

**UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES**

**GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**



**DIMENSIONADO DE UNA INFRAESTRUCTURA VERDE  
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES  
PROVENIENTES DEL POLIDEPORTIVO DEL CAMPUS DE  
ELCHE**

TRABAJO FIN DE GRADO

JUNIO 2022

CÓDIGO OIR: TFG.GCA.IMP.APH.220531

**AUTOR**

ADRIÁN PASTOR HEREDIA

**TUTORES**

IGNACIO MELÉNDEZ PASTOR. *DPTO. AGROQUÍMICA Y MEDIO AMBIENTE*

RAMÓN PERAL ORTS. *DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA Y ENERGÍA*

***Dimensionado de una infraestructura verde para el tratamiento de aguas grises provenientes del polideportivo del campus de Elche.***

**Resumen:** El aumento de la impermeabilización del suelo en núcleos urbanos y la escasez de recursos hídricos en el sudeste español, despierta una mayor necesidad para la gestión de estos. El uso de infraestructuras verdes se ven necesarias para contrarrestar estos problemas y abaratar las consecuencias producidas por escorrentías y tratamientos de agua en las depuradoras.

En este estudio se plantea la construcción de un muro verde para el tratamiento de aguas grises en la parte sur del Centro de Investigación del Deporte del Campus de la UMH en Elche. Este tipo de infraestructura verde es una interesante solución para mejorar el control del ciclo del agua en entornos urbanos, dado que permite depurar las aguas residuales, a la par de aportar otros beneficios como una mejora de la calidad paisajística y la creación de hábitats en entornos urbanos.

**Palabras clave:** Muro verde, humedal artificial, tratamiento de aguas y aguas grises

---

***Dimensioning of a green infrastructure for greywaters treatment from the Elche Campus sports center of.***

**Abstract:** The increase in soil impermeability in urban centers and the scarcity of water resources in south-eastern Spain has led to a greater need for water management. The use of green infrastructures is necessary to counteract these problems and reduce the consequences produced by runoff and water treatment in wastewater treatment plants.

This study proposes the construction of a green wall for the treatment of grey water in the southern part of the Sports Research Centre of the UMH Campus in Elche. This type of green infrastructure is an interesting solution to improve the control of the water cycle in urban environments, given that it allows wastewater to be treated, while also providing other benefits

**Key words:** Greenwall, constructed wetlands, water treatment and graywater

## **Agradecimientos**

Al Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente por facilitar los medios necesarios para desarrollar este trabajo de investigación.

Al Vicerrectorado de Infraestructuras, por facilitar datos de generación de aguas grises que han permitido desarrollar el dimensionado de la infraestructura verde.

Al Dr. Ignacio Meléndez Pastor por su paciencia y ayuda durante la realización del trabajo.

Al Dr. Ramón Peral Orts por su ayuda para conceptualizar el diseño y la viabilidad de la infraestructura verde.

A Alejandro Marín por las innumerables horas de discusión técnica de la implementación de la infraestructura verde.

A mis compañeros que me han acompañado durante estos 4 años.

Y, sobre todo, a mi familia por su confianza puesta en mi desde siempre.



## Índice

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>- 5 -</b>
<b>2.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>- 7 -</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>- 8 -</b>
3.1.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	- 9 -
3.2.	CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE Y OBJETIVOS DE TRATAMIENTO	- 12 -
3.3.	CLIMA DEL ÁREA DE ESTUDIO	- 13 -
3.4.	INFRAESTRUCTURA PROPUESTA	- 14 -
3.5.	DIMENSIONADO DEL MURO VERDE	- 14 -
3.5.1.	Cálculo eliminación DBO <sub>5</sub>	- 15 -
3.5.2.	Cálculo de eliminación de sólidos en suspensión	- 16 -
3.5.3.	Cálculo de eliminación de Nitrógeno	- 17 -
3.5.3.1.	Cálculo para el proceso de nitrificación.	- 18 -
3.5.3.2.	Cálculo para proceso de desnitrificación	- 19 -
3.5.3.3.	Cálculo de eliminación de nitrógeno total (NT)	- 20 -
3.6.	SUSTRATO DE RELLENO	- 21 -
3.7.	VEGETACIÓN	- 21 -
3.8.	SEGUIMIENTO Y MANTENIMIENTO POSTERIOR	- 22 -
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>- 23 -</b>
4.1.	DIMENSIONADO DE ELIMINACIÓN DE DBO <sub>5</sub>	- 23 -
4.2.	DIMENSIONADO PARA EL PROCESO DE NITRIFICACIÓN	- 24 -
4.3.	DIMENSIONADO PARA EL PROCESO DE DESNITRIFICACIÓN	- 25 -
4.4.	DIMENSIONADO DE LA ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL	- 26 -
4.5.	REAJUSTE DEL DIMENSIONADO DE ELIMINACIÓN DE DBO <sub>5</sub>	- 26 -
4.6.	DIMENSIONADO DE ELIMINACIÓN DE SS	- 27 -
4.7.	DIMENSIONADO HIDRÁULICO	- 27 -
4.8.	DIMENSIONADO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL	- 28 -
4.9.	DISEÑO PROPUESTO	- 28 -
4.9.1.	Muro verde	- 28 -
4.9.2.	Cuerpo de agua	- 31 -
<b>5.</b>	<b>PRESUPUESTO</b>	<b>- 35 -</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>- 37 -</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>- 38 -</b>

## 1. Introducción

La limitada disponibilidad de recursos hídrico y su degradación mediante procesos de contaminación es uno de los mayores problemas ambientales a nivel mundial. La causa más importante de contaminación del agua es la falta de gestión y de tratamientos adecuados de los vertidos, tal y como declaró la ONU en el Decenio Internacional para la Acción: “El agua, fuente de vida” (Water for Life Decade, 2014)

En este sentido, existe consenso en que la gestión convencional del recurso hídrico en zonas urbanas no ha tenido la capacidad para enfrentar los retos claves de las ciudades en crecimiento, como, por ejemplo, la creciente competencia por el agua, el manejo de aguas residuales, el saneamiento, así como también, la protección del recurso hídrico (GWP, 2011).

Uno de los grandes problemas de la gestión de ciclo del agua en entornos urbanos viene motivado por la destrucción del ciclo natural del agua debida a la presencia masiva de superficies artificiales (i.e., cemento, asfalto, cubiertas de edificios, ...). La impermeabilización del suelo incrementa los volúmenes y caudales de escorrentía y, a su vez, disminuye los tiempos de concentración. El aumento de la escorrentía potencia la generación de riadas e inundaciones en zonas urbanas (MITECO, 2019), comprometiendo el funcionamiento de los actuales sistemas de drenaje urbano.

Para gestionar los recursos hídricos en los núcleos urbanos se tiene como objetivo usar las infraestructuras verdes, que son una red estratégicamente planificada de zonas naturales y seminaturales de alta calidad con otros elementos medioambientales, diseñada y gestionada para proporcionar un amplio abanico de servicios ecosistémicos y proteger la biodiversidad tanto de los asentamientos rurales como urbanos (Comisión Europea, 2014).

Estas infraestructuras verdes han de contribuir a impulsar el desarrollo de sistemas urbanos de drenaje sostenible (MITECO, 2019), mediante la implementación de elementos tales como trampas de gruesos, pavimentos permeables, cunetas, drenes y bandas filtrantes, tejados y muros verdes, tanques de lluvia, cuencas de sedimentación, cuencas de biorretención o humedales artificiales (Goodnetilleke y Lampard, 2019).

De todo el conjunto de infraestructuras verdes para mejora de la gestión del ciclo del agua en entorno urbano, este trabajo focaliza su atención en los denominados muros verdes (en inglés *green walls*). Los muros verdes (a veces también denominadas paredes

verdes) se definen como muros o estructuras de soporte de vegetación, integradas en las fachadas de los edificios (Jamei y Tapper, 2019).

Son sistemas que ayudan a mitigar el efecto de isla de calor urbana, mejorando el aislamiento de los edificios, y disminuyendo la escorrentía cuando se conectan a las canalizaciones de las cubiertas de los edificios. Estos muros aprovechan el agua de lluvia para soportar el crecimiento de las plantas, pero además existe un creciente interés por que sean capaces de aprovechar el agua y nutrientes de las aguas grises, contribuyendo a disminuir la carga contaminante que se vierte a los sistemas de drenaje urbanos. Este tipo de infraestructura verde cubre una amplia gama de opciones para integrarse en las paredes y techos de los edificios en zonas urbanas (Hobban, 2019).

El objetivo de este trabajo es la propuesta y dimensionado de un muro verde asociado al edificio del Centro de Investigación del Deporte del Campus de la UMH en Elche, que sea capaz de depurar las aguas grises generadas en las instalaciones del Palacio de los Deportes de la UMH, con la finalidad de fomentar la implementación de infraestructuras verdes en los campus de la UMH, reduciendo la cantidad de carga contaminante que se vierte desde el campus al sistema de alcantarillado, y mejorando el valor cultural y paisajístico de una parte del campus gracias a la multifuncionalidad intrínseca de las infraestructuras verdes.

## **2. Justificación y objetivos**

El régimen hídrico del sudeste español, caracterizado por su aridez y falta de precipitaciones despierta la necesidad de mejorar la eficiencia en la gestión de los recursos hídricos, con el fin de evitar el desperdicio de agua y mejorar su aprovechamiento.

Una forma de abordar este tema es mediante infraestructuras verdes que mejoren dicha eficiencia de recursos hídricos en las instalaciones. Estas infraestructuras deben tener un impulso a nivel urbano, debido a sus numerosas mejoras del ciclo de las aguas. Estas pueden presentar diversas ventajas como prevenir inundaciones, disminuir el efecto de islas de calor, aumentar la biodiversidad en zonas urbanas e incluso realizar el tratamiento de aguas residuales.

Como es el caso de este trabajo, que se centra en los muros verdes, que tienen como función introducir zonas con mayor vegetación. Si a esto se le añade la función de los humedales, estos sistemas realizarían a su vez tratamiento de aguas.

El objetivo es tratar las aguas grises, procedentes del Palacio de Deportes del campus de la Universidad Miguel Hernández en Elche, mediante un muro verde, con función de humedal de flujo subsuperficial horizontal. Posteriormente, se almacenarán en un humedal artificial de flujo libre. El agua tratada sufrirá una recirculación interna para evitar que, en los meses de menos actividad del polideportivo, el sistema sufra un déficit hídrico y así seguir con su funcionamiento normal.

Con este sistema se conseguirá una zona verde que tenga un sistema hidráulico en constante movimiento, además de tener la vegetación necesaria para el tratamiento.

### 3. Materiales y métodos

El trabajo realizado es un estudio técnico con la finalidad de promover la implantación de un muro verde entre el Edificio Altet y el Centro de Investigación del Deporte.

La ubicación propuesta está situada al sur del Centro de Investigación del Deporte (Figura 1), donde existe en la actualidad un talud no ajardinado y sometido a intensos procesos de erosión, tanto por lluvia como por el paso de personas, y que a la larga podría afectar a la superficie cementada que circunda el citado edificio.



*Figura 1: Vista aérea del Centro de Investigación del Deporte en el campus de Elche. Sombreado en azul se muestra la ubicación y extensión aproximada del muro verde propuesto. Fuente: imagen aérea obtenida de Google Earth.*

La determinación de la ubicación propuesta se basó en un estudio previo para seleccionar la zona y se eligió esta por su cercanía al edificio de donde provienen las aguas grises, y su localización céntrica y visible de la infraestructura. Luego de este primer visualizado se obtuvo el caudal de aguas grises del polideportivo del Campus de Elche gracias al Vicerrectorado de Infraestructuras. Por último, se han realizado los cálculos para el dimensionado de los humedales artificiales.

La instalación del muro verde está pensada para que tenga la mayor integración paisajística posible. Creando así un espacio verde conformado por unas escaleras, formando un nuevo acceso al edificio de deporte. A los lados se encontrarán los muros

verdes con función de humedal artificial en forma escalonada y delante de esta estructura se hallará el humedal artificial superficial que hará a su vez de depósito de agua.

### **3.1. Principio de funcionamiento**

Este proyecto se fundamenta en adoptar una infraestructura verde de tipo muro/pared verde desde el punto de vista estético, pero que sirva para contener el talud sur del edificio del Centro de Investigación de Deporte, y además tenga la capacidad de depuración de los humedales artificiales (en inglés *constructed wetlands*) para tratar las aguas grises generadas en el Palacio de Deportes. En este apartado se presentan las características fundamentales de los humedales artificiales y principales tipologías.

Los humedales artificiales son sistemas de depuración en los que se reproducen los procesos de eliminación de contaminantes que tienen lugar en las zonas húmedas naturales (Salas *et al*, 2007). Cabe recordar que los humedales naturales según el Artículo 1.1. de la Convención Ramsar (UNESCO, 1971) son: “*extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros*”.

Los humedales artificiales intentan reproducir los mecanismos de depuración de los humedales naturales, siendo los principales mecanismos de depuración físicos, químicos y biológicos los siguientes (CE, 2001):

- a. Mecanismos físicos:
  - a. Filtración a través de medios porosos y de sistemas de raíces.
  - b. Sedimentación de materia en suspensión y coloides.
- b. Mecanismos químicos:
  - a. Descomposición por fenómenos de oxidación, de radiación ultravioleta y de reducción.
  - b. Precipitación de compuestos insolubles o coprecipitación con compuestos insolubles (N y P)
  - c. Adsorción sobre el sustrato (N y P)
- c. Mecanismos biológicos:
  - a. Degradación de la materia orgánica
  - b. Nitrificación en zona aeróbica

- c. Desnitrificación en zona anaeróbica
- d. Consumo de materia orgánica y nutrientes por el crecimiento bacteriano.

Hay diferentes tipos de humedales artificiales, estos se han clasificado en dos tipos dependiendo de la circulación del agua en ellos (MMAMRM, 2010):

- Humedales Artificiales de Flujo Superficial o Flujo Libre (HAFS)
- Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFS)

El primer tipo de humedal (Figura 2) es el más parecido a los humedales naturales. En estos sistemas el agua está en contacto directo con la atmósfera y circula a través de la vegetación y sobre un sustrato. Estos humedales tienen una profundidad entre 0,3 y 0,4 m. Por su parecido a los humedales naturales, este tipo de sistema atrae una amplia biodiversidad. El agua que fluye en el humedal superficial se produce un tratamiento gracias a los procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, adsorción y precipitación (Kadlec y Wallace, 2009). Las principales desventajas de este tipo es el gran requerimiento de superficie para la eliminación de diversos parámetros, sobre todo si es para eliminar fósforo y nitrógeno, y la posible aparición de mosquitos u otros insectos (USEPA, 2000)

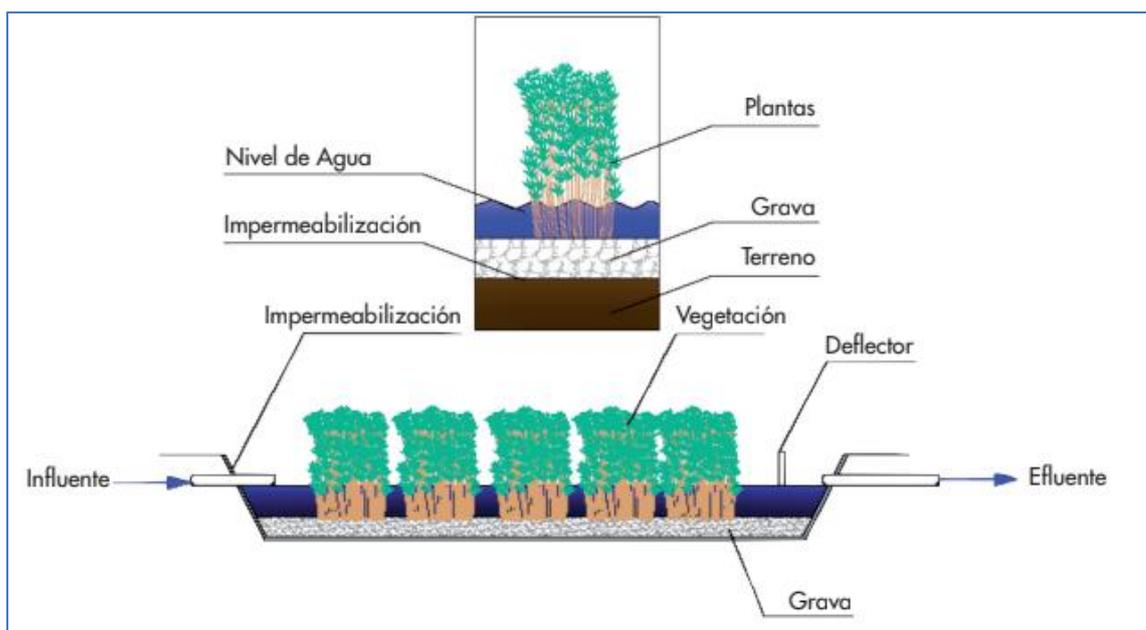


Figura 2: Corte transversal y longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Superficial. Fuente: MMAMRM, 2010.

En los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (Figura 3) se emplea un lecho de suelo o de grava como sustrato para el crecimiento de las plantas emergentes. El agua circula por la gravedad y entra en contacto con los macrófitos (Kadlec, 2009). El principal problema de estos humedales es la colmatación del sustrato, lo que produce una reducción en el aporte de oxígeno (Langergraber, 2003).

Dentro de los HAFSs hay 2 tipos: de flujo horizontal y de flujo vertical.

En los humedales de flujo horizontal (Figura 3) la alimentación se realiza de manera continua o de forma intermitente, si fuera necesario bombear las aguas residuales (Vymazal y Kröpfelová, 2008). Además, la superficie del fondo tiene una pendiente entre el 0,5 y el 1%. El agua tiene una profundidad entre 0,4 y 0,6 m

En los humedales de flujo vertical (Figura 3) se recibe el agua a través de la superficie y se va infiltrando hasta ser recogida en el fondo (García y Corzo, 2008). Como ocurre con los humedales de flujo horizontal su principal problema es la colmatación del sustrato (Langergraber, 2003).

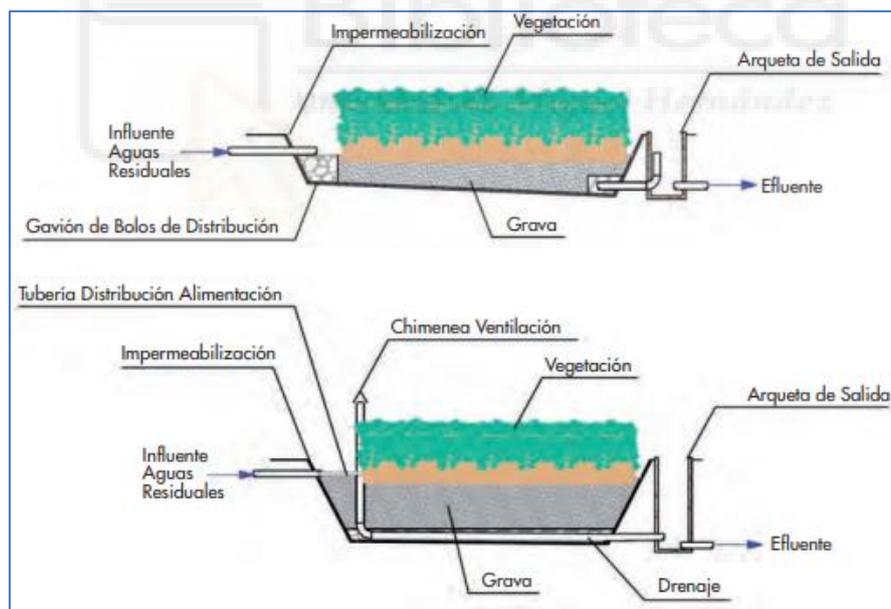


Figura 3: Cortes longitudinales de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal y Vertical. Fuente: MMAMRM, 2010.

### 3.2. Características del efluente y objetivos de tratamiento

Las aguas grises consideradas en este proyecto son las provenientes de duchas, bañeras y lavabos del Palacio de Deportes de la UMH. El Vicerrectorado de Infraestructuras proporcionó el dato de caudal anual de aguas grises que se generan en los vestuarios, siendo un total de 1650 m<sup>3</sup>/año, habiéndose dimensionado la infraestructura verde para una caudal anual 2600 m<sup>3</sup> en previsión de posibles incrementos de la generación de aguas grises en este u otro edificio próximo, por lo que el caudal diario es de 7,19 m<sup>3</sup>/d.

Ante la imposibilidad de realizar un completo estudio multitemporal de parámetros contaminantes de las aguas grises generadas, se optó por desarrollar el dimensionado de la infraestructura verde en base a valores convencionales de calidad de aguas grises. Las concentraciones iniciales (Tabla 1) de los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO<sub>5</sub>), sólidos en suspensión (SS), nitrógeno total (NT) y amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), extraídos de diversas fuentes bibliográficas y que son utilizados para el dimensionado de la infraestructura verde.

Tabla 1: Características de aguas grises conforme a diferentes fuentes bibliográficas.

Parámetro	Concentración (mg/l)	Fuente
DBO <sub>5</sub>	170	ESF (2008)
SS	190	ESF (2008)
NT	12	ESF (2008)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	5,3	Ysún-Barrio (2009)

El objetivo del tratamiento es obtener un agua que posea unos valores que estén por debajo de los valores límites (Tabla 2) que están descritos en el Artículo 42 del Ciclo de planificación hidrológica 2022 – 2027 de la Cuenca Hidrográfica del Júcar.

Tabla 2: Concentración final objetivo del efluente (MITECO, 2022)

PARÁMETROS	CONCETRACIÓN (mg/l)
DBO <sub>5</sub>	25
SS	60
NT	15

### 3.3. Clima del área de estudio

Para realizar un correcto dimensionado es muy importante conocer el clima de la zona, esto es debido a que las precipitaciones anuales y las temperaturas podrían alterar el rendimiento de la infraestructura verde.

El clima del sudeste español constituye el clima más seco de toda Europa, con unas temperaturas medias que se encuentran entre 15,5 y 19°C. La pluviometría es escasa quedando por debajo de 350 mm/año y en algunas zonas específicas no se alcanzan los 200 mm/año. Hay un periodo sequía en los meses de verano y un régimen de lluvias torrenciales (Gómez-Zotano *et al*, 2015).

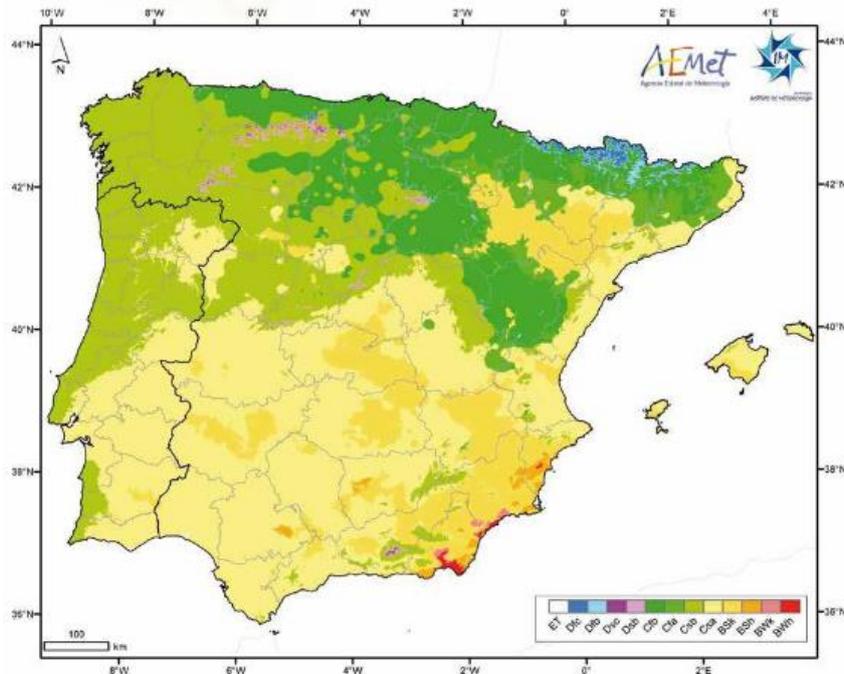


Figura 4: Clasificación climática de Köppe-Geiger de la Península Ibérica e Islas Baleares.

Como se observa en la figura 4, el clima de Elche (sureste peninsular) es mediterráneo semiárido con veranos calurosos y secos e inviernos suaves. Las temperaturas oscilan entre los 6°C y los 31°C. Las precipitaciones son escasas (260 mm/año) y se concentran en otoño y primavera, y estas suelen caer de forma torrencial (MAPA; 2022).

La temperatura usada para el dimensionado es la temperatura media del mes más frío, siendo esta la correspondiente al mes de enero, con un valor medio de 10,2°C.

### 3.4. Infraestructura propuesta

La infraestructura propuesta es una serie de muros verdes posicionados de forma escalonada a ambos lados de unas escaleras (no existentes en la actualidad, pero que facilitarían el tránsito de peatones a través de la propia infraestructura verde, integrando está en el día a día de las personas que circulan por el campus) para acceder al Centro de Investigación del Deporte. Las aguas grises del polideportivo pasaran por un desengrasador-desarenador, donde se eliminarán las grasas y parte de los sólidos que lleve el agua, y por un tanque de homogeneización que permitirá una mejor regulación del caudal y carga contaminante a ser tratada en el muro verde.

A estos muros les llegarán las aguas grises pretratadas y transcurrirán a lo largo de todo el recorrido determinado. Estas atravesarán el sustrato de relleno y la vegetación escogida produciéndose así el tratamiento de depuración de las aguas grises.

Luego de pasar toda la infraestructura verde, las aguas tratadas llegaran a un humedal artificial superficial, a modo de pequeña laguna que aporte valor estético y funcionalidad a la infraestructura verde. Para mantener el caudal necesario durante todo el año se hará una recirculación interna desde el final del humedal de flujo libre a la cabecera del muro verde. De esta forma conseguiremos que, en los meses de menos uso de los vestuarios, el muro verde este provisto del caudal necesario para su funcionamiento, además de poder utilizar el propio muro verde para depurar cíclicamente el agua del cuerpo de agua.

### 3.5. Dimensionado del muro verde

Para el dimensionado del muro verde se ha utilizado el **Método de Reed**. Este método se utiliza para el dimensionado de humedales artificiales, tanto superficiales como subsuperficiales. Considera a los humedales como reactores biológicos cuyo rendimiento se aproxima al descrito por la cinética de primer orden de un reactor de flujo pistón. Con

el método de Reed se puede dimensionar la eliminación de DBO<sub>5</sub>, sólidos en suspensión y diversas especies nitrogenadas, además del propio dimensionado hidráulico de la infraestructura que evite desbordamiento y garantice un adecuado tiempo de retención hidráulico (TRH) para el proceso de depuración requerido.

Para la eliminación de DBO<sub>5</sub> y de los compuestos nitrogenados se necesitan parámetros que están descritos en la Tabla 3, esta está conformada por la constante de reacción ( $K_T$ ) es la constante a una temperatura de 20 °C y el coeficiente de temperatura ( $\theta$ ).

Tabla 3: Valores para el dimensionamiento del humedal. Crites et al. (2014).

Contaminante a eliminar	Constante de reacción ( $K_T$ ) (d <sup>-1</sup> )	Coficiente de temperatura ( $\theta$ )
DBO <sub>5</sub>	1,1	1,06
NH <sub>4</sub>	$K_{NH}$	1,048
NO <sub>3</sub>	1	1,15

Todas las ecuaciones que se van a utilizar se encuentran en Crites *et al.* (2014).

### 3.5.1. Cálculo eliminación DBO<sub>5</sub>

La materia orgánica está presente en forma de materia en suspensión sedimentable. Esta irá decantando en los humedales (y tratamientos previos si existen) y experimentará procesos de degradación biológica. Igualmente, parte quedará retenida por filtración.

Sobre la materia orgánica disuelta, al igual que sobre la particulada, actúan los microorganismos (principalmente bacterias) que utilizan esta materia orgánica a modo de sustrato. Para calcular la superficie necesaria para eliminar la cantidad de DBO<sub>5</sub> propuesta se utiliza la ecuación número 1:

$$A_s = \frac{Q \cdot (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T \cdot D_m \cdot n} \quad (1)$$

Donde:

$A_s$  = Superficie del humedal ( $m^2$ )

$Q$  = Caudal de entrada ( $m^3/d$ ) = 7,19  $m^3/d$

$C_o$  = Concentración de DBO<sub>5</sub> del afluente = 170 mg/L

$C_e$  = Concentración de DBO<sub>5</sub> del efluente = 25 mg/L

$K_T$  = Constante de reacción ( $d^{-1}$ )

$D_m$  = Profundidad de diseño = 0,55m

$n$  = Porosidad del sustrato = 0,42

La temperatura del agua influye en la constante de reacción  $K_T$  conforme a la ecuación número 2:

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)} \quad (2)$$

Donde:

$K_T$  = Constante de reacción ( $d^{-1}$ )

$K_{20}$  = Constante de velocidad = 1,1  $d^{-1}$

$\theta$  = Coeficiente de temperatura = 1,06

$T$  = Temperatura media del mes más frío = 10,2°C.

El tiempo de retención hidráulica ( $TRH$ ) será calculado conforme a la ecuación número 3.

$$TRH = \frac{A_s * D_m * n}{Q} \quad (3)$$

Donde:

$Q$  = Caudal de entrada ( $m^3/d$ ) = 7,19  $m^3/d$

$D_m$  = Profundidad de diseño = 0,55m

$n$  = Porosidad del sustrato = 0,42

### 3.5.2. Cálculo de eliminación de sólidos en suspensión

La eliminación de la materia en suspensión tiene lugar, principalmente, por fenómenos de filtración. Esta retención de la materia en suspensión se da por tres motivos: la baja velocidad del agua, las fuerzas de adhesión entre partículas y las constricciones

del flujo producidas tanto por el medio granular como por el entramado de raíces y rizomas (Cooper *et al.*, 1996).

Los Humedales de Flujo Subsuperficial bien diseñados son muy eficientes para eliminar sólidos en suspensión. Los valores habituales de eliminación se encuentran en el intervalo 85-95% (Cooper *et al.*, 1996).

Para calcular la concentración de sólidos en suspensión se utiliza la ecuación número 4:

$$C_e = C_o[0,1058 + 0,0011 * HLR] \quad (4)$$

Donde:

$C_o$  = Concentración de SS del afluente = 190 mg/L

$C_e$  = Concentración de SS del efluente

$HLR$  = Tasa de Carga Hidráulica (m/d) o *Hydraulic Loading Rate (HLR)*

La Tasa de Carga Hidráulica ( $HLR$ ) se obtiene con la ecuación 5:

$$HLR = \frac{Q}{A_s} \quad (5)$$

Donde:

$Q$  = Caudal diario = 7,19 m<sup>3</sup>/d

$A_s$  = Área superficial (m<sup>2</sup>)

### 3.5.3. Cálculo de eliminación de Nitrógeno

En las aguas residuales urbanas recientes el nitrógeno puede encontrarse principalmente en forma orgánica y en forma amoniacal, y en mucha menor cuantía como nitritos o nitratos.

En los Humedales Artificiales la eliminación del nitrógeno en forma amoniacal transcurre básicamente por dos vías principales:

- Asimilación por las propias plantas del humedal.
- Procesos de nitrificación-desnitrificación.

En el caso de la asimilación del nitrógeno amoniacal por las plantas del humedal no se llega a eliminar más allá del 15-20% del nitrógeno amoniacal presente en las aguas a tratar (Sánchez, 2013).

La principal vía de eliminación del nitrógeno amoniacal en los Humedales Artificiales transcurre mediante procesos combinados de nitrificación-desnitrificación.

El proceso se desarrolla en dos etapas; en un primer momento bacterias del género *Nitrosomas* oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrógeno nitroso, de acuerdo con la reacción:



Posteriormente, bacterias del género *Nitrobacter* oxidan las formas nitrosas a formas nítricas, de acuerdo con:



### 3.5.3.1. Cálculo para el proceso de nitrificación.

Para calcular la superficie necesaria para la eliminación propuesta para el amonio se utiliza la ecuación número 6:

$$A_s = \frac{Q \cdot (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T \cdot D_m \cdot n} \quad (6)$$

En este caso los valores serían:

$A_s$  = Superficie del humedal ( $\text{m}^2$ )

$Q$  = Caudal de entrada = 7,19  $\text{m}^3/\text{d}$

$C_o$  = Concentración de  $\text{NH}_4$  del afluente = 5,3 mg/L

$C_e$  = Concentración de  $\text{NH}_4$  del efluente (mg/L)

$K_T$  = Constante de reacción ( $\text{d}^{-1}$ )

$D_m$  = Profundidad de diseño = 0,55 m

$n$  = Porosidad del sustrato = 0,42

Antes de calcular la constante de reacción ( $K_T$ ), primero hay que obtener el valor de la constante de reacción del amonio  $K_{NH}$  con la ecuación número 7.

$$K_{NH} = 0,01854 + 0,3922 (r_z)^{2,6077} \quad (7)$$

Donde:

$$r_z = \text{Profundidad ocupada por la raíz} = 0,5$$

Una vez calculado el valor de  $K_{NH}$ , se procede a hacer lo mismo con la constante de reacción ( $K_T$ ) en la ecuación 8:

$$K_T = K_{NH} * \theta^{(T-20)} \quad (8)$$

En este caso los valores son:

$$K_{NH} = \text{Constante de reacción de NH}_4 \text{ (d}^{-1}\text{)}$$

$$\theta = \text{Coeficiente de temperatura} = 1,048$$

$$T = \text{Temperatura media del mes más frío} = 10,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

### 3.5.3.2. Cálculo para proceso de desnitrificación

Para la concentración inicial de la desnitrificación se utiliza el amonio eliminado en la nitrificación. En este caso sería 1,3 mg/l como la concentración inicial.

Para conocer la concentración final de la desnitrificación se utiliza la ecuación número 9:

$$NO_{3f} = \exp(-K_T * TRH) * NO_{3o} \quad (9)$$

Donde:

$$NO_{3f} = \text{Concentración final de nitratos en la desnitrificación (mg/l)}$$

$$NO_{3o} = \text{Concentración inicial de nitratos en la desnitrificación} = 1,3 \text{ mg/l}$$

$$K_T = \text{Constante de temperatura} = 1 \text{ d}^{-1}$$

$$TRH = \text{Tiempo de Retención Hidráulico (d)}$$

En este caso utilizaremos la superficie obtenida en la nitrificación para calcular la concentración final al terminar el proceso de la desnitrificación. Para ello, se usará la ecuación número 10.

$$As = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{Ce}{Co}\right)}{K_T \cdot Dm \cdot n} \quad (10)$$

Donde:

$Q$  = Caudal diario = 7,19 m<sup>3</sup>/d

$Ce$  = Concentración final de la desnitrificación (mg/l)

$Co$  = Concentración inicial de la desnitrificación = 1,3 mg/l

$K_T$  = Constante de temperatura (d<sup>-1</sup>)

$Dm$  = Profundidad de diseño = 0,55m

$n$  = Porosidad = 0,42

Para calcular la constante de reacción ( $K_T$ ) en esta fase hay que hacer uso de la ecuación número 11:

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)} \quad (11)$$

$K_{20}$  = Constante de reacción = 1 d<sup>-1</sup>

$\theta$  = Coeficiente de temperatura = 1,15

$T$  = Temperatura media del mes más frío = 10,2 °C

### 3.5.3.3. Cálculo de eliminación de nitrógeno total (NT)

El Nitrógeno total se utiliza la diferencia entre el amonio previo a la nitrificación y el amonio al acabar la desnitrificación. Esa diferencia es la cantidad de amonio eliminado durante el paso del agua por el muro verde.

Luego se resta esta diferencia a la concentración inicial del nitrógeno total, conforme se especifica en la ecuación número 12:

$$NT_f = NT_o - \Delta NH_4 \quad (12)$$

Utilizando la eliminación de las formas nitrogenadas, producida en la desnitrificación y en la nitrificación, es posible determinar empíricamente la cantidad de nitrógeno eliminado en el humedal artificial.

### 3.6. Sustrato de relleno

En la mayoría de las ocasiones se han utilizado grava, arena o suelos de la zona para proporcionar el sustrato de los humedales artificiales. En este caso, se ha realizado un cambio en el sustrato, y se ha introducido la economía circular para la obtención de este sustrato.

El sustrato en cuestión es un vidrio granulado multicolor, proporcionado por la empresa Camacho Recycling. Esta empresa distribuye los restos de vidrio que no son empleados por las empresas para darle una segunda vida.

El sustrato es un vidrio sódico-cálcico que tiene una dureza de 6-7 Mohs, un peso específico de 2,60 g/cm<sup>3</sup> y un tamaño de malla entre 4 y 8 mm.

Al no disponer de la conductividad hidráulica ni la porosidad del sustrato, se procedió a la búsqueda bibliográfica de parámetros físicos e hidráulicos de vidrio reciclado. Los valores de estos parámetros utilizados son (Mohsenian Hadad Amlashi et al, 2020):

- Conductividad hidráulica =  $4,4^{-2}$  m/s = 3801,6 m/d.
- Porosidad = 0,42

### 3.7. Vegetación

El mayor beneficio que aportan las plantas es la transferencia de oxígeno a las raíces desde las hojas. Además, las raíces proporcionan una mayor aireación en el sustrato. Las hojas y tallos muertos que se encuentran sumergidos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que se usa como sustrato para el crecimiento del microfilm (responsable de la gran parte del tratamiento (Ramírez y Rodríguez, 2020)

La contribución de las plantas emergentes al tratamiento ocurre de formas diferentes (Ramírez y Rodríguez, 2020):

- Estabilizar el sustrato y limitar la canalización del sustrato.
- Velocidades bajas que permiten que los sólidos en suspensión se depositen.
- Toman el carbono, los nutrientes y los elementos traza para incorporarlos a la planta.
- Transfieren los gases entre el sustrato y la atmósfera.
- El sistema de raíces da lugar a zonas para la fijación de microorganismos.

Las principales especies que se usan en los humedales artificiales de flujo subsuperficial son: juncos (*Scirpus sp.*), carrizo (*Phragmites comunis*) y enea (*Typha domingensis.*).

En este caso se utilizará la enea como especie vegetal, debido a su adaptación al crecimiento en sustratos de porosidad variada, resistencia a la presencia de elevadas cargas contaminantes y crecimiento más controlado que el carrizo, que tiene a colonizar de forma masiva el sustrato pudiendo afectar a su estructura fundamental.

### **3.8. Seguimiento y mantenimiento posterior**

El muro verde va a requerir mantenimiento a lo largo de su vida útil, el cual se debe tener en cuenta antes de su construcción. También han de tenerse en consideración los productos adecuados para su mantenimiento y la planificación horaria de las actividades de mantenimiento.

El conjunto de acciones que normalmente se realizan en el mantenimiento de un tejado verde son las siguientes:

- Poda de las plantas del muro verde y la gestión de los residuos generados por esta.
- Eliminación de malas hierbas de manera manual (preferentemente) o mediante la aplicación de herbicidas.
- Limpieza de los drenajes, filtros, límites del muro verde, caminos, etcétera.
- Revisión del estado de todas las partes del muro verde.

Además, en el humedal artificial de flujo libre se establecerán una serie de sensores que tomarán valores de la conductividad, pH y las concentraciones de SS, DBO,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . Con estos parámetros se puede evaluar el rendimiento del tratamiento o, en el caso de que haya, detectar problemas en el sistema.

## 4. Resultados

Para los resultados se han utilizado las ecuaciones descritas en el apartado 3.5.

Primero se ha calculado la superficie necesaria para el tratamiento de cada parámetro. Luego se utilizará la más grande para así cubrir todas las demandas de eliminación propuestas. Una vez se tenga clara la superficie del muro verde, se calculará la concentración del efluente tanto de SS, como del parámetro que sufra la modificación de superficie.

Una vez se tenga las concentraciones finales y la superficie, se calculará el dimensionado hidráulico y el del humedal de flujo libre.

### 4.1. Dimensionado de eliminación de DBO<sub>5</sub>

Lo primero que se realiza es el cálculo de  $K_T$  de DBO<sub>5</sub> con la ecuación 2:

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)}$$

$$K_T = 1,1 * (1,06)^{(10,2-20)}$$

$$K_T = 0,621 \text{ d}^{-1}$$

Para obtener cual es la superficie necesaria para el tratamiento de la DBO<sub>5</sub> se utiliza la ecuación 1:

$$As = \frac{Q * (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * D_m * n}$$

$$As = \frac{7,19 * (\ln 170 - \ln 25)}{0,621 * 0,55 * 0,42}$$

$$As = 96 \text{ m}^2$$

Para calcular el tiempo de retención hidráulico que tendría el muro verde con esta superficie determinada para el tratamiento de DBO<sub>5</sub> se utiliza la ecuación número 3:

$$TRH = \frac{As * D_m * n}{Q}$$

$$TRH = \frac{96 * 0,55 * 0,42}{7,19}$$

$$TRH = 3,1 \text{ d}$$

Se necesitaría un área superficial de 96 m<sup>3</sup> para que el efluente tenga una concentración de 25 mg/l.

#### 4.2. Dimensionado para el proceso de nitrificación

Lo primero que se hace es calcular el área necesaria para la nitrificación es calcular  $K_{NH}$  con la ecuación 7.

$$K_{NH} = 0,01854 + 0,3922 (r_z)^{2.6077}$$

$$K_{NH} = 0,01854 + 0,3922 (0,5)^{2.6077}$$

$$K_{NH} = 0,082 d^{-1}$$

Luego de obtener  $K_{NH}$  se puede calcular  $K_T$  de la desnitrificación con la ecuación 8

$$K_T = K_{NH} * \theta^{(T-20)}$$

$$K_T = 0,082 * 1,048^{(10,2-20)}$$

$$K_T = 0,052 d^{-1}$$

Ahora que se conocen todos los valores, se calcula la superficie necesaria para que la concentración final de amonio ( $NH_4^+$ ) sea 4 mg/l se utiliza la ecuación 6 con los siguientes valores.

$$As = \frac{Q * (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * D_m * n}$$

$$As = \frac{7,19 * (\ln 5,3 - \ln 4)}{0,052 * 0,55 * 0,42}$$

$$As = 167,31 \sim 168 m^2$$

Como esta superficie es mayor a la necesaria para la eliminación de DBO<sub>5</sub> es la que se utilizará para el dimensionamiento del muro verde.

Para calcular el tiempo de retención hidráulico que tendría el muro verde de esta superficie se utiliza la fórmula 3:

$$TRH = \frac{As * D_m * n}{Q}$$

$$TRH = \frac{168 * 0,55 * 0,42}{7,19}$$

$$TRH = 5,3 d$$

### 4.3. Dimensionado para el proceso de desnitrificación

Lo primero que hay que hacer en la desnitrificación es saber cuál es la concentración inicial de  $\text{NO}_3^-$ . Esta es igual al  $\text{NH}_4^+$  eliminado en la nitrificación, es decir, 1,3 mg/l como concentración inicial.

Para calcular  $K_T$  se utiliza la ecuación 11:

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)}$$

$$K_T = 1 * (1,15)^{(10,2-20)}$$

$$K_T = 0,254 d^{-1}$$

Una vez conocido el valor de la concentración inicial como la  $K_T$ , se calcula la concentración final de la desnitrificación con la ecuación 9:

$$NO_{3f} = \exp(-K_T * TRH) * NO_{3o}$$

$$NO_{3f} = \exp(-0,254 * 5,37) * 1,3$$

$$NO_{3f} = 0,34 \frac{mg}{l}$$

A continuación, con la ecuación 10 se calcula la superficie necesaria para hacer esta eliminación de  $\text{NO}_3^-$ :

$$As = \frac{Q * \ln\left(\frac{Ce}{Co}\right)}{K_T * Dm * n}$$

$$As = \frac{7,19 * \ln\left(\frac{0,34}{1,3}\right)}{0,254 * 0,55 * 0,42}$$

$$As = 168 m^2$$

$$TRH = 5,3$$

#### 4.4. Dimensionado de la eliminación del nitrógeno total

La concentración inicial del nitrógeno total es de 5,3 mg/l y con la ecuación número 12 se calcularía la concentración final de nitrógeno.

$$NT_f = NT_o - \Delta NH_4$$

$$NT_f = 12 - (5.3 - 0.34)$$

$$NT_f = 7,4 \frac{mg}{l} \approx 7 \frac{mg}{l}$$

Al final del tratamiento el efluente tendrá una concentración de nitrógeno total de 7,04 mg/l.

#### 4.5. Reajuste del dimensionado de eliminación de DBO<sub>5</sub>

Como se ha podido comprobar, se necesita más superficie para la eliminación de nitrógeno que para la DBO, por lo que se utilizará la superficie de la nitrificación para la construcción del muro verde.

Ahora se calcula cuál es la concentración final de la DBO<sub>5</sub> con una superficie de 168 m<sup>2</sup>. Para este cálculo se utilizará la ecuación 1, pero esta vez la incógnita es DBO<sub>f</sub>.

$$As = \frac{Q * (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * D_m * n}$$

$$As * K_T * D_m * n = Q (\ln DBO_o - \ln DBO_f)$$

$$\ln DBO_o - \ln DBO_f = \frac{As * K_T * D_m * n}{Q}$$

$$DBO_f = \exp - \left( \frac{As * K_T * D_m * n}{Q} \right) + \ln DBO_o$$

$$DBO_f = \exp - \left( \frac{168 * 0,621 * 0,55 * 0,42}{7,19} \right) + \ln 170$$

$$DBO_f = 6 \frac{mg}{l}$$

Con la superficie de 168 m<sup>2</sup> se obtiene una concentración de DBO<sub>5</sub> en el efluente de 6 mg/l.

#### 4.6. Dimensionado de eliminación de SS

Para el cálculo de la concentración de sólidos en suspensión en el efluente se utilizará la ecuación 4. Para realizar esta primero se debe calcular el valor de HLR, por lo que se usará la ecuación 5.

$$HLR = \frac{Q}{A_s} \quad (5)$$

$$HLR = \frac{7,19}{168} = 0,0428 \text{ m/ d} = 4,28 \text{ cm/d}$$

Ahora que se conoce el valor de *HLR*, se puede calcular los sólidos en suspensión final utilizando la ecuación número 5:

$$C_e = C_o[0,1058 + 0,0011 * HLR]$$

$$C_e = 190[0,1058 + 0,0011 * 4,28]$$

$$C_e = 21 \text{ mg/l}$$

La concentración de sólidos en suspensión al terminar su paso por el muro verde (superficie de 168 m<sup>2</sup>) es de 21 mg/l.

#### 4.7. Dimensionado hidráulico

Para calcular las dimensiones que tendrá el muro verde se tiene en cuenta que la longitud del talud de la zona elegida es de 49 m y que las escaleras tendrán una anchura de 4m, por lo que hay una longitud disponible de 45m.

Con una superficie (*A<sub>s</sub>*) de 168 m<sup>2</sup> y una longitud (*L*) de 45 m se calcula la anchura (*W*) que tendrán los maceteros.

$$W = \frac{A_s}{L} = \frac{168}{45} = 3,7 \text{ m}$$

El muro verde tendrá una dimensión de 45 m de largo y 3,7 m de ancho. Para mejorar la integración de su estructura se construirán 3 alturas divididas en macetas de 1,25m. Además, como la entrada no es simétrica se hace un nuevo reparto, pero en este caso de la longitud.

Al final está compuesto en 6 partes, 3 de ellas tienen un tamaño de 29x1,25m y los otros 3 presentan una dimensión de 16x1,25m. De esta forma mantendremos la superficie necesaria, pero con un reparto que permitirá la mejor integración posible.

#### **4.8. Dimensionado del humedal artificial**

Para el dimensionado del volumen del humedal artificial, que se utilizará como reservorio, se va a utilizar el caudal y el tiempo de retención hidráulico del muro verde. Por tanto, almacenará la cantidad de agua tratada equivalente a un ciclo del jardín. Es decir, el volumen es el agua que llega en 5,37 días.

$$V = Q * TRH = 7,19 \frac{m^3}{d} * 5,37 d = 38,6 m^3$$

Para evitar que escasee el agua y para almacenar más en caso de lluvia se hará una balsa de 50 m<sup>3</sup>.

Este humedal artificial tendrá una profundidad de 0,4 m, por lo tanto, el área que ocupara es de 125 m<sup>2</sup>.

#### **4.9. Diseño propuesto**

En este apartado se muestran los resultados del dimensionado del muro verde conforme al procedimiento de diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. También se muestra el dimensionado propuesto para el cuerpo de agua que funcionaría como un húmeda superficial de flujo libre. Se incluyen resultados numéricos de dimensionado numérico conforme al método de Reed y diversas recreaciones informáticas del aspecto que podría adoptar la infraestructura verde en la ubicación propuesta.

##### **4.9.1. Muro verde**

En la Tabla 4 se muestran los resultados empíricos obtenidos para el tratamiento de aguas grises en una superficie de 168m<sup>2</sup> (superficie necesaria para el tratamiento en la desnitrificación y nitrificación).

Como se observa, el mayor rendimiento de reducción ocurre para la DBO<sub>5</sub> (96%) y para los SS (89%). La eliminación de formas nitrogenadas es más compleja y por ese motivo necesita una mayor superficie y tiene un rendimiento menor que los dos parámetros anteriores.

Tabla 4: Resumen de los resultados obtenidos con el tratamiento en los muros verdes.

Parámetro	Co (mg/l)	Ce(mg/l)	% reducción
DBO <sub>5</sub>	170	6	96,47
SS	190	21	88,95
NT	12	7	41,7
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	5,3	4	24,53
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,3	0,34	73,85

La Tabla 5 muestra los rendimientos medios de depuración que se alcanza con el empleo de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas (Salas, 2007).

Tabla 5: Rendimientos de depuración en Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontales (Salas, 2007).

Parámetro	% Reducción
DBO <sub>5</sub>	85-95
SS	90-95
NT	20-40

Como se puede observar los valores empíricos de eliminación obtenidos están cerca de los rendimientos de depuración que serían comparables a los esperables conforme a la bibliografía.

El muro verde tendría una superficie de 168 m<sup>2</sup> y estaría conformado con 6 módulos de depuración agrupadas en grupos de 3. Siendo esta distribución la que encajaría en el talud de la forma integrada y los tamaños serían los siguientes:

- 3 módulos de 29 x 1,25 m (Figura 5) de forma rectangular curva con una longitud de 29m y 1,25 de ancho. Este módulo tiene una profundidad de 0,7 m los cuales están rellenos de sustrato de vidrio reciclado.

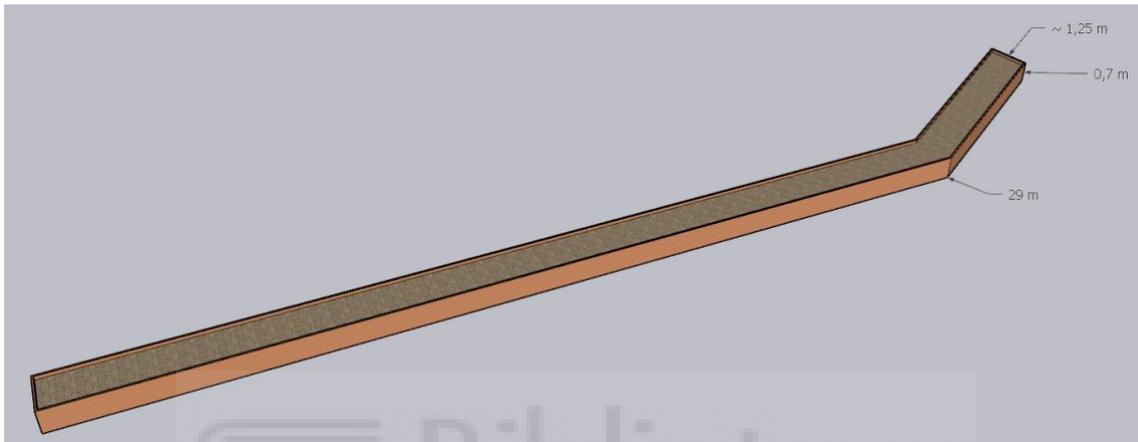


Figura 5: Representación del módulo de depuración de 29x1,25 m (Realizado en 3D SketchUp).

- 3 módulos de 16 x 1,25 m (Figura 6) de forma rectangular con un largo de 16 metros y una anchura de 1,25m. Este módulo tiene una profundidad de 0,7 m los cuales están rellenos de sustrato de vidrio reciclado.

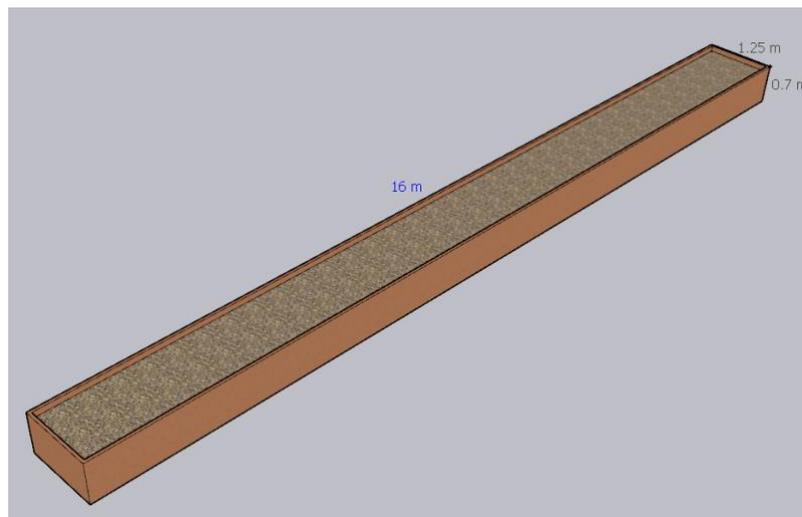
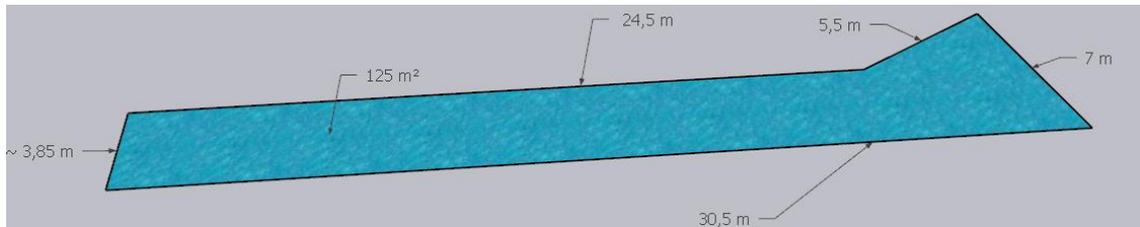


Figura 6: Representación del módulo de depuración de 16x1,25 m (Realizado en 3D SketchUp)

#### 4.9.2. Cuerpo de agua

El humedal artificial de flujo libre tendrá un volumen total de  $38,5 \text{ m}^3$ . Tendrá una profundidad de  $0,4 \text{ m}$  y ocupará una superficie de  $125 \text{ m}^2$ . En la Figura 7 se observa sus dimensiones y forma.



*Figura 7: Representación del humedal de flujo libre de  $125 \text{ m}^2$  (Realizado en 3D SketchUp).*

En las siguientes figuras se observa la situación actual de la zona de estudio y una simulación de la infraestructura realizada por 3D SketchUp.



Estado actual



*Figura 8: Fotografía frontal de la situación actual*

Recreación con la infraestructura verde propuesta



*Figura 9: Representación frontal de la infraestructura verde (Realizada en 3D SketchUp).*

Estado actual



*Figura 10: Fotografía del estado actual*

Recreación con la infraestructura verde propuesta



*Figura 11: Fotografía de la infraestructura verde (Realizada en 3D SketchUp).*

Estado actual

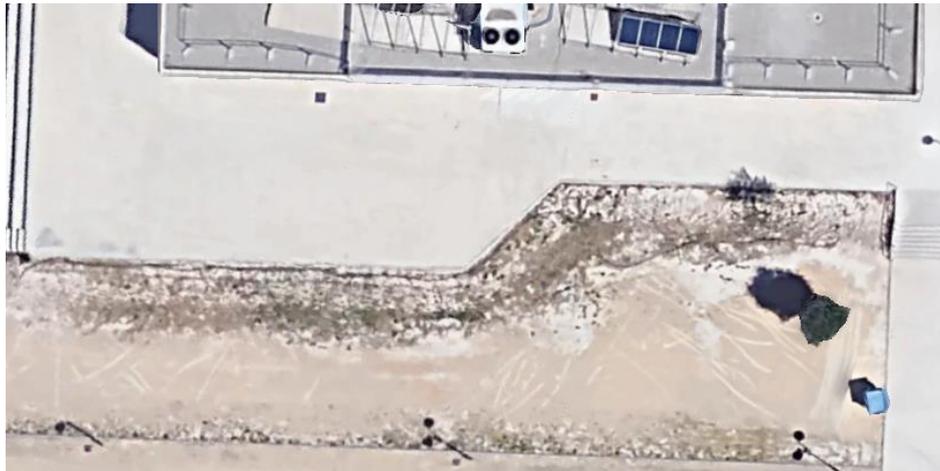


Figura 12: Imagen aérea de la localización (Fuente; Google Earth).

Recreación con la infraestructura verde propuesta

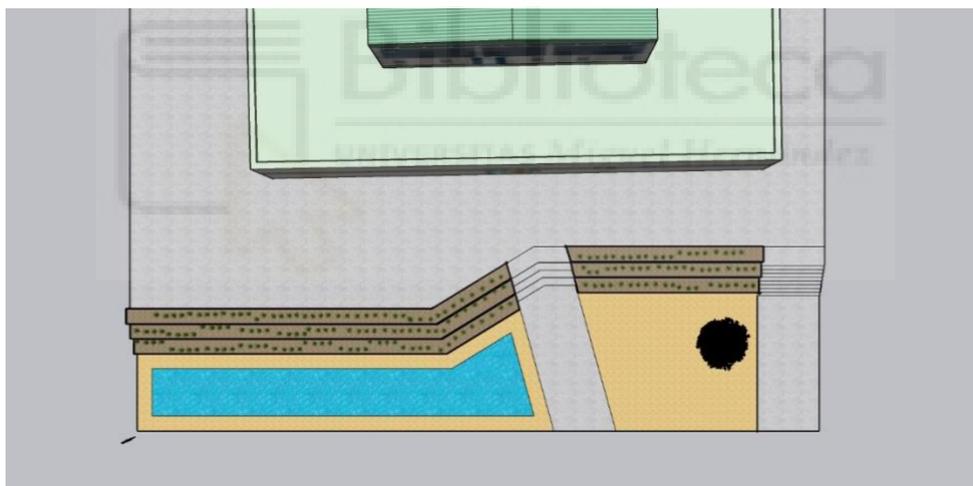


Figura 13: Imagen aérea de la infraestructura verde (Realizada en 3D SketchUp).

## 5. Presupuesto

Para el coste de la construcción y la puesta en marcha de la infraestructura se ha realizado una estimación preliminar. Este está desglosado como se observa en la Tabla 6

Tabla 6: Presupuesto de la construcción de la infraestructura verde

HUMEDAL ARTIFICIAL			
	€/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	Precio
Sustrato del vidrio reciclado	0,8	168	134,40 €
Sensores			6.430,42 €
Vegetación	65	168	10.920,00 €
Módulo de depuración	30	168	5.040,00 €
	€/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	
Excavación	40	50	2.000,00 €
Vaso hormigón	220	50	11.000,00 €
Sistema de bombeo			200,00 €
Tuberías			150,00 €
Sistema eléctrico			600,00 €
Mano de obra			1.500,00 €
TOTAL			37.974,82 €
Honorarios técnicos	4%		1.518,99 €
TOTAL FINAL			39.493,81 €

El sustrato de vidrio reciclado tiene un precio de 40€ cada tonelada. Aproximadamente se necesitarían 20 kg de este vidrio para rellenar 1m<sup>2</sup>, es decir, el precio por metro cuadrado es de 0,8€.

El presupuesto de los sensores está compuesto por el controlador y los sensores que se van a utilizar para medir el pH, potencial redox, conductividad, temperatura y oxígeno disuelto.

Para el presupuesto de la vegetación se ha estimado que el coste de cada enea es de 13€/pie, si hay 5 pies/m<sup>2</sup> el coste total es de 10.929€.

Se ha estimado que el módulo de plástico reciclado que se utilizara es de 30€/m<sup>2</sup>.

En la parte del humedal artificial de flujo libre se ha estimado que el precio de la excavación es de 40€/m<sup>3</sup> y si el humedal tiene un volumen de 50 m<sup>3</sup> el precio es de 2.000€.

Con el vaso de hormigón pasa lo mismo, se estima 220€/m<sup>3</sup> y el precio es de 11.000€.

El precio medio de una bomba para la recirculación es de 200€ y para las tuberías se ha estimado 150€.

El sistema eléctrico este compuesto por un cuadro eléctrico, se ha aproximado un precio de 400€, y para el cableado se estima unos 200€.

Por último, se ha presupuestado 1.500€ de mano de obra de la siguiente manera. Se ha estimado que la obra durará 3 días y que se necesitarán 3 obreros. Contratar a un obrero cuesta aproximadamente 130€/día, por lo que sale un precio de 1.500€.

Todos estos costes hacen un total de 38.544,34€, a este valor le añadimos el 4% por los honorarios técnicos para tener un coste total de la obra de 40.086,11€.

Para la previsión futura se ha realizado el presupuesto anual de mantenimiento (Tabla 7) de la infraestructura verde. (MMAMRM, 2010).

El coste anual para el mantenimiento de las infraestructuras propuestas es de 4.116,72 €.

Tabla 7: Presupuesto del mantenimiento anual (MMAMRM, 2010).

MANTENIMIENTO						
	Coste horario (€/h)	Coste volumen (€/m3)	Frecuencia	Volumen (m3)	Tiempo (h)	Coste anual (€)
Inspección, y medición espesores flotantes y fangos	16		1 vez/año		1	16,00 €
Extracción y gestión de fangos y flotantes		15	1 vez/año	20		300,00 €
Inspección general	16		1 vez/año		0,17	2,72 €
Limpieza tuberías distribución	16		1 vez/año		0,5	8,00 €
Siega de las plantas	16		1 vez/año		24	384,00 €
Evacuación residuos poda		16	1 vez/año	168		2.688,00 €
Mantenimiento obra civil	16		24 veces/año		2	768,00 €
<b>TOTAL</b>						<b>4.166,72 €</b>

## 6. Conclusiones

Tras este estudio, se puede concluir que este método podría ser una buena opción para implementar en otras universidades o zonas residenciales de poca población. Aunque sean tratamientos extensivos, una buena localización e integración paisajística (gracias a infraestructuras como muros o tejados verdes) se podría llevar a cabo.

A nivel depuración, esta infraestructura sería menos costosa que en la EDAR tradicional tanto a nivel económico como ambiental, por lo que su construcción y su utilización se debería llevar a cabo en más infraestructuras de este tipo.

La Universidad debería hacer una inversión para la construcción de esta infraestructura verde, pero la mejora estética y medio ambiental de la zona que se obtendría sería elevada.

Tener en el propio campus un muro verde que depura aguas grises sería un impulso al trabajo realizado por la UMH con los ODS y una inversión por la innovación a nivel ambiental.



## 7. Referencias bibliográficas

- CE 2001. Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales adaptadas a las pequeñas y medias colectividades. Oficina de las publicaciones oficiales de las comunidades europeas, Luxemburgo. ISBN 92-894-1690-4.
- Comisión Europea (2014) Construir una infraestructura verde para Europa. Unión Europea: Bruselas, Bélgica.
- Cooper PF., Job GD., Green MB., Shutes RBE. (1996). Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. WRc Publications, Medmenham, Marlow, 184 pp.
- Crites, R.W., Middlebrook, E.J., Bastian, R.K., Reed, S.C. (2014). Natural Wasterwater Treatment Systems, 2<sup>nd</sup> edition. CRC Press: Taylor & Francis Group
- García, J. y Corzo, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Goodnetilleke, A. y J.L. Lampard (2019) Chapter 3. Stormwater Quality, Pollutant Sources, Processes, and Treatment Options. En: A.K. Sharma, T.Gardner, y D.Begdie (eds.), Approaches to water sensitive Urban Design. Potencial, Design, Ecological Health, Urban Greening Perceptions, pp.49-74. Elsevier. Amsterdam. Países Bajos.
- GWP (2011) Hacia una gestión integrada de aguas urbanas. Global Water Partnership (GWP) Secretariat: Estocolmo, Suecia.
- Hobban A. (2019) Chapter 2. Water Sensitive Urban Design Approaches and Their Description. En: A.K. Sharma, T.Gardner, y D.Begdie (eds.), Approaches to water sensitive Urban Design. Potencial, Design, Ecological Health, Urban Greening Perceptions, pp.25-47. Elsevier. Amsterdam. Países Bajos.
- Jamei, E. y Tapper, N. (2019) Chapter 19. WSUD and Urban Heat Island Effect Mitigation. En: A.K. Sharma, T.Gardner, y D.Begdie (eds.), Approaches to water sensitive Urban Design. Potencial, Design, Ecological Health, Urban Greening Perceptions, pp.381-407. Elsevier. Amsterdam, Países Bajos.
- Kadlec R.H. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 35: 159–174.

- Kadlec R.H. y Wallace S.D. (2009). *Treatment Wetlands*, 2<sup>nd</sup> edition. CRC Press: Boca Raton, FL, EEUU.
- Langergraber, G. (2003). Simulation of subsurface flow constructed wetlands results and further research needs. *Water Science & Technology*, 48: 157–168.
- MAPA (2022). Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). <https://portal.mapa.gob.es/websiar/Inicio.aspx>
- MITECO (2022) Disposiciones normativas del plan hidrológico de la demarcación hidrográfica del Júcar ciclo de planificación hidrológica 2022 - 2027
- MITECO (2019) Guía de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas de Drenaje Sostenible. Ministerio de Transición Ecológica (MITECO): Madrid, España.
- MMAMRM, 2010 Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MMAMRM): Madrid, España.
- Mohsenian Hada Amlashi, S., Carter, A., Vaillancourt, M. y Bilodeau, J.-P. (2020). Physical and hydraulic properties of recycled glass as granular materials for pavement structure. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 47 (7): 865-874.
- Ramírez J. S. y Rodríguez. D. C. (2020) Humedales artificiales de flujo subsuperficial: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de materia orgánica. *Ingenierías USBMed*, vol. 11, no. 2, pp. 65-73, 2020.
- Salas JJ., Pidre JR., Sánchez L. (2007). Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Capítulo IV: Humedales Artificiales. Fundación Pública Andaluza Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA): Carrión de los Céspedes, España.
- Sánchez, D. (2013). Diseño y modelización de humedales para el tratamiento de efluentes de depuradora. Aplicación en el entorno del parque nacional de Las Tablas de Daimiel. Tesis Doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha.
- USEPA. 2000. Wastewater Technology Fact Sheet. Free Water Surface Wetlands EPA/832/F-00/024. United States Environmental Protection Agency (USEPA): Washington DC, EEUU.

UNESCO (1971) Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas. Ramsar, 2.2.1971. Modificada según el Protocolo de París, 3.12.1982 y las Enmiendas de Regina, 28.5.1987. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, las ciencias y la Cultura (UNESCO): París, Francia.

Vymazal, J. y Kröpfelová, L. (2008) Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Springer: Dordrecht, The Netherlands.

Ysún-Barrio, M.T., (2009). Reutilización de aguas grises: grupo de viviendas en el municipio de Victoria de Acentejo. Universidad Politécnica de Cataluña

Water for Life Decade (2014). Decenio Internacional para la Acción “El agua, fuente de vida” 2005-2015. Naciones Unidas. Último acceso: junio 2022. URL: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>

