot v$$

*Ecuación 7*

L= Largo del canal (en m)

T<sub>H</sub>= Tiempo de retención (en s)

v= Velocidad de aproximación del agua (en m/s)

$$L = 10 \cdot 0,2$$

$$L = 2m$$

Una vez calculados todos estos datos, obtenemos el esquema de las rejillas de gruesos mostrado en la figura 5:

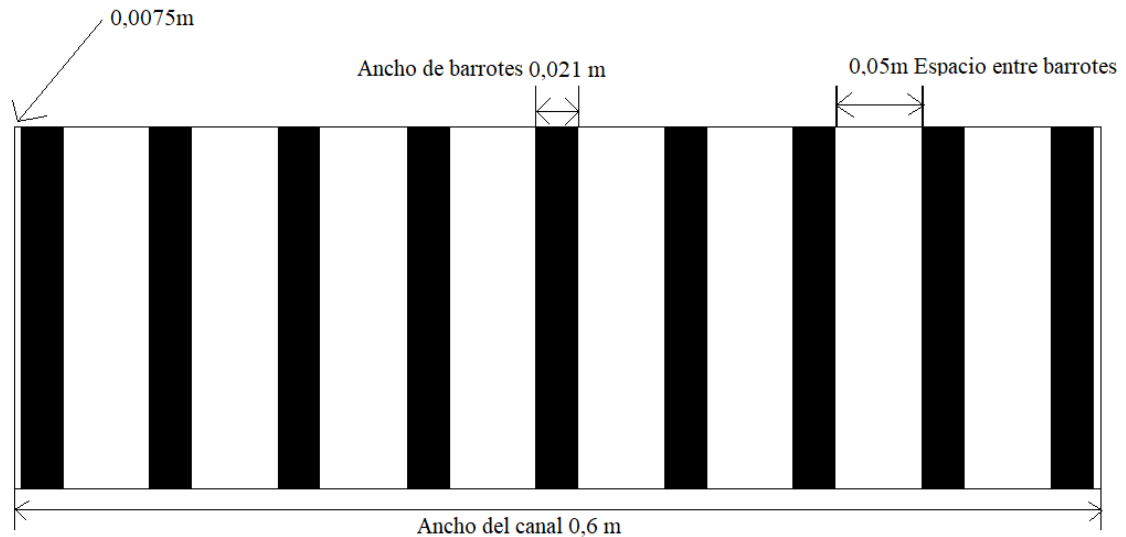


Figura 5: Croquis del enrejado. Fuente: elaboración propia.

### 5.1.3 Desarenador

Para el diseño, se asume el valor de 0,2m/s como velocidad horizontal del agua, seguidamente, se determina la sección transversal mediante la ecuación 8.

$$A = \frac{Q_{max}}{V_H}$$

Ecuación 8

A= Sección transversal (en m<sup>2</sup>)

Q<sub>max</sub>= Caudal máximo (en m<sup>3</sup>/h)

V<sub>H</sub>= Velocidad horizontal del agua (en m/s)

$$A = \frac{(3,542/3600)}{0,2}$$

$$A = 0,005m^2$$

A continuación, se procede a calcular el calado mediante el ancho del canal y la sección transversal usando la ecuación 9.

$$h = \frac{A}{W}$$

Ecuación 9

h= Calado (en m)

A= Sección transversal (m<sup>2</sup>)

W= Ancho de canal (en m)

$$h = \frac{0,005}{0,6}$$

$$h = 0,0083m$$

Como el calado necesario para el desarenado es menor que el calado calculado para el desbaste de gruesos, se toma el valor más alto como el calado de diseño.

$$h = 0,3m$$

Por último, se verifica la carga superficial mediante la ecuación 10.

$$C_s = \frac{Q}{L \cdot W}$$

*Ecuación 10*

$C_s$ = Carga superficial (en  $m^3/m^2 \cdot h$ )

$Q$ = Caudal (en  $m^3/h$ )

$L$ = Largo del canal (en m)

$W$ = Ancho del canal (en m)

$$C_s = \frac{3,5}{2 \cdot 0,6}$$

$$C_s = 2,92 \frac{m^3}{m^2 \cdot h}$$

Como la carga superficial es menor a  $70 m^3/m^2 \cdot h$ , con lo cual, se acepta el dimensionamiento.

## 5.2 Tratamiento primario

Se diseña como tratamiento primario un tanque Imhoff rectangular con 2 puntos de recogida de fangos.

### 5.2.1 Dimensionamiento Tanque Imhoff

En primer lugar, con el uso de la expresión 11, se calcula la superficie del tanque y el diseño de la zona de decantación.

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

*Ecuación 11*

$S$ = Superficie de la zona de decantación (en  $m^2$ )

$Q_{punta,d}$ = Caudal punta diario (en  $m^3/h$ )

$L_{Hpunta,d}$ = Carga hidráulica superficial punta diaria (en  $m^3/m^2 \cdot h$ )

$$S = \frac{1,771}{1}$$

$$S = 1,771 \approx 2m^2$$

Tomando una relación longitud/ancho de 2/1, se obtiene un largo de 2m y un ancho de 1m.

Estableciendo una altura del deflector debajo de la superficie de 0,7m, la pendiente de las paredes de 1,75:1 y una obertura inferior de 0,25m, con la ecuación 12, se calcula la profundidad y las superficies  $A_1$  y  $A_e$ .

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

*Ecuación 12*

P= Profundidad de la zona de decantación (en m)

$O_i$ = Longitud de la obertura inferior (en m)

p= Pendiente de la zona de decantación (en m/m)

$A_1$ ,  $A_e$  y  $A_t$  =Superficie del triángulo, rectángulo y la total (en  $m^2$ )

W= Ancho del canal (en m)

$$P = [(1 - 0,25)/2] \cdot 1,75$$

$$P = 0,66m \approx 1m$$

Una vez calculada la P, se calculan las superficies  $A_1$ ,  $A_e$  y  $A_t$  mediante las ecuaciones 13, 14 y 15.

$$A_1 = [(W - O_i)/2] \cdot P/2$$

*Ecuación 13*

$$A_e = O_i \cdot P$$

*Ecuación 14*

$$A_t = 2 \cdot A_1 + A_e$$

*Ecuación 15*

$A_1$ ,  $A_e$  y  $A_t$  =Superficie del triángulo, rectángulo y la total (en  $m^2$ )

W= Ancho del canal (en m)

P= Profundidad de la zona de decantación (en m)

$$A_1 = \left[ \frac{(1 - 0,25)}{2} \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$A_1 = 0,19m^2$$

$$A_e = 0,25 \cdot 1$$

$$A_e = 0,25m^2$$

$$A_t = 2 \cdot 0,19 + 0,25$$

$$A_t = 0,63m^2$$

A continuación, se calcula el volumen de decantación con la ecuación 16.

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

*Ecuación 16*

$V_{dec}$ = Volumen de la zona de decantación (en  $m^3$ )

$h_{deflector}$ = Altura de la zona sumergida del deflector (en m)

$$V_{dec} = (0,7 \cdot 2) + (0,63 \cdot 2)$$

$$V_{dec} = 2,66m^3$$

Por último, con las ecuaciones 17 y 18, se realizan las siguientes comprobaciones.

$$v_{puntah} = \frac{Q_{puntah}}{A_t \cdot 60} < 0,3$$

*Ecuación 17*

$v_{puntah}$ = Velocidad horizontal punta horaria (en m/min)

$Q_{puntah}$ = Caudal punta horario (en m<sup>3</sup>/h)

$A_t$  =Superficie total (en m<sup>2</sup>)

$$V_{puntah} = 0,047m/min < 0,3 m/min$$

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

*Ecuación 18.*

$T_H$ = Tiempo de retención medio (en h)

$V_{dec}$ = Volumen de la zona de decantación (en m<sup>3</sup>)

$Q$ = Caudal medio (en m<sup>3</sup>/día)

$$T_H = \frac{2,66 \cdot 24}{25}$$

$$2 < T_H = 2,55 < 4$$

A continuación, mediante la ecuación 19, se determina la superficie de la zona de digestión, considerando que la zona de escape de gases es igual al 30% de la superficie total del tanque.

$$S_T = (1 + \%S_{gas}) \cdot S_{dec}$$

*Ecuación 19*

$S_T$ = Superficie total del tanque (en m<sup>2</sup>)

$\%S_{gas}$ = Porcentaje de la superficie de la zona de escape de gases respecto de la superficie total

$S_{dec}$ = Superficie de la zona de decantación (en m<sup>2</sup>)

$$S_T = (1 + 0,30) \cdot 2$$

$$S_T = 2,6m^2$$

Considerando un ancho de la zona de escape de gases de 0,5m, se calcula el ancho y la longitud totales usando las ecuaciones 20 y 21.

$$W_t = W_{dec} + W_{gas}$$

*Ecuación 20*

$W_t$ = Ancho total del tanque (en m)

$W_{dec}$ = Ancho de la zona de decantación (en m)

$W_{\text{gas}}$ =Ancho de la zona de escape de gases (en m)

$$W_t = 1 + 0,45$$

$$W_t = 1,5m$$

$$L_t = \frac{S_t}{W_t}$$

*Ecuación 21*

$L_t$ = Longitud total del tanque (en m)

$S_t$ = Superficie total del tanque (en m<sup>2</sup>)

$W_t$ = Ancho total del tanque (en m)

$$L_t = \frac{2,6}{1,5}$$

$$L_t = 1,73m \approx 1,8m \approx 2m$$

El volumen necesario para almacenar los lodos se determina considerando una velocidad de emisión de 100L/hab·día y un tiempo de digestión de 1 año. Se utiliza la ecuación 22 para el cálculo del volumen de lodos.

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

*Ecuación 22*

$V_{\text{lodos}}$ = Volumen ocupado por los lodos (en m<sup>3</sup>)

VEU= Velocidad de emisión unitaria de lodos (en L/hab·día)

$T_d$ = Tiempo de digestión (en años)

N= Número de habitantes

$$V_{\text{lodos}} = \frac{100 \cdot 1 \cdot 207}{1000}$$

$$V_{\text{lodos}} = 20,7m^3$$

Mediante la ecuación 23, se calcula la altura de fondo para una inclinación de las paredes de 30° y 2 puntos de recogida.

$$h_3 = [(L_t/n)/2] \cdot tg \alpha$$

*Ecuación 23*

$h_3$ = Altura de fondo (en la zona piramidal) (en m)

n= Número de puntos de recogida de lodos

$\alpha$ = Inclinación de las paredes del fondo

$L_t$ = Longitud total del tanque (en m)

$$h_3 = \left[ \frac{\left(\frac{1,8}{2}\right)}{2} \right] \cdot \text{tg } 45$$

$$h_3 = 0,45\text{m}$$

Con la ecuación 24 se calcula la profundidad de la zona de digestión.

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

*Ecuación 24*

$V_{lodos}$  = Volumen necesario para almacenar los lodos (en  $\text{m}^3$ )

$h_2$  = Altura ocupada por los lodos (sin tener en cuenta la altura del fondo) (en m)

$L_t$  = Longitud total del tanque (en m)

$W_t$  = Ancho total del tanque (en m)

$h_3$  = Altura de fondo (en la zona piramidal) (en m)

Se despeja  $h_2$  y se obtiene:

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

$$h_2 = \frac{20,7 - \left(\frac{1}{3} \cdot 2 \cdot 1,45 \cdot 0,26\right)}{(2 \cdot 1,5)}$$

$$h_2 = 6,75\text{m}$$

Se considera un resguardo de 0,5, una distancia de 0,6m entre la obertura inferior de la zona de decantación y la superficie del lodo acumulado, se determina la altura y el volumen total del tanque mediante las expresiones 25 y 26.

$$h_t = h_{resguardo} + h_{deflector} + P + h_1 + h_2 + h_3$$

*Ecuación 25*

$h_t$  = Profundidad total (en m)

$h_{resguardo}$  = Profundidad de la zona de resguardo (en m)

$h_1$  = Distancia entre la obertura inferior y la superficie del lodo acumulado (en m)

$P$  = Profundidad de la zona de decantación (en m)

$$h_t = 0,5 + 0,7 + 1 + 0,6 + 6,75 + 0,45$$

$$h_t = 10\text{m}$$

$$V = V_{resguardo} + V_{dec} + V_{lodos} + [h_1 \cdot L_t \cdot W_t]$$



$V$ = Volumen total (en  $m^3$ )

$V_{\text{resguardo}}$ = Volumen correspondiente al resguardo (en  $m^3$ )

$V_{\text{lodos}}$ = Volumen necesario para almacenar los lodos (en  $m^3$ )

$V_{\text{dec}}$ = Volumen de la zona de decantación (en  $m^3$ )

$h_1$ = Distancia entre la abertura inferior y la superficie del lodo acumulado (en m)

$L_t$ = Longitud total del tanque (en m)

$W_t$ = Ancho total del tanque (en m)

$$V = 1,3 + 2,65 + 20,7 + [0,6 \cdot 2 \cdot 1,50]$$

$$V = 26,45m^3$$

La figura 6 muestra un esquema del tanque Imhoff con las medidas resultantes del cálculo.

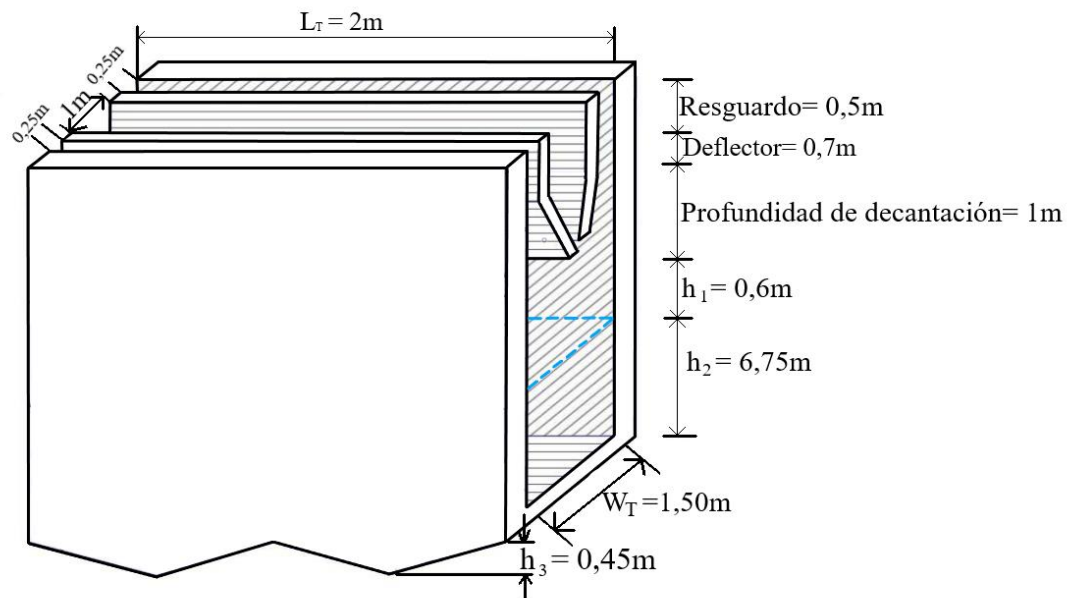


Figura 6: Esquema de tanque Imhoff. Fuente: elaboración propia

### 5.2.2 Calidad del agua después del Tanque Imhoff

Tras el paso del agua por el Tanque Imhoff, los parámetros de DQO, DBO, SS, Nt y Pt se reducen, por lo que previamente al cálculo del humedal, debemos recalcular estos parámetros. Para calcularlos, se utilizan los rendimientos propuestos (Seoáñez, 2000), las concentraciones de los contaminantes a la entrada del humedal y después del pretratamiento son las siguientes:

Tabla 5: Concentración de contaminantes tras el Tanque Imhoff. Fuente: Seoáñez, 2000.

Variable	$C_0$ antes del TI	% eliminación	$C_0$ después de TI
DQO	420,00	40,00	252,00
DBO5	212,00	40,00	127,20
SS	146,00	55,00	65,70

Tabla 6: Concentración de contaminantes tras el Tanque Imhoff. Fuente: Seoáñez, 2000.

Variable	C <sub>0</sub> antes del TI	% eliminación	C <sub>0</sub> después de TI
NT	51,07	10,00	45,96
PT	5,93	10,00	5,34

### 5.3 Gestión de lodos

Los lodos digeridos procedentes de los tanques Imhoff serán gestionados en el mismo sitio, para ello, se diseña una era de secado que mediante evaporación y filtración a través del medio de drenaje retire el agua contenida en los lodos. Los lodos serán retirados con una bomba del Tanque Imhoff y una vez deshidratados se podrán valorizar para el uso agrícola.

Se recomienda disponer de mínimo dos eras de secado para mantener una de ellas operativa mientras la otra entra en mantenimiento o vaciado. Se establece como volumen de diseño para cada era el volumen de lodos de un tanque Imhoff. Las eras de secado recibirán el lodo del Tanque Imhoff cada 6 meses, para aprovechar al máximo la capacidad de almacenamiento del tanque. Se calcula la superficie de secado mediante la ecuación 27.

$$S = \frac{V_{lodos}}{h}$$

Ecuación 27

S= Superficie de la era de secado (en m<sup>2</sup>)

V= Volumen de lodos (en m<sup>3</sup>)

h= Espesor de la capa del lodo (en m)

Se recomienda que el espesor del lodo de las eras sea de entre 20 y 30 cm, por lo que se supone un espesor de 30cm.

$$S = \frac{20,7}{0,3}$$

$$S = 69m^2$$

Se calcula el largo y el ancho estableciendo una relación largo-ancho de 2 a 1 y se obtienen las siguientes dimensiones para cada era de secado.

- **Ancho: 5,9 m**
- **Largo: 11,75 m**

### 5.4 Tratamiento secundario

#### 5.4.1 Dimensionamiento Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal

Para realizar el dimensionado del humedal, se van a realizar los cálculos en dos partes, en la primera, se trata del dimensionado biológico, en la que se calcula la superficie necesaria para que el humedal reduzca el porcentaje necesario de los parámetros deseados.

##### 5.4.1.1 Dimensionamiento biológico

Para la obtención de las ecuaciones, se plantea que el humedal se comporte como un reactor de flujo ideal en pistón en los cuales los contaminantes se degraden siguiendo modelos cinéticos

de primer orden (Brix, H, 1994). El balance de masa por un contaminante se expresa mediante la ecuación 28.

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

*Ecuación 28*

C= Concentración del contaminante (en mg/l)

$k_v$ = Constante cinética de primer orden (en días)

Se integra la ecuación entre la concentración inicial o afluente y la final o efluente y se obtiene la ecuación 29.

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

*Ecuación 29*

$C_0$ = Concentración inicial (en mg/l)

$C_1$ = Concentración final (en mg/l)

t= Tiempo medio de retención hidráulico (en días)

El tiempo medio de retención hidráulico se expresa mediante la ecuación 30.

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

*Ecuación 30*

V= Volumen del humedal (en m<sup>3</sup>)

Q= Caudal medio (en m<sup>3</sup>/d)

$\varepsilon$ = Porosidad (en tanto por uno)

S= Superficie del humedal (en m<sup>2</sup>)

h= Profundidad media del humedal (en m)

Se sustituye t en las dos ecuaciones anteriores y se define una nueva constante de primer orden,  $K_A$ . Se obtiene la ecuación 31

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

*Ecuación 31*

Se despeja S obteniendo así la ecuación 32.

$$S = \frac{Q}{K_A} \ln \left[ \frac{C_0}{C_1} \right]$$

*Ecuación 32*

$C_0$ = Concentración inicial (en mg/l)

$C_1$ = Concentración final (en mg/l)

Q= Caudal medio (en m<sup>3</sup>/d)

$K_A$ = Constante de velocidad de eliminación del contaminante en medio poroso (en m/día)

Con la ecuación 32, calculamos la superficie necesaria para reducir los parámetros el porcentaje que nos requiere la legislación. A continuación, en la tabla 5 se muestran los valores de  $K_A$  que se han utilizado para el cálculo de las superficies, ya que este parámetro, varía según el contaminante. Tanto el valor de  $K_A$  para la  $DBO_5$  y el  $Nt$  son valores recomendados por García Serrano y Corzo Hernández (2008), el valor para el Fósforo fue propuesto por Kadlec North American Data Base.

Tabla 7: Valores de  $K_A$  para cada parámetro. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	$K_A$ (m/d)
$DBO_5$	0,0800
$Nt$	0,0250
$Pt$	0,0274

- Superficie para  $DBO_5$

La concentración inicial de  $DBO_5$  es de 127,2mg/l  $O_2$  por lo que, si se reduce un 80% que marca la legislación, se obtiene una concentración de 25,44mg/l  $O_2$ .

$$S = \frac{25}{0,08} \ln \left[ \frac{127,2}{25,44} \right]$$

$$S = 503m^2$$

- Superficie para  $Nt$

La concentración inicial de  $Nt$  es de 45,963mg/l por lo que, si se reduce un 70% que marca la legislación, se obtiene una concentración de 13,79mg/l.

$$S = \frac{25}{0,025} \ln \left[ \frac{45,96}{13,79} \right]$$

$$S = 1204m^2$$

- Superficie para  $Pt$

La concentración inicial de  $Pt$  es de 5,337mg/l por lo que, si se reduce un 80% que marca la legislación, se obtiene una concentración de 1,07mg/l.

$$S = \frac{25}{0,0274} \ln \left[ \frac{5,33}{1,07} \right]$$

$$S = 1469m^2$$

Una vez obtenidas las superficies, se escoge como válida la mayor, ya que esta asegura el porcentaje mínimo de reducción de contaminantes, por lo que se estima una superficie de 1500m<sup>2</sup>.

Mediante la ecuación 33, se calcula la carga orgánica superficial, la cual tiene que ser menor a 6g  $DBO_5/m^2 \cdot dia$ , si no cumple, se deberá incrementar la superficie del humedal.

$$C = \frac{Q \cdot C_0}{S}$$

Ecuación 33

C= Carga superficial (en g  $DBO_5/m^2 \cdot dia$ )

Q= Caudal medio diario (en m<sup>3</sup>/día)

C<sub>0</sub>= Concentración del contaminante a partir de la caracterización del efluente (g/m<sup>3</sup>)

$$C = \frac{25 \cdot 0,1272}{1500}$$

$$C = 0,002g \text{ DBO}_5/m^2 \cdot dia$$

Se recalculan todos los valores en función de esta nueva superficie mediante la ecuación 34.

$$C = \frac{C_0}{e^{\left(\frac{S \cdot K_A}{Q}\right)}}$$

*Ecuación 34*

*Tabla 8: Contaminantes del agua residual efluente. Fuente: elaboración propia*

Parámetro	Ka (m/d)	C0 (mg/l)	C1 (mg/l)	% reducción (%)	% reducción mínima (%)
DBO <sub>5</sub>	0,0800	127,2	1,0	99,2	80,0
Nt	0,0250	46,0	10,3	77,7	70,0
Pt	0,0274	5,3	1,0	80,7	80,0

Para el cálculo de la reducción de SS en el Humedal, se realizará mediante el uso de la ecuación 35, la cual se ha encontrado en la extensa lista de ecuaciones de regresión para humedales en Rousseau et al. (2004). Esta ecuación se puede utilizar cuando la concentración de sólidos efluente esta entre 0 y 60 mg/l y la concentración influente esta entre 0 y 330 mg/l.

$$C_0 = (0,65 \cdot C_i) + 0,71$$

*Ecuación 35*

C<sub>0</sub>= Concentración efluente (en mg/l)

C<sub>i</sub>= Concentración influente (en mg/l)

$$C_0 = (0,65 \cdot 65,7) + 0,71$$

$$C_0 = 43,42mg/l$$

#### 5.4.1.2 Dimensionamiento hidráulico

El dimensionamiento hidráulico se realiza para la obtención de las dimensiones del sistema una vez determinada su superficie. Mediante la aplicación de la ley de Darcy, que describe el régimen del flujo en un medio poroso, se obtiene la ecuación 36.

$$Q = K_s \cdot A_s \cdot s$$

*Ecuación 36*

Q= Caudal (en m<sup>3</sup>/día)

K<sub>s</sub>= Conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo (en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·dia)

$A_s$ = Sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo (en  $m^2$ )

$s$ = Gradiente hidráulico (en m/m)

De acuerdo con García Serrano y Corzo Hernández (2008) como caudal se recomienda tomar el máximo diario para asegurarse de que el sistema absorberá bien las puntas de caudal. No se deben utilizar caudales punta horarios ya que originan sistemas excesivamente anchos y poco largos,

La conductividad hidráulica varía en función de la cantidad y el tamaño de los huecos del medio granular utilizado. En la siguiente tabla se muestran diferentes valores de conductividad hidráulica de acuerdo con el tipo de sustrato.

Tabla 9: Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica ( $K_s$ ) en función del tipo de material granular utilizado como sustrato en un humedal construido de flujo subsuperficial. Fuente: Reed et al. ,1995.

Tipo de sustrato	Tamaño efectivo ( $D_{10}$ )	Porosidad	Conductividad hidráulica $K_s$
	(mm)	(%)	( $m^3/m^2/día$ )
Arenas graduadas	2	28-32	100-1000
Arenas gravosas	8	30-35	500-5000
Gravas finas	16	35-38	1000-10000
Gravas medianas	32	36-40	10000-50000
Rocas pequeñas	128	38-45	50000-250000

Mediante la ecuación 37 se realiza el cálculo de las dimensiones del humedal

$$A_s = \frac{Q_{max, d}}{\frac{K_s}{f_s} \cdot s}$$

Ecuación 37

$A_s$ = Sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo (en  $m^2$ )

$Q_{max, d}$ = Caudal máximo diario (en  $m^3/día$ )

$k_s$ = Conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo (en  $m^3/m^2 \cdot día$ )

$f_s$ = Factor de seguridad

$s$ = Gradiente hidráulico o pendiente (en m/m)

$$A_s = \frac{85}{\frac{3000}{7} \cdot 0,01}$$
$$A_s = 19,84m^2$$

Se fija la profundidad en 0,3 metros y se calcula la sección transversal, se determina el ancho mediante la ecuación 38.

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

*Ecuación 38*

W= Ancho del humedal (en m)

A<sub>s</sub>= Sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo (en m<sup>2</sup>)

h= Profundidad (en m)

$$W = \frac{19,84}{0,3}$$

$$W = 66,13m \approx 66m$$

Calculamos la longitud del humedal mediante la ecuación 39.

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

*Ecuación 39*

L= Longitud del humedal (en m)

S= Superficie del humedal (en m<sup>2</sup>)

W= Ancho del humedal (en m)

$$L = \frac{1500}{66,13}$$

$$L = 22,68m \approx 23m$$

Considerando que un humedal artificial trabaja como reactor flujo pistón, el tiempo de retención hidráulico que se obtiene mediante la ecuación 40 es el siguiente.

$$TR = \frac{n \cdot S \cdot h}{Q_{med, d}}$$

*Ecuación 40*

TR= Tiempo de retención (en días)

n= Porosidad

S= Superficie del humedal (en m<sup>2</sup>)

h= Profundidad (en m)

Q<sub>med, d</sub>= Caudal medio diario (en m<sup>3</sup>/día)

$$TR = \frac{0,30 \cdot 1500 \cdot 0,3}{25}$$

$$TR = 5,4 \text{ días}$$

#### 5.4.2 Determinación de vida útil

Uno de los principales inconvenientes de los humedales es la colmatación del sustrato, factores como una excesiva carga contaminante o una gran acumulación de restos vegetales, hacen que se acelere. Cuando un humedal presenta síntomas de colmatación, se deben realizar vaciados

intermitentes lo cual solamente es una solución temporal ya que, a medio-largo plazo, estos humedales acaban por obturarse.

Para determinar la vida útil del humedal, en primer lugar, se debe calcular la carga hidráulica superficial mediante la ecuación 41.

$$CHS = 100 \cdot \frac{Q}{S}$$

*Ecuación 41*

Q= caudal del influente (en m<sup>3</sup>/día)

S= Superficie del humedal (en m<sup>2</sup>)

CHS= Carga hidráulica superficial (en cm/día)

$$CHS = 100 \cdot \frac{25}{1500}$$

$$CHS = 1,67 \text{ cm/día}$$

Una vez se obtiene la carga superficial, se calcula la concentración de sólidos suspendidos en el efluente con la ecuación 42.

$$C_0 = C_i \cdot (0,1058 + 0,0011CHS)$$

*Ecuación 42*

C<sub>0</sub>= Concentración de sólidos en suspensión en el efluente (mg/l)

C<sub>i</sub>= Concentración de sólidos en suspensión en el influente (mg/l)

CHS= Carga hidráulica superficial (en cm/día)

$$C_0 = 65,7 \cdot (0,1058 + 0,0011 \cdot 1,67)$$

$$C_0 = 7,07 \text{ mg/l}$$

Se restan los valores de C<sub>0</sub> y C<sub>i</sub> para calcular la acumulación anual. Se utilizan las ecuaciones 43 y 44.

$$\Delta C = C_1 - C_0$$

*Ecuación 43*

C<sub>0</sub>= Concentración de sólidos en suspensión en el efluente (mg/l)

C<sub>i</sub>= Concentración de sólidos en suspensión en el influente (mg/l)

ΔC= Sólidos filtrados por el humedal (en mg/l)

$$\Delta C = 65,7 - 7,07$$

$$\Delta C = 58,63 \text{ mg/l} \approx 0,05863 \text{ kg/l}$$

$$\text{acumulación anual} = \Delta C \cdot Q \cdot 365$$

*Ecuación 44*

ΔC= Sólidos filtrados por el humedal (en kg/l)



Q= Caudal influente (m<sup>3</sup>/día)

$$\text{acumulación anual} = 0,05863 \cdot 25 \cdot 365$$

$$\text{acumulación anual} = 534,98\text{kg/año}$$

De esta cantidad, se supone que el 70% será SSV y el 30 SSNV, calculamos con estos porcentajes la cantidad de cada uno y se obtiene lo siguiente.

- SSV: 374,49kg/año
- SSNV: 160,5kg/año

Martín y Hernández – Crespo (2016) indican que alrededor del 50% de los sólidos en suspensión volátiles se quedan en el humedal, con lo cual, se calcula la acumulación real de sólidos según la ecuación 45.

$$\text{acumulación real anual} = \text{SSNV} + 0,5 \cdot \text{SSV}$$

*Ecuación 45*

SSNV= Sólidos solubles no volátiles (en kg/año)

SSV= Sólidos solubles volátiles (en kg/año)

$$\text{acumulación real anual} = 160,5 + 0,5 \cdot 374,49$$

$$\text{acumulación real anual} = 374,74 \text{ kg/año}$$

A continuación, se calcula la capacidad del humedal para retener sólidos mediante la ecuación 46.

$$\text{Capacidad del humedal para retener sólidos} = n \cdot h \cdot S \cdot d_s$$

*Ecuación 46*

n= Porosidad del sustrato (en %)

h= Profundidad del humedal (en m)

S= Superficie del humedal (en m<sup>2</sup>)

d<sub>s</sub>= Densidad del sólido en condiciones húmedas (en kg/m<sup>3</sup>)

Martín y Hernández-Crespo (2016) recomiendan un valor para la densidad del sólido en condiciones húmedas de 1200 Kg/m<sup>3</sup>.

$$\text{Capacidad del humedal para retener sólidos} = 0,30 \cdot 0,3 \cdot 1500 \cdot 1200$$

$$\text{Capacidad del humedal para retener sólidos} = 162000 \text{ kg}$$

Martín y Hernández – Crespo (2016) indican que la humedad del fango esta alrededor del 90%, por tanto, aplicando este valor se puede obtener la capacidad de retención sólidos secos (ecuación 47).

$$\text{Retención de sólidos secos} = 10\% \cdot \text{Capacidad del humedal} \quad (47)$$

*Ecuación 47*

$$\text{Retención de sólidos secos} = 10\% \cdot 162000$$

Retención de sólidos secos = 16200kg de sólidos secos

Una vez realizados estos cálculos, se determina con la ecuación 48, la vida útil del humedal relacionando la retención de sólidos secos con la acumulación anual de secos.

$$\text{Vida útil del humedal} = \frac{\text{retención de sólidos secos}}{\text{acumulación real anual de sólidos}}$$

Ecuación 48

Retención de sólidos secos (en kg)

Acumulación anual de sólidos (en kg/año)

$$\text{Vida útil del humedal} = \frac{16200}{374,74}$$

$$\text{Vida útil del humedal} = 46,58 \text{ años}$$

Calculamos el rendimiento con la ecuación 49.

$$\text{rendimiento} = \left(1 - \frac{C_0}{C_i}\right) \cdot 100\%$$

Ecuación 49

$C_0$ = Concentración de sólidos en suspensión en el efluente (mg/l)

$C_i$ = Concentración de sólidos en suspensión en el influente (mg/l)

$$\text{rendimiento} = \left(1 - \frac{7,07}{65,7}\right) \cdot 100\%$$

$$\text{rendimiento} = 89,24\%$$

## 5.5 Selección de la ubicación

Para el presente proyecto la ubicación seleccionada se encuentra en la zona más baja del municipio, en los terrenos adyacentes donde se ubica la existente EDAR (figura 7).



Figura 7: Parcelas adyacentes a las instalaciones de la EDAR. Fuente: ICV. Escala aprox.: 1/600 Coord. UTM (ETRS89, Huso 30) X:718.655,60 m, Y:4.309.928,83 m

Las parcelas 90 y 92 serían adquiridas por la municipalidad. La superficie de la parcela 92 es de 1625m<sup>2</sup> y la de la parcela 90 de 924m<sup>2</sup> en total, unificando las dos parcelas y la superficie de la EDAR existente, la superficie total disponible es de más de 3.500m<sup>2</sup>.

Aprovechando que el área se sitúa en la zona de menor altitud del municipio, se proyecta el sistema con un funcionamiento a gravedad en su totalidad. En las figuras 8 y 9 se muestra un esquema con la distribución de diferentes elementos del sistema.

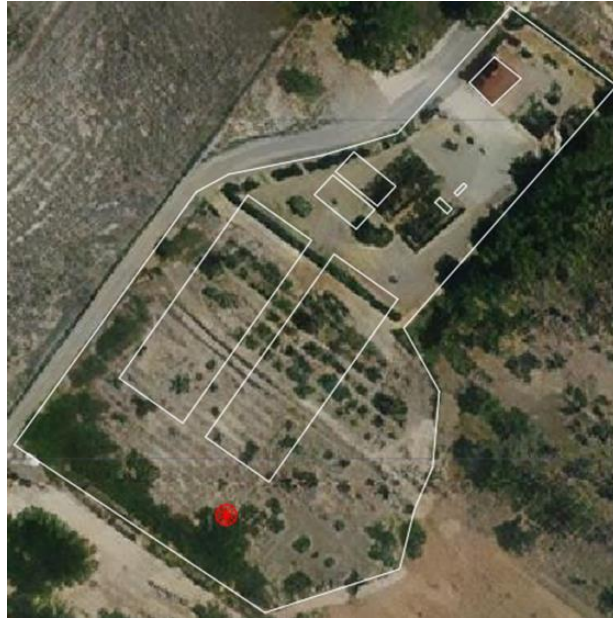


Figura 8: Croquis de la instalación final con ortofoto de base. Fuente: elaboración propia. Escala aprox.: 1/600 Coord. UTM (ETRS89, Huso 30) X:718.655,60 m, Y:4.309.928,83 m

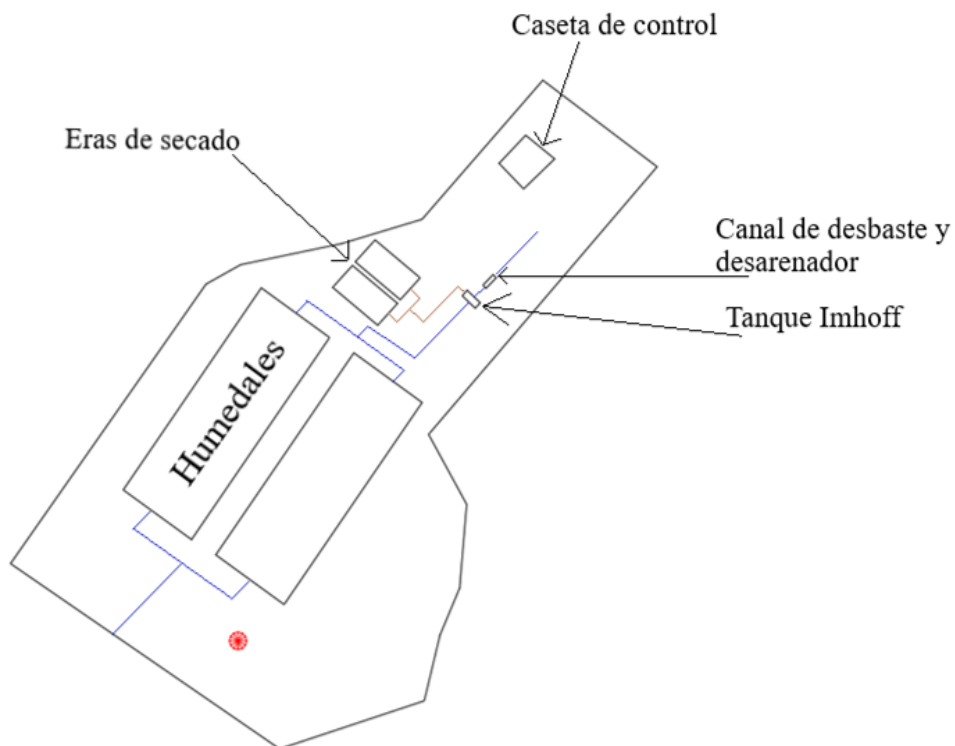


Figura 9: Croquis de la instalación final. Fuente: elaboración propia. Escala aprox.: 1/600.

## 5.6 Sistema de distribución y recogida

El principal objetivo de los sistemas de distribución y recogida es garantizar una buena distribución de agua, para ello el caudal debe estar repartido equitativamente en todo el ancho del sistema ya que, si no, se generan zonas muertas, circuitos preferentes y mayor colmatación en la zona donde se vierta mayoritariamente el agua.

El caudal del agua procedente del tratamiento primario deberá dividirse equitativamente entre los dos humedales que se han dimensionado, esto se realiza en arquetas en las que se encuentran aliviaderos. Estas arquetas como norma general deben ser suficientemente grandes para permitir de forma cómoda su limpieza, la tapa debe ser metálica y perforada para permitir la expulsión de gases, además de ser resistente al ataque de ácidos.

Para reducir la velocidad del agua en la arqueta se colocará un deflector y así evitar circuitos preferenciales en la arqueta. Para poder realizar las operaciones de mantenimiento se colocarán unas válvulas en los tubos que conducen el agua desde las arquetas hasta los humedales para cuando estas válvulas se cierren, que el agua circule por un paso alternativo evitando el paso por los humedales. En la figura 10, se muestra un croquis de una arqueta de distribución.

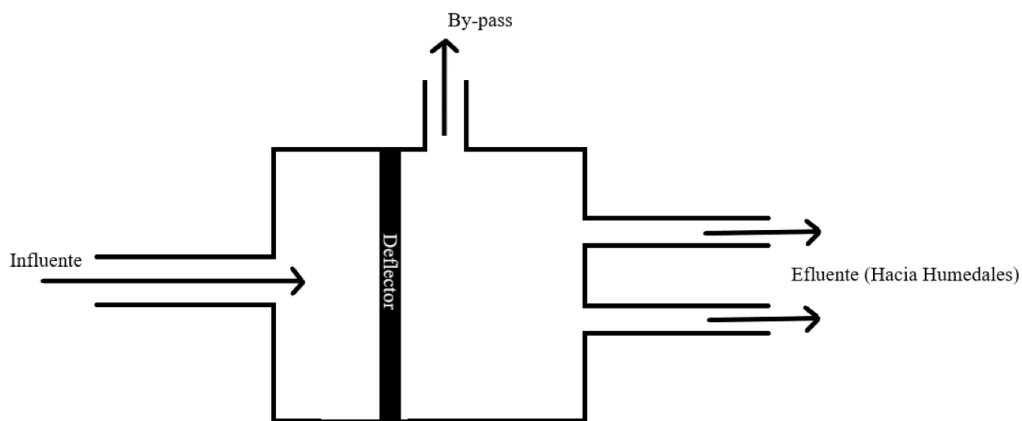


Figura 10: Arqueta de distribución. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las tuberías deben tener un diámetro que permita la circulación del caudal lámina libre, la velocidad recomendada de circulación por García Serrano y Corzo Hernández (2008) este 1 m/s.

Seguidamente, el agua llega a cada una de las celdas en que están constituidos los humedales a través de lo que se conoce como zona de entrada, esta está constituida por dos elementos: un sistema de vertido y una franja de material granular de gran tamaño. Con estos elementos se consigue que el agua se reparta uniformemente en la cabecera de cada celda. Después de circular por el humedal el agua se evacúa por donde se denomina zona de salida, la cual está constituida también por dos elementos: un sistema de recogida y una franja de material granular de gran tamaño.

Finalmente, el sistema de recogida consta de una tubería de drenaje perforada para permitir el paso del agua pero no del medio granular del humedal y una arqueta de salida en la que irá a parar el paso alternativo del agua cuando se realizan operaciones de mantenimiento (figura 11).

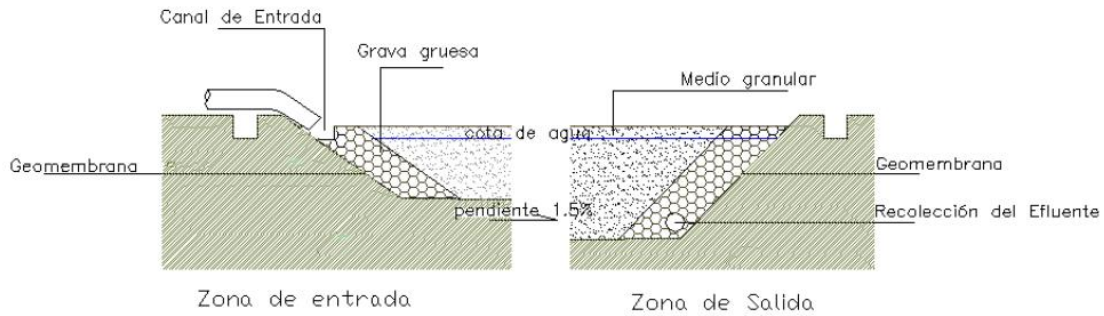


Figura 11: Zona de entrada y de salida en un humedal de flujo subsuperficial horizontal. Fuente: García Serrano y Corzo Hernández (2008).

### 5.7 Medio Granular

Para el medio granular que se va a utilizar en el humedal, Martín y Hernández-Crespo (2016) recomiendan utilizar material granular de entre 5-15mm de diámetro, para evitar futuros inconvenientes como la colmatación por raíces o sólidos.

En cuanto al espesor del lecho, en sistemas horizontales García Serrano y Corzo Hernández (2008) señalan que, de acuerdo con investigaciones realizadas, los humedales con 0,3m de profundidad y con un medio granular de 0,35mm se observan muy buenos resultados.

Una vez recopilada esta información el medio granular que se escoge para este proyecto son Arenas Gravasas, las cuales, tienen un diámetro de 8mm y una porosidad de 30-35%; este sustrato, debe ser limpio, homogéneo, durable y capaz de mantener su forma a lo largo del tiempo. Por otra parte, se escoge una profundidad de 0,3m como recomiendan García Serrano y Corzo Hernández (2008). El medio granular del humedal, quedará delimitado entre las zonas de entrada y salida descritas en el apartado anterior.

### 5.8 Impermeabilización

La impermeabilización de la superficie en la que se va a situar el humedal tiene como objetivo asegurar la contención de las aguas en este, evitando las infiltraciones que puedan contaminar las aguas subterráneas. La impermeabilización, se realizará en los taludes de la zona de entrada, los de la zona de salida, los de los laterales y en el fondo del humedal.

Dependiendo de las condiciones locales puede ser suficiente una adecuada compactación del terreno, pero también puede ser necesario realizar aportaciones de arcilla o utilizar geomembranas. En cada caso debe ser evaluado en particular.

Para el proyecto, se va a realizar el método más utilizado, el cual se trata de anclar las geomembranas en las zanjas periféricas, el cual se fija mediante el relleno de estas. Es importante disminuir en lo posible el número de soldaduras de la tela, por lo que se recomienda que se visite previamente el terreno por los instaladores. Para la colocación de las geomembranas, se recomienda evitar arrugas de la lámina. Finalmente, para el anclaje de esta se excavará a 1m de la creta del talud una zanja de 0,30m de ancho y 0,30m de profundidad, donde se fijará la lámina.

## 5.9 Plantación

Para la vegetación que se va a plantar sobre el lecho, García Serrano y Corzo Hernández (2008) indican que con las especies de carrizo (*Phragmites australis*), espadaña (*Typha latifolia* o *T. angustifolia*) o juncos (*Scirpus lacustris*), se obtienen buenos resultados. En Europa, la especie más usada para estos sistemas es el carrizo.

Por otra parte, también en Salas (2007) señala que en humedales artificiales de flujo subsuperficial, el carrizo (*Phragmites australis*) ofrece las siguientes ventajas:

- Buena adaptación a las condiciones hídricas de los humedales.
- Buena transferencia de oxígeno desde las partes en la superficie hasta los rizomas y raíces, lo cual favorece el desarrollo de bacterias.
- Los tallos percolan el agua, favoreciendo la filtración, lo que reduce el riesgo de colmatación.
- El ciclo vegetativo tiene una duración mayor al de otras plantas emergentes.

Una vez visto esto, la especie seleccionada para la plantación del humedal es el carrizo (*Phragmites australis*). La plantación se realizará de plántulas que han sido previamente cultivadas en vivero, estas, si tienen luz, agua y nutrientes, crecen rápidamente y dan muy buenos resultados.

## 5.10 Resumen de Cálculos.

Se ha realizado el dimensionamiento de un canal de desbaste, un desarenador, un tanque Imhoff, y un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, a continuación, se indican en las tablas 8 a 19:

Tabla 10: Población de diseño. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Cantidad	Unidad
Población final en período de referencia	185	habitantes
Población inicial en el período de referencia	191	habitantes
Años transcurridos entre el intervalo	22	años

Tabla 11: Concentración de contaminantes en el agua residual al ingreso del sistema. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Cantidad	Unidad
DQO	420,00	mg O <sub>2</sub> /l
DBO <sub>5</sub>	212,00	mg O <sub>2</sub> /l
Fósforo total	5,93	mg/l
Nitrógeno total	51,07	mg/l
Sólidos suspendidos totales	146,00	mg/l

Tabla 12: Caracterización del caudal para el humedal artificial. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Cantidad	Unidad
Caudal medio diario	25,000	m <sup>3</sup> /día
Caudal máximo diario	85,000	m <sup>3</sup> /día
Caudal punta diario	42,200	m <sup>3</sup> /día
Caudal máximo instantáneo	0,003	m <sup>3</sup> /día

Tabla 13: Valores para el aliviadero de entrada. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Cantidad	Unidad
Caudal de vertido que debe evacuar el aliviadero	0,0097	m <sup>3</sup> /s
Caudal de lluvia + agua residual que llega a la instalación	0,1000	m <sup>3</sup> /s
Caudal medio	0,0003	m <sup>3</sup> /s
Altura de la lámina para el caudal máximo instantáneo	0,0053	m
Altura de la lámina para el caudal de lluvia	0,1900	m
Velocidad	0,9000	m/s
Ancho del canal	0,6000	m
Altura de la lámina del agua sobre el vertedero	0,1800	m
Caudal por metro lineal	0,1345	m <sup>3</sup> /m·s
Longitud de vertedero	0,7500	m

Tabla 14: Parámetros para la reja de gruesos. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Cantidad	Unidad
Ancho útil de paso	0,206	m
Ancho del canal	0,600	m
Número de barrotes	9,000	barrotes
Ancho de barrotes	0,021	m
Grado de colmatación	50,000	%
Calado	0,024	m
Caudal de paso	0,001	m <sup>3</sup> /s
Velocidad de aproximación	0,200	m/s
Largo del canal	2,000	m
Tiempo de retención	10,000	s

Tabla 15: Parámetros para el cálculo del desarenador. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Cantidad	Unidad
Sección transversal	0,005	m <sup>2</sup>
Caudal máximo	0,001	m <sup>3</sup> /h
Velocidad horizontal del agua	0,200	m/s
Calado	0,300	m
Ancho del canal	0,600	m
Carga superficial	2,920	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·h
Caudal	3,500	m <sup>3</sup> /h

Tabla 16: Calidad del agua después del tratamiento secundario. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Cantidad	Unidad
DBO <sub>5</sub> antes del tratamiento secundario	127,20	mg O <sub>2</sub> /l
Fósforo total antes del tratamiento secundario	5,30	mg/l
Nitrógeno total antes del tratamiento secundario	46,00	mg/l
Sólidos suspendidos totales antes del tratamiento secundario	65,70	mg/l
% de eliminación de DBO <sub>5</sub>	99,20	%
% de eliminación de Fósforo total	80,70	%
% de eliminación de Nitrógeno total	77,70	%
% de eliminación de Sólidos suspendidos totales	33,91	%
DBO <sub>5</sub> después del tratamiento secundario	1,00	mg O <sub>2</sub> /l
Fósforo total después del tratamiento secundario	10,30	mg/l
Nitrógeno total después del tratamiento secundario	1,00	mg/l
Sólidos suspendidos totales después del tratamiento secundario	43,42	mg/l



Tabla 17: Parámetros para el Tanque Imhoff. Fuente: elaboración propia

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Superficie de la zona de decantación	2,000	m <sup>2</sup>
Caudal punta diario	1,771	m <sup>3</sup> /h
Carga hidráulica superficial punta diaria	1,000	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·h
Profundidad de la zona de decantación	1,000	m
Longitud de la obertura inferior	0,250	m
Ancho del canal	1,000	m
Pendiente de la zona de decantación	1,750	m/m
Superficie del triángulo	0,190	m <sup>2</sup>
Superficie del rectángulo	0,250	m <sup>2</sup>
Superficie total	0,630	m <sup>2</sup>
Volumen de la zona de decantación	2,650	m <sup>3</sup>
Altura de la zona sumergida del deflector	0,700	m
Velocidad horizontal punta horaria	0,047	m/min
Tiempo de retención medio	2,550	h
Superficie total del tanque	2,600	m <sup>2</sup>
Porcentaje de la superficie de la zona de escape de gases respecto de la superficie total	30,000	%
Ancho total del tanque	1,450	m
Ancho de la zona de decantación	1,000	m
Ancho de la zona de escape de gases	0,450	m
Longitud total del tanque	2,000	m
Volumen ocupado por los lodos	20,700	m <sup>3</sup>
Velocidad de emisión unitaria de lodos	100,000	L/hab·día
Número de habitantes	207,000	hab
Tiempo de digestión	1,000	años
Altura de foso en la zona piramidal	0,450	m
Número de puntos de recogida de lodos	2,000	puntos
Inclinación de las paredes del fondo	45,000	grados
Altura ocupada por los lodos	6,750	m
Profundidad total	10,000	m
Profundidad de la zona de resguardo	0,500	m
Distancia entre la obertura inferior y la superficie de lodo acumulado	0,600	m
Volumen total	26,450	m <sup>3</sup>
Volumen correspondiente al resguardo	1,300	m <sup>3</sup>

Tabla 18: Calidad del agua después del Tanque Imhoff. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Cantidad	Unidad
% de eliminación de DQO	40,00	%
% de eliminación de DBO <sub>5</sub>	40,00	%
% de eliminación de Fósforo total	55,00	%
% de eliminación de Nitrógeno total	10,00	%
% de eliminación de Sólidos suspendidos totales	10,00	%
DQO después del TI	252,00	mg O <sub>2</sub> /l
DBO <sub>5</sub> después del TI	127,20	mg O <sub>2</sub> /l
Fósforo total después del TI	65,70	mg/l
Nitrógeno total después del TI	45,96	mg/l
Sólidos suspendidos totales después del TI	5,34	mg/l

Tabla 19: Parámetros para la gestión de los lodos. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Cantidad	Unidad
Volumen de lodos	20,7	m <sup>3</sup>
Superficie de las eras de secado	69,0	m <sup>2</sup>
Espesor de la capa del lodo	0,3	m
Ancho de la era de secado	5,9	m
Largo de la era de secado	11,8	m

Tabla 20: Parámetros para el dimensionamiento biológico del humedal. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Cantidad	Unidad
Caudal	25,000	m <sup>3</sup> /día
Constante de velocidad de eliminación de DBO <sub>5</sub>	0,080	m/día
Concentración inicial de DBO <sub>5</sub>	127,200	mg/l
Concentración final de DBO <sub>5</sub>	25,440	mg/l
Superficie necesaria para la reducción de DBO <sub>5</sub>	503,000	m <sup>2</sup>
Constante de velocidad de eliminación del nitrógeno total	0,025	m/día
Concentración inicial del nitrógeno total	45,960	mg/l
Concentración final del nitrógeno total	13,790	mg/l
Superficie necesaria para la reducción del nitrógeno total	1204,000	m <sup>2</sup>
Constante de velocidad de eliminación del fósforo total	0,027	m/día
Concentración inicial del fósforo total	5,330	mg/l
Concentración final del fósforo total	1,070	mg/l
Superficie necesaria para la reducción del fósforo total	1469,000	m <sup>2</sup>
Carga superficial	0,002	g DBO <sub>5</sub> /m <sup>2</sup> ·día
Superficie escogida para el humedal	1500,000	m <sup>3</sup>
Porcentaje mínimo de reducción de DBO <sub>5</sub>	80,000	%
Porcentaje de reducción de DBO <sub>5</sub> obtenido	99,200	%
Porcentaje mínimo de reducción de nitrógeno total	70,000	%
Porcentaje de reducción de nitrógeno total obtenido	77,700	%
Porcentaje mínimo de reducción de fósforo total	80,000	%
Porcentaje de reducción de fósforo total obtenido	80,700	%
Concentración inicial de sólidos suspendidos	65,700	mg/l
Concentración final de sólidos suspendidos	43,420	mg/l

Tabla 21: Parámetros para el dimensionamiento hidráulico del humedal. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Cantidad	Unidad
Caudal máximo diario	85,00	m <sup>3</sup> /día
Conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo	3000,00	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·día
Sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo	19,84	m <sup>2</sup>
Gradiente hidráulico	0,01	m/m
Factor de seguridad	7,00	
Profundidad del humedal	0,30	m
Ancho del humedal	66,00	m
Largo del humedal	23,00	m
Tiempo de retención	5,40	día
Porosidad	30,00	%
Superficie del humedal	1500,00	m <sup>2</sup>
Caudal medio diario	25,00	m <sup>3</sup> /día

Tabla 22: Parámetros para la determinación de vida útil del humedal. Fuente: elaboración propia

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Caudal influente	25,00	m <sup>3</sup> /día
Superficie del humedal	1500,00	m <sup>2</sup>
Carga hidráulica superficial	1,67	cm/día
Concentración de sólidos en suspensión en el efluente	7,07	mg/l
Concentración de sólidos en suspensión en el influente	65,70	mg/l
Sólidos filtrados por el humedal	0,06	kg/l
Acumulación anual de sólidos	534,98	kg/año
Sólidos solubles volátiles	374,49	kg/año
Sólidos solubles no volátiles	160,50	kg/año
Porcentaje de sólidos volátiles retenidos por el humedal	50,00	%
Acumulación real anual de sólidos	374,74	kg/año
Porosidad del sustrato	30,00	%
Profundidad del humedal	0,30	m
Densidad del sólido en condiciones húmedas	1200,00	kg/m <sup>3</sup>
Capacidad del humedal para retener sólidos	162000,00	kg
Retención de sólidos secos	16200,00	kg
Porcentaje de retención de sólido secos	10,00	%
Vida útil del humedal	46,58	años
Rendimiento del humedal	89,24	%

## **6 Análisis de los beneficios ambientales de su implantación**

Los humedales para el tratamiento de aguas residuales han mostrado ser efectivos en el mejoramiento de la calidad del agua. Estos humedales son tecnologías de tratamiento naturales que tratan eficientemente una gran variedad de tipos de aguas contaminadas.

En comparación con otros sistemas de tratamiento de aguas los humedales nos ofrecen ventajas como un consumo energético nulo, una integración ambiental excelente permitiéndonos sustituir infraestructuras con un alto impacto visual por elementos con menor impacto paisajístico. También nos ofrece una explotación más simple y fácil al igual que el mantenimiento de estos y por último una disminución de olores en comparación a los sistemas convencionales.

Al tratarse de sistemas muy simples se podría brindar al municipio la oportunidad de auto gestionar las operaciones de mantenimiento y seguimiento para así ahorrar el coste que conlleva mantener el sistema de tratamiento de aguas actual. También se conseguiría una mayor concienciación ambiental por parte del municipio y se podría dar algún aprovechamiento al agua y los fangos generados en beneficio de los habitantes para así generar un mayor interés en el mantenimiento del humedal.

Además, el agua tratada se podría almacenar en elementos como charcas de anfibios para acercar más a la población, crear otro espacio de interés en el municipio y tener un complemento a los medios de extinción de incendios. Esta zona, podría ser de gran interés, ya que proporcionaría un hábitat para una gran diversidad tanto de aves como anfibios, esto supondría una mejora de la biodiversidad de la zona. Con la aparición de esta biodiversidad, se podría aprovechar también como un espacio didáctico para la educación ambiental ya sea mediante colocación de carteles didácticos o realización de charlas informativas para grupos.

## **7 Conclusiones**

Como se ha visto en el presente estudio, los sistemas de depuración de aguas residuales basados en la utilización de humedales artificiales cubren las necesidades del tratamiento de las aguas en pequeños municipios, dándole solución al problema la contaminación de las aguas. También se minimizan los impactos ambientales generados por infraestructuras más complejas y costosas.

Al ser sistemas con una gran facilidad de diseño mantenimiento y operación permite su uso en entornos rurales, además, la baja producción de lodos, la ausencia de consumo energético y reactivos químicos invitan a plantear su uso en aquellas localidades donde no se necesiten métodos tan amplios o sofisticados.

Por tanto, a partir del diseño propuesto, que incluye una propuesta para su ubicación y sus principales características constructivas, queda demostrado que implementando este sistema de depuración se cumpliría con los requisitos de reducción de contaminantes establecidos por la legislación, resultando una opción viable y ambientalmente más amigable frente al sistema existente. Además, este sistema podría resultar en un espacio aprovechable para otros fines, como la educación ambiental.

Por todo ello, se anima al municipio a tener en cuenta este tipo de proyectos para el futuro.

## 8 Bibliografía

**Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunitat Valenciana (EPSAR). Generalitat Valenciana.** Recuperado el 1 de octubre de 2021, a partir de: <https://www.epsar.gva.es/areas/gestion-de-instalaciones>

García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial.

Hernandez-Crespo, C., Oliver, N., Bixquert, J., Gargallo, S., & Martín, M. (2016). Comparison of three plants in a 41áter41e 41áte constructed wetland treating eutrophic 41áter in a Mediterranean climate. *Hydrobiologia*, 774(1), 183-192.

**Instituto Valenciano de investigaciones agrarias (2019).** Recuperado el 16 de noviembre de 2021, a partir de: <http://riegos.ivia.es/listado-de-estaciones/xativa>

Kadlec, R., Knight, R.,. 1995. *Treatment Wetlands*. [ed.] Boca Ratón. Lewis. 1995

Montxo Vicente i Sempere. Recuperado el 20 de noviembre de 2021.

Nagabhatla, N., & Metcalfe, C. D. (Eds.). (2017). *Multifunctional wetlands: pollution abatement and other ecological services from natural and constructed wetlands*. Springer.

Ramsar, C. (1971). Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas. *Ramsar*, 2, 1971.

Salas, J. J., Pidre, J. R., & Sánchez, L. (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales*. Capítulo V: Filtros de Turba, 69.

Seoanez Calvo, M., & Gutiérrez de Ojesto, A. (1999). *Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales* (No. 363.7284 S478ag). Madrid, ES: Mundi-Prensa.

Vera-Puerto, I. L., Arias, C. A., Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., & von Sperling, M. *HUMEDALES PARA TRATAMIENTO*.