

DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES EN ANTIGÜEDAD DE CERRATO



Universidad de Valladolid

AUTOR: DIEGO CONDE CID

TUTOR: FRANCISCO LAFUENTE ÁLVAREZ

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Septiembre de 2014





D. Francisco Lafuente Álvarez, profesor titular de universidad, certifica:

Que D. **Diego Conde Cid** ha realizado bajo su dirección el Trabajo Fin de Máster "***Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales en Antigüedad de Cerrato***", con una duración de 225 horas distribuidas en 3 meses (9 créditos).

Valladolid, 11 de Septiembre de 2014

Fdo: Francisco Lafuente Álvarez



Reunido el Tribunal designado en Junta de Sección para la evaluación de Trabajos fin de máster, y después de atender a la defensa del trabajo “***Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales en Antigüedad de Cerrato***”, presentado por el alumno **Diego Conde Cid**, con una dedicación de 225 horas distribuidas en 3 meses y realizado bajo la dirección del profesor titular de universidad, **D. Francisco Lafuente Álvarez**, decidió otorgarle la calificación de _____.

Valladolid, 11 de septiembre de 2014

Presidente/a

Secretario/a

Fdo: _____

Fdo: _____

Vocal

Fdo: _____



ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	3
RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. ANTECEDENTES	7
2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA	7
2.1.1 DATOS GEOGRÁFICOS	7
2.1.2 DATOS GEOLÓGICOS	7
2.1.3 DATOS CLIMÁTICOS	8
2.1.4 DATOS SOCIOECONÓMICOS	9
2.1.5 DATOS AMBIENTALES	10
2.2 DATOS DE PARTIDA Y CARACTERÍSTICAS DEL INFLUENTE	11
2.3 CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE	14
2.4 CONSIDERACIONES DEL PROYECTO	14
3. MARCO LEGAL	16
4. ALTERNATIVAS	17
4.1 PROPUESTAS DE TRATAMIENTO	17
4.2 VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS	19
4.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA	21
5. SISTEMA DE TRATAMIENTO	22
5.1 UBICACIÓN	22

5.2 LÍNEA DE TRATAMIENTO	23
5.3 PRETRATAMIENTO	24
5.4 TRATAMIENTO PRIMARIO	28
5.5 TRATAMIENTO SECUNDARIO	30
5.5.1 HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL	31
5.5.2 HUMEDAL ARTIFICIAL SUPERFICIAL	32
6. CONCLUSIONES	35
7. BIBLIOGRAFÍA	36
ANEXOS	38
ANEXO I: CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS	39
ANEXO II: DIAGRAMA DE PROCESOS	57
ANEXO III: IMÁGENES	58

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Datos climáticos. Estación meteorológica de Venta de Baños (Palencia)</i> <i>(AEMET, 2014).</i>	9
<i>Tabla 2: Datos de la población y de los h-e</i>	12
<i>Tabla 3: Datos de caudales</i>	12
<i>Tabla 4: Valores típicos de la composición del agua para pequeñas poblaciones (Martín</i> <i>García y col., 2006)</i>	13
<i>Tabla 5: Producción de contaminantes diaria</i>	13
<i>Tabla 6: Límites de vertido a cauce. Directiva 91/271/CEE</i>	14
<i>Tabla 7: Dimensiones del desbaste</i>	25
<i>Tabla 8: Dimensiones del desarenador</i>	26
<i>Tabla 9: Dimensiones del tanque homogeneizador.</i>	27
<i>Tabla 10: Dimensiones del Tanque Imhoff</i>	29
<i>Tabla 11: Rendimiento del Tanque Imhoff (Martín García y col., 2006)</i>	29
<i>Tabla 12: Dimensionado Humedal Artificial Subsuperficial Horizontal</i>	31
<i>Tabla 13: Dimensionado Humedal Artificial Superficial</i>	33
<i>Tabla 14: Características estimadas del vertido a cauce</i>	34
<i>Tabla 15: Características del influente a tratamiento primario</i>	47
<i>Tabla 16: Características del influente al humedal artificial subsuperficial horizontal</i>	49
<i>Tabla 17: Características del influente al humedal artificial superficial</i>	54

RESUMEN

En el presente documento se detalla el dimensionado de una estación depuradora de aguas residuales, mediante un tratamiento blando, para el municipio de Antigüedad de Cerrato, en la provincia de Palencia, con el objetivo de conseguir un vertido de agua a cauce acorde a las exigencias legislativas actuales.

La línea de tratamiento consistirá en tres fases diferenciadas, las cuales serán: un pretratamiento, basado en un desbaste y un desarenado, un tratamiento primario, llevado a cabo mediante un Tanque Imhoff y como tratamiento secundario, un humedal artificial subsuperficial horizontal y a continuación un humedal artificial superficial, como método para la mejora del efluente. Finalmente, el agua debidamente depurada, será vertida al Arroyo del Prado.

Para evitar el consumo energía en el transporte del agua, se emplazarán todos los equipos a favor de pendiente, para que el agua circule por gravedad.

Previamente a la explicación y dimensionado de los equipos, se hará un descripción de las características de la zona, aquellas que determinarán donde y por qué se ubicará finalmente la estación de tratamiento y la elección del tipo de tratamiento.

Con el objetivo de facilitar la lectura del proyecto, las ecuaciones y cálculos llevados a cabo para el diseño del equipamiento se han situado en los anexos del documento.

1. INTRODUCCIÓN

Según la definición establecida por el Real Decreto-Ley 11/1995 se entiende por aguas residuales urbanas, “aquellas *aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial*”. Siendo las aguas residuales domésticas “*aquellas aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios y generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas*”.

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

Los principales compuestos a controlar de las aguas residuales urbanas pueden resumirse en los siguientes (Martín García y col., 2006):

- Sólidos gruesos: Plásticos, maderas, trapos...
- Arenas
- Grasas y aceites
- Sustancias oxidables: materia orgánica y compuestos inorgánicos que pueden oxidarse fácilmente.
- Nutrientes: Nitrógeno (N) y fósforo (P)
- Agentes patógenos: Bacterias, virus, protozoos... que pueden transmitir enfermedades.
- Contaminantes emergentes: nuevos contaminantes derivados de los nuevos hábitos de consumo. Son muy difíciles de eliminar. Residuos de antibióticos, hormonas...

Aunque se han realizado grandes esfuerzos para la depuración de las aguas de grandes aglomeraciones urbanas, se estima que alrededor del 50% de los municipios inferiores a 2.000 h-e (habitantes equivalentes) no cuentan con un sistema de tratamiento de sus

aguas residuales, las cuales son vertidas directamente a cauce, con los problemas derivados (Ortega de Miguel y col., 2010).

El Real Decreto-Ley 11/95 fijó el 1 de enero de 2006 como fecha límite para que las aglomeraciones urbanas menores de 2.000 habitantes equivalentes que vertiesen a aguas continentales o estuarios y que contasen con red de saneamiento, sometiesen a sus aguas residuales a un tratamiento adecuado, definido como *“el tratamiento de las aguas residuales mediante cualquier proceso o sistema de eliminación, en virtud del cual las aguas receptoras cumplan después del vertido los objetivos de calidad previstos en el ordenamiento jurídico aplicable”*.

Por ello, se plantea la construcción de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) en el municipio de Antigüedad de Cerrato, con el fin de cumplir varios objetivos:

- Cumplir con el Real Decreto-Ley 11/95, referente a someter las aguas residuales a un tratamiento adecuado
- Proteger el buen estado ecológico de los medios receptores, principio en el que se basa la Directiva Marco del Agua y respecto al cual gira toda la legislación relacionada y por tanto la actual política hidráulica.
- Evitar riesgos para la salud pública, así como la de otros seres vivos vinculados de una u otra manera al sistema hídrico.

2. ANTECEDENTES

A continuación se describirán las características más importantes de la zona de estudio y que determinarán el tipo de tratamiento seleccionado y su ubicación.

2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA

2.1.1 DATOS GEOGRÁFICOS

El municipio de Antigüedad de Cerrato se encuentra ubicado al sureste de la provincia de Palencia, concretamente en la comarca del Cerrato, a 40 km de la capital palentina, con la cual está comunicada a través de la carretera P-141. Sus coordenadas son 41º 56' 43" N y 4º 7' 23" W (Ver Anexo III. Imagen 1).

Concretamente se localiza en el sector centro-oriental de la Cuenca del Duero, en una gran altiplanicie, en la que los desniveles están formados por los encajamientos fluviales de arroyos y ríos (IGME, 1997). El pueblo de Antigüedad se encuentra a 770m s.n.m., en uno de estos encajamientos fluviales, en la confluencia de los arroyos “del Prado” y “de Valderrey”.

Aunque la comarca puede considerarse principalmente llana, ya que más del 60% de su superficie es plana (pendiente inferior al 3%), son destacables las pendientes superiores al 10%, suponiendo estas casi el 40% de la superficie.

2.1.2 DATOS GEOLÓGICOS

La comarca del Cerrato está definida por páramos calcáreos, formados por depósitos de calizas Pontienses.

Destaca la estructura páramo-cuesta, formada por depósitos Terciarios (periodo mioceno) fundamentalmente de margas, yesos y calizas en disposición horizontal. Esta zona sufre una gran erosión, lo que origina pendientes muy pronunciadas (Palacios Cenzano y col., 2013).

La zona de estudio, se caracteriza por la presencia de materiales terciarios continentales, fundamentalmente carbonatados, correspondientes al desarrollo de un importante y complejo sistema lacustre durante el Neógeno (IGME, 1997).

Concretamente, donde se espera ubicar la instalación, constituye el fondo del valle y está formado por arcillas y limos con cantos, además de coluviones en las bases de las laderas (*Ver Anexo III. Imágenes 2 y 3*).

2.1.3 DATOS CLIMÁTICOS

Se incluye en un régimen de tipo mediterráneo templado, con cierta tendencia a la aridez. Se caracteriza por inviernos largos y fríos y veranos secos y calurosos.

Las precipitación media anual es de alrededor de 450 mm. Estas precipitaciones se distribuyen irregularmente a lo largo del año, concentrándose principalmente en primavera y otoño.

En cuanto a la temperatura, la media anual es de 11,1°C, con máximas absolutas de 39°C y mínimas absolutas de -18,5°C.

Para la determinación de la climatología se han empleado datos de la estación meteorológica de Venta de Baños (Palencia), la ubicación más próxima a la zona de estudio (AEMET, 2014). Los datos obtenidos corresponden al periodo 1971-2002. Pueden verse en la “*tabla 1*”.

MES	P (mm)	T ^a _m (°C)	T ^a _{min} (°C)	T ^a _{max} (°C)
ENERO	39,2	3,8	-0,5	8,1
FEBRERO	31	5,6	0,2	11,1
MARZO	23,5	8,1	1,7	14,5
ABRIL	41,8	9,7	3,4	16,1
MAYO	51,4	13,7	7	20,4
JUNIO	36,4	17,8	10	25,6
JULIO	21	21	12,3	29,7
AGOSTO	16,7	20,8	12,3	29,4
SEPTIEMBRE	28,6	17,3	9,6	25,1
OCTUBRE	42	12,4	6,2	18,6
NOVIEMBRE	41,7	7,4	2,3	12,4
DICIEMBRE	49,8	4,7	0,7	8,7
AÑO	423,1	11,9	5,4	18,3

Tabla 1: Datos climáticos. Estación meteorológica de Venta de Baños (Palencia) (AEMET, 2014).

P: precipitación; T^a: temperatura media; T^a_{min} temperatura media de las mínimas T^a_{max}: temperatura media de las máximas

El climograma en el que se reflejan las temperaturas y precipitaciones de la estación meteorológica de Venta de Baños puede verse en “Anexo III. Imagen 4”.

2.1.4 DATOS SOCIOECONÓMICOS

El municipio de Antigüedad de Cerrato cuenta con una población censada de 404 habitantes (INE, 2012), con una densidad de población de 6,53 hab/km² y una evolución poblacional que tiende a la despoblación. La población residente sufre fluctuaciones a lo largo del año, asociadas a periodos vacacionales y festivos.

La actividad principal de la localidad es la agricultura, especialmente los cultivos de secano (cebada, avena y trigo, principalmente). Debido a que la agricultura predominante es de secano y mecanizada, ha permitido que muchos de los agricultores no residan en el pueblo, lo que ha conducido a la reducción de la población.

La ganadería ovina, anteriormente mucho más abundante e importante, está prácticamente abandonada. Solo quedan unos pocos rebaños, no estabulados y

localizados fuera del municipio. En cuanto a otros tipos de cabañas ganaderas, no se tiene constancia de ellas en el pueblo, o en caso de su existencia, son a nivel familiar.

El municipio cuenta con una fábrica de muelas de pulir (Comercial Lozano), la cual cuenta con su propia planta de tratamiento.

2.1.5 DATOS AMBIENTALES

El municipio de Antigüedad de Cerrato incluye en su término municipal una zona LIC (Lugar de Interés Comunitario), reconocido por la RED NATURA 2000. Concretamente es el LIC “Montes del Cerrato” (Ver Anexo III. Imagen 5). Esto es una garantía de un ecosistema bien conservado, que puede mantener un buen estado de sus poblaciones tanto florales como faunísticas.

Bioclimáticamente nos encontramos en la Región Mediterránea, en la Superprovincia Mediterráneo-Iberolevantina, en la Provincia Castellano-Maestrazgo-Manchega y en el Sector Castellano duriense (Red Biodiversidad, 2011).

El termotipo que domina en la zona es el Supramediterráneo, mientras que el ombrotipo que existe es el Seco.

El ecosistema autóctono de la zona es el bosque mediterráneo. Este está formado principalmente por encinas (*Quercus ilex*) y robles (*Quercus faginea*), los cuales definen de forma muy importante el paisaje. Cabe destacar por su relictismo el bosque endémico de sabinas (*Juniperus spp.*) (Red Natura, 2005). En las vegas de los arroyos predominan chopos (*Populus spp.*) y sauces (*Salix spp.*).

En cuanto a la fauna, es muy importante la fauna cinegética, entre la aparece el jabalí (*Sus scrofa*), el conejo (*Oryctolagus cuniculus*) o la codorniz (*Alectoris rufa*). Es destacable la avifauna, como la avutarda (*Otis tarda*), el águila calzada (*Hieraetus pennatus*) o la calandria común (*Melanocorypha calandra*), especialmente aquellas especies asociadas al ecosistema agroforestal. Relacionada con el entorno fluvial sobresale la nutria (*Lutra lutra*).

2.2 DATOS DE PARTIDA Y CARACTERÍSTICAS DEL INFLUENTE

El municipio de Antigüedad de Cerrato no tiene ningún tipo de registro, tanto de agua potabilizada como del agua vertida, por lo que no se dispone de datos del agua vertida a cauce.

Por tanto, para el presente proyecto, se ha optado por basarse en datos obtenidos de bibliografía, especialmente del “Manual para la implantación de sistemas de depuración para pequeñas poblaciones”, del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) (Ortega de Miguel y col., 2010) y de la “Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población”, del CENTA (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua) (Martín García y col., 2006).

- Población

Como la mayoría de los pueblos de la región, Antigüedad sufre fuertes fluctuaciones de población residente a lo largo del año. La mayor afluencia está asociada con el periodo estival, especialmente el mes de Agosto. Por ello se van a diferenciar dos periodos a lo largo del año en función de los habitantes:

- Invierno: época que se considera que la población residente será la que está censada en el municipio.
- Verano: durante el estío, se estima que el número de vecinos puede llegar a duplicarse.

Para llevar a cabo los cálculos de dimensionamiento se emplearán los habitantes equivalentes (h-e), que es un término que relaciona caudales con calidad de las aguas residuales. Según el Real Decreto-ley 11/1995 “1 h-e es La carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno de cinco días (DBO_5), de 60 gramos de oxígeno por día”.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Habitantes invierno	404	Habitantes
Habitantes verano	800	Habitantes
Habitantes equivalentes inv.	647	h-e
Habitantes equivalentes ver.	1280	h-e

Tabla 2: Datos de la población y de los h-e

- Caudales

Uno de los grandes problemas de las aguas residuales en pequeñas poblaciones es que se producen caudales muy pequeños de aguas residuales con concentraciones de contaminantes muy altas (Ortega de Miguel y col., 2010). Además, se producen puntas de caudal muy elevadas, las cuales son mucho mayores que el caudal medio. Este será un factor a tener muy en cuenta a la hora del diseño.

Debido a que la población oscila a lo largo del año, los caudales también lo hacen. Por ello se diferenciará, de forma similar a como se ha hecho con la población, entre los caudales generados durante el invierno y los caudales producidos durante el verano.

PARÁMETRO	VALOR		UNIDAD
	INVIERNO	VERANO	
Abastecimiento	200	200	l/hab/d
Q _m diario	78	154	m ³ /d
Q _m horario	3,2	6,4	m ³ /h
Q _p diario	157	290	m ³ /d
Q _p horario	9,84	17,8	m ³ /h

Tabla 3: Datos de caudales

(Q_m: caudal medio; Q_p: caudal punta)

- Composición del vertido

Como se ha comentado previamente, uno de los grandes problemas de las pequeñas poblaciones es la generación de pequeños caudales pero con altas concentraciones de contaminantes. Estos niveles son casi el doble que los de la composición del agua residual tipo para una población de grandes dimensiones.

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Sólidos suspendidos (SS)	400	mg/l
DBO ₅	500	mg/l
DQO	1000	mg/l
Nitrógeno (N)	75	mg/l
Fósforo (P)	15	mg/l
grasas	75	mg/l
Coliformes totales	10 ⁷ -10 ⁸	UCF/100ml

Tabla 4: Valores típicos de la composición del agua para pequeñas poblaciones (Martín García y col., 2006)

Con tal composición típica del agua generada en el municipio y a partir del caudal de aguas residuales generado, las tasas de contaminantes producidas diariamente se estiman en las siguientes.

PARÁMETRO	VALOR		UNIDAD
	INVIERNO	VERANO	
SS	25,86	51,2	kg/d
DBO ₅	32,32	64	kg/d
DQO	64,64	128	kg/d
Nitrógeno (N)	4,85	9,6	kg/d
Fósforo (P)	0,97	1,92	kg/d
Grasas	4,85	9,6	kg/d
Coliformes totales	1,32 · 10 ¹⁴	2,61 · 10 ¹⁴	UCF/d

Tabla 5: Producción de contaminantes diaria

2.3 CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE

Para conocer los parámetros del vertido hay que remitirse al “Plan Nacional de Calidad de Aguas 2007-2015”. Dichos parámetros son los mismos que los que se reflejan en la Directiva europea 91/271/CEE.

Estos límites, marcados por la normativa, son los siguientes:

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	PORCENTAJE REDUCCIÓN (%)
DBO ₅	25	mg/l	70-90
DQO	125	mg/l	75
SST	35-60	mg/l	90
Fósforo total (P _T)	1-2	mg/l	80
Nitrógeno total (N _T)	10-15	mg/l	70-80

Tabla 6: Límites de vertido a cauce. Directiva 91/271/CEE

Para poblaciones inferiores a 2.000 h-e (habitantes equivalentes), la normativa no establece unos límites numéricos de concentraciones o porcentajes de reducción, sino que simplemente afirma que se debe hacer un tratamiento adecuado, que es aquel que después del vertido permite respetar los objetivos de calidad del medio receptor.

Pero debido a que no se tienen otros parámetros en los que basarse para llevar a cabo el dimensionamiento de la línea de tratamiento y poder cumplir con los objetivos de calidad, se tomarán estos requisitos como base.

2.4 CONSIDERACIONES DEL PROYECTO

Antes de proceder al dimensionado de equipos y la elección de los métodos de tratamiento del agua residual, debe tenerse en cuenta varios requisitos que condicionarán el desarrollo del proyecto.

- Que la instalación se encuentre aguas abajo de la localidad.
- Que se encuentre en el término municipal.
- Calidad del efluente y cumplimiento de requisitos legislativos.

- Mínimos costes de construcción y de gestión.
- Sistema que pueda adaptarse a las fluctuaciones poblacionales a lo largo del año.
- Máxima integración paisajística y mínimo impacto ambiental.
- Mínimo mantenimiento, mínimo requerimiento de técnicos especializados y máxima sencillez en el funcionamiento.
- Mínimo gasto energético y de productos químicos.
- Facilidad en el manejo de los lodos.

3. MARCO LEGAL

- *Real Decreto 849/1986*. Ley de Aguas. Autorización administrativa para toda actividad susceptible de contaminar.
- *Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas*. La finalidad de esta Directiva es proteger el medio ambiente contra todo deterioro debido al vertido de las aguas residuales urbanas. Para ello, establece unos requerimientos mínimos para su recogida, tratamiento y vertido.
- *Real Decreto Ley 11/1995, por el que establece las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. En él se traspone la Directiva 91/271/CEE*.
- *Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo. En él se desarrolla el citado Real Decreto Ley 11/1995*.
- *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000*, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Tiene entre sus objetivos la protección y mejora de las masas de agua superficiales y subterráneas, y de sus ecosistemas asociados. Es la “Directiva Marco de Aguas”.
- *Real Decreto Ley 1/2001*. Texto refundido de la Ley de Aguas. Las concentraciones máximas permitidas son las dadas por la UE en la Directiva 91/271/CEE.
- *Plan Nacional de Saneamiento y Depuración (1995-2005*. Se centra en el cumplimiento de los objetivos definidos en la Directiva 91/271/CEE.
- *Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración 2007-2015 (PNCA)*. Da respuesta tanto a los objetivos no alcanzados por el anterior Plan Nacional (1995-2005) como a las nuevas necesidades planteadas por la Directiva Marco del Agua. Persigue el definitivo cumplimiento de la Directiva 91/271/CEE.

4. ALTERNATIVAS

Antes de llevar a cabo el proyecto y dimensionar la línea de tratamiento, se han seleccionado diferentes alternativas para la depuración de las aguas residuales. A partir del análisis de sus ventajas y desventajas, se seleccionará la opción más viable y que mejor se ajuste a las exigencias del proyecto.

Todas ellas poseen previamente, además de la propuesta planteada, un pretratamiento y un tratamiento primario de las aguas residuales, los cuales no se mencionan por no repetirse constantemente.

4.1 PROPUESTAS DE TRATAMIENTO

- **Alternativa A. Depuración integrada con otros pueblos en Baltanás**

Actualmente se tiende a la construcción de depuradoras que abastezcan al máximo número de habitantes, para aprovecharse de la economía de escala, tanto para la construcción de la planta como durante su explotación. También el concentrar la depuración de aguas en un solo lugar reduce los puntos de vertido, disminuyendo el riesgo de contaminación puntual.

Por ello se propone canalizar el vertido desde Antigüedad hasta Baltanás, un municipio próximo y de mayores dimensiones, que sí dispone de una estación depuradora de aguas residuales.

- **Alternativa B. Depuración mediante Contactor Biológico Rotativo (CBR)**

Tecnología intensiva para la depuración de aguas residuales en pequeños municipios. Se basa en unos soportes giratorios, en los que se encuentran adheridos los microorganismos. Mediante el giro del soporte se permite a la biomasa bacteriana encontrarse alternativamente en contacto con la materia biodegradable del agua y en contacto con la atmósfera.

La instalación de una EDAR con un tratamiento secundario basado en un CBR permitiría alcanzar los requisitos de vertido de una forma fiable, ocupando un mínimo de espacio.

- **Alternativa C. Depuración mediante Filtro Verde**

Se baraja la instalación de un Filtro Verde. Esta es una tecnología extensiva de bajo coste que aprovecha la capacidad física, química y biológica del suelo para depurar las aguas residuales, persiguiendo tanto la depuración del vertido como el crecimiento de la vegetación existente, mediante la utilización del vertido como fertilizante. Por tanto, se consigue, además de la depuración del agua, un beneficio económico a través de la venta de la madera.

- **Alternativa D. Depuración mediante Humedal Artificial Superficial**

Otra de las alternativas consideradas es la instalación de un humedal artificial superficial, en el que serían vertidas las aguas residuales, para su tratamiento.

Esta tecnología de bajo coste, consiste en aprovechar los procesos autodepuradores que de forma natural se producen en los humedales. La depuración es llevada a cabo tanto por el sustrato, como por las plantas, como por los microorganismos presentes en el agua y en el suelo.

Al tener mayores tiempos de retención hidráulica (TRH) del agua, provoca una mejora del ecosistema existente, con la aparición de nuevas especies.

- **Alternativa E. Depuración mediante Humedal Artificial Subsuperficial Horizontal + Humedal Artificial Superficial**

Como última alternativa se plantea un sistema de tratamiento formado por un Humedal Artificial Subsuperficial Horizontal y a continuación un Humedal Superficial, divididos ambos en varias líneas paralelas, para poderse adaptar a los rendimientos y

la carga poblacional, ambos muy variables. Así, en función de los requerimientos del momento, se podrá activar una o varias de las líneas.

La tecnología del Humedal Artificial Subsuperficial Horizontal, consiste en la aplicación del agua residual a través de un sustrato granular, en el que están enraizadas las plantas que se ocuparán de la depuración del influente. Los TRH necesarios para la depuración del vertido son menores, por lo que se necesita menor superficie para la instalación de la planta de tratamiento (CHD, Confederación Hidrográfica del Duero, 2013).

Tras este primer proceso, se instala un Humedal de flujo superficial, como tratamiento de afino del efluente, para alcanzar los objetivos dispuestos por la normativa. A través del empleo de ambos tipos de humedal, con diferentes ambientes, se consigue que los rendimientos de eliminación de nutrientes sean superiores.

4.2 VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS

Definidos los criterios que determinarán el proyecto y conocidas las alternativas barajadas para constituir la línea de tratamiento, se procederá a la valoración de cada una de ellas.

La Alternativa A, que implica la depuración conjunta del vertido de Antigüedad en el municipio de Baltanás, para aprovechar la economía de escala y reducir los costes en las operaciones, conlleva varios problemas:

- Se ha de recorrer largas distancias hasta la EDAR de Baltanás (12 km)
 - Colectores de saneamiento tan largos, con caudales tan bajos, hace que los TRH sean muy altos. Esto unido a la ausencia de oxígeno provocaría la emisión de olores y gases sulfurosos.
 - Mayores costes en infraestructuras, ya que se debe construir una red de tuberías y colectores que conduzcan el vertido hasta la EDAR

- Barreras físicas: cruce con carreteras, LIC “Montes del Cerrato”, Dehesa de Valverde (que es una propiedad privada), etc.

La Alternativa B propone la depuración del vertido mediante un CBR. Esta tecnología intensiva, permite el tratamiento de caudales de agua de forma más eficiente y rápida que las tecnologías extensivas, reduciendo el espacio necesario para su establecimiento. Pero la instalación y mantenimiento de esta tecnología conlleva elevados costos, que un pueblo como Antigüedad de Cerrato, no puede asumir. Además, este tipo de tratamiento necesita de personal cualificado, de un mantenimiento más frecuente que otras tecnologías y un gasto energético constante para su funcionamiento.

La Alternativa C contempla la depuración del efluente mediante un Filtro Verde. Una de las exigencias para la instalación de la planta de tratamiento es que esté ubicada aguas abajo del municipio y dentro del término municipal. Esto reduce notablemente las zonas a elegir, ya que el límite con Baltanás apenas dista a más de un 1 km del pueblo. Cualquiera de los terrenos en que se situaría la EDAR quedará limitado a una zona próxima al Arroyo del Prado, en la cual el nivel freático de las aguas será bastante alto. Esto implica que al verter el caudal de aguas residuales producidas en el municipio directamente al sustrato, para aprovechar su poder depurador, sin ningún tipo de aislamiento del suelo, parte de estas aguas contaminadas puedan infiltrarse y llegar a contaminar el cauce.

La Alternativa D, plantea la instalación de un humedal artificial superficial. Un humedal artificial es una estructura aislada, lo que eliminaría, o al menos reduciría, el riesgo de contaminación del cauce. Además su integración paisajística sería máxima, incluso mejorando la calidad del ecosistema al crear un ambiente nuevo y diferente. Pero los rendimientos de un humedal artificial, especialmente en la reducción de nitrógeno, no alcanzarían las exigencias requeridas por la Directiva 91/271/CEE. Además, para llevar

a cabo la reducción de los contaminantes del agua, exigiría una gran superficie de terreno. También se debe considerar que al verter a un humedal superficial directamente las aguas residuales, tras solo sufrir un tratamiento primario, provocaría problemas de olores y mosquitos, ya que esta agua tendría altas concentraciones de DBO₅.

4.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

La alternativa E, sugiere un sistema de humedales artificiales, uno subsuperficial horizontal y a continuación otro superficial, consistente en varias líneas, que se podrán activar y alternar según los requerimientos del momento.

Esta ha sido la alternativa elegida, ya que es aquella que, a pesar de también contar con ciertos inconvenientes, cumple un mayor número de requerimientos que el resto:

- Bajo coste de operación.
- Sencillez operativa. No se necesita de técnicos especializados.
- El sistema puede operar sin electricidad
- Sistema flexible, que puede adaptarse a las variaciones poblacionales existentes en el municipio, si es gestionado debidamente.
- Perfecta integración paisajística, e incluso mejora del propio ecosistema, a través de la creación de nuevos nichos ecológicos. Puede aprovecharse también para llevar a cabo actividades de educación ambiental.
- Generación de lodos mínima y ya estabilizados.
- Al estar impermeabilizados, se reducen los riesgos de contaminación de las aguas subterráneas.

5. SISTEMA DE TRATAMIENTO

A continuación se explicará detalladamente la línea de tratamiento escogida. Previamente se indicará donde se ubicará la planta y las razones para su elección.

5.1 UBICACIÓN

Para la ubicación de la planta se han seguido los criterios definidos en el apartado “2.4 CONSIDERACIONES DEL PROYECTO”.

Uno de los objetivos planteados es que la parcela elegida para situar la planta de tratamiento de las aguas residuales esté aguas abajo del municipio.

Otro de los parámetros exigidos es que la zona seleccionada se encuentre dentro del término municipal de Antigüedad de Cerrato. Esto reduce notablemente el abanico de posibilidades para la localización, ya que, como se ha comentado anteriormente, el límite con el territorio de Baltanás está a alrededor de 1km de distancia del punto de vertido (Ver Anexo III, Imagen 6).

Unidas a estas exigencias del proyecto, la elección de esta ubicación se ve favorecida por otras ventajas:

- Proximidad al núcleo urbano. Se localizará a una distancia aproximada de 500 metros de la localidad.
- Facilidad de acceso. Se encuentra colindante a la carretera P-141.
- Viento predominante del norte. Evitará los posibles problemas de olores generados en la planta.
- Topografía del terreno. Existe una ligera pendiente, que facilitará el transporte de las aguas residuales hasta la planta, evitando el consumo de energía.

Por ello, la zona seleccionada para instalar la planta de tratamiento de aguas se localizará al oeste del núcleo urbano, entre la carretera P-141 y el Arroyo del Prado, ocupando varias parcelas (Ver Anexo III. Imagen 7).

Debido a que no todas las parcelas son de titularidad pública, será necesaria la compra de aquellas que sean privadas y en las que se pretende instalar la planta, incrementando con ello los costos del proyecto. O bien, puede plantearse la permuta con otras públicas. Aun así, este contratiempo se puede considerar aceptable.

5.2 LÍNEA DE TRATAMIENTO

El sistema de depuración se divide en tres procesos claramente diferenciados: pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario (Ver *Anexo II. Diagrama de procesos*).

El pretratamiento y el tratamiento primario son procesos previos, cuyo objetivo principal consiste en eliminar o reducir la presencia de los materiales más gruesos que podría provocar daños en los equipos y tuberías de la línea de tratamiento.

Una de las premisas a la hora del diseño es la sencillez en su funcionamiento y mantenimiento de los equipamientos y reducir el uso de electricidad. Por ello se ha evitado en todo lo posible el uso de equipos electromecánicos.

El efluente conducido mediante una tubería, llegará a una arqueta. En este punto y justo antes de comenzar el pretratamiento, se ha instalado un by-pass general, que evacuará el influente en caso de que el caudal exceda la capacidad de la instalación y de este modo, evitar problemas en la misma. A continuación, comenzará la línea de pretratamiento. Esta constará de un desbaste de gruesos y a continuación uno de finos. Tras estos procesos el agua será sometida a un desarenado. Tras estos dos procesos, el agua pasará a un tanque homogeneizador. A la salida del tanque homogeneizador se ha instalado un caudalímetro, para conocer el caudal de agua que entra al proceso y de este modo poder mejorar la gestión del mismo. Los beneficios de conocer el caudal son dobles (Alianza, 2008):

- Ajustar las condiciones operativas de las distintas etapas del tratamiento
- Obtener el coste del tratamiento por unidad de volumen tratado

La siguiente fase es el tratamiento primario, en la que se pretende reducir la concentración de sólidos en suspensión que podrían provocar problemas de colmatación en los humedales. Para ello se ha previsto la instalación de un Tanque Imhoff.

Posterior al tratamiento primario y con el objetivo de reducir los niveles de materia orgánica, se ha instalado un tratamiento secundario, realizado en dos fases. La primera constará de un humedal artificial subsuperficial, de flujo horizontal. A continuación el agua pasará a un humedal artificial superficial, para mejorar sus características, antes de su vertido a cauce.

Una de las características más destacable de este proceso de tratamiento es que se han diseñado dos líneas paralelas. La razón para esto es que durante la época estival, la población residente en el núcleo urbano se duplica. La forma más sencilla de satisfacer el aumento de caudales, sin sobredimensionar los equipos y que el resto del año reciban niveles mucho más pequeños, para los que no están dimensionados, es diseñar su tamaño para el caudal que recibirán durante la mayoría del año, y en verano, activar ambas líneas, de forma conjunta, y que puedan soportar el aumento de caudal.

Todos los cálculos, para realizar el dimensionamiento, se encuentran en “*Anexo I. Cálculos justificativos*”.

5.3 PRETRATAMIENTO

- Desbaste

Tras llegar a la arqueta de entrada, el agua residual será conducida a través del canal de desbaste, para comenzar la línea de tratamiento.

En el canal de desbaste se dispondrán 2 rejillas gruesas y a continuación otras 2 rejillas finas. La función de este proceso es la retención de aquellos sólidos de mayor tamaño, que podrían dañar u obturar los equipos que se encuentran a continuación.

Además, y debido a la reducción de velocidad que se produce en el canal, comienza un proceso de desarenado de forma indirecta.

Estas rejas serán de limpieza manual, que deberá ser llevada a cabo de forma periódica por un operario.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
DESBASTE DE GRUESOS		
Anchura de barrotes	18	mm
Luz de barrotes	25	mm
Altura (h)	1	m
Anchura (B)	0,63	m
Longitud (L)	9	m
DESBASTE DE FINOS		
Anchura de barrotes	12	mm
Luz de barrotes	8	mm
Altura (h)	1	m
Anchura (B)	0,63	m
Longitud (L)	9	m

Tabla 7: Dimensiones del desbaste

Se plantean 3 canales de desbaste paralelos. Están diseñados en base a los caudales punta de la época invernal. El objetivo de esto, es soportar los máximos caudales a los que pueden estar sometidos. Durante el invierno, estará operativo solo uno de ellos, manteniéndose los otros 2 inactivos, como reserva para labores de limpieza o emergencia. Durante el verano, cuando la población residente se duplica, se emplearán 2 de los desarenadores, quedando uno de ellos en reserva, para tareas de limpieza o emergencias por atascos o roturas.

- Desarenador

Su objetivo es la eliminación de la materia de mayor densidad presente en las aguas residuales, con un diámetro superior a 0,2 mm. Es una fase muy importante del tratamiento, ya que además de impedir la sedimentación de estos sólidos en canales y conducciones y proteger los equipos de la abrasión, ayudará a evitar la colmatación de

los conductos en el humedal artificial subsuperficial horizontal, por la acumulación de estos sedimentos.

En el desarenador se logra la eliminación tanto de materia orgánica como inorgánica. Servirá como sustituto de un equipo de tamizado.

Se ha elegido un canal desarenador de flujo constante. Este se basa principalmente en un ensanchamiento del canal de entrada del agua, en el que se consigue una reducción de la velocidad del agua, por lo que los sólidos que esta transporta decantan. Lo prioritario es conseguir una velocidad de flujo constante, independientemente del caudal de agua que atraviese el canal (Alianza, 2008).

Al igual que ocurre con el desbaste, se plantean 3 desarenadores de flujo constante de limpieza manual y paralelos. Las razones son similares que en el caso de los canales de desbaste, tener al menos uno de ellos como reserva para tareas de limpieza o emergencias por atascos o roturas durante el verano, que es cuando los caudales son mayores.

De forma periódica, los desarenadores deberán parar su actividad para retirarse los sólidos acumulados. Estos serán administrados por un gestor cualificado.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Longitud (L)	18	m
Anchura (B)	1,5	m
Altura (h)	1	m
Velocidad horizontal (v)	0,3	m/s
Tiempo de retención (t _r)	60	seg

Tabla 8: Dimensiones del desarenador

Basándose en datos del CEDEX (Ortega de Miguel y col., 2010), se puede considerar que los rendimientos típicos de estos equipos rondan el 90% en la eliminación de sólidos sedimentables, pero siendo más conservadores, se admitirá un rendimiento del 70% en eliminación de sólidos suspendidos.

- **Tanque homogeneizador**

Un tanque homogeneizador es un depósito de grandes dimensiones en el cual se acumulan las aguas residuales que entran a la planta de tratamiento. El objetivo del tanque homogeneizador es doble:

- Absorber las puntas de caudal que se pueden producir diariamente o de forma puntual, generando un flujo constante de agua durante las 24 horas del día, para los siguientes procesos. Esto mejorará la eficiencia de los procesos y evitará problemas por sobrecargas en los equipos posteriores.
- Crear un efluente homogeneizado, reduciendo problemas por contaminaciones puntuales. Al igual que creando un caudal constante se mejorará la eficiencia, al generarse un caudal de características similares de forma continua, los tratamientos posteriores podrán funcionar de modo mucho más eficaz y reduciéndose problemas.

Este equipo se sitúa tras el desbaste y el desarenado para evitar problemas de colmatación por acumulación de sólidos que puede transportar el agua.

Se ha diseñado en función del caudal estival para ser capaz de acumular el agua durante un día a caudal máximo. Será de planta cuadrada y de poca altura, para evitar procesos anóxicos en el agua acumulada.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Volumen	165	m ³
TRH	1	d
Alto	4	m
Largo	6,43	m
Ancho	6,43	m

Tabla 9: Dimensiones del tanque homogeneizador.

5.4 TRATAMIENTO PRIMARIO

Para llevar a cabo el tratamiento primario de las aguas residuales se ha elegido un tanque Imhoff. Este es un dispositivo que permite eliminar parte de la materia particulada sedimentable y de los flotantes (OPS, 2005). Además se consigue, que la fracción orgánica de los sólidos sedimentados se mineralice vía anaerobia. Se obtiene así, una pequeña reducción de los niveles de DQO y DBO₅.

Estos tanques constan de un único depósito en el que se separan la zona de sedimentación, que se sitúa en la parte superior, de la de digestión de los sólidos decantados, que se ubica en la zona inferior del depósito. La configuración de la apertura que comunica ambas zonas impide el paso de gases y partículas de fango de la zona de digestión a la de decantación, con lo que se evita que los gases que se generan en la digestión afecten a la sedimentación de los sólidos (ITC, 2005).

Se han diseñado 2 líneas paralelas, con un tanque Imhoff en cada una. Cada uno de ellos está configurado para abastecer a una población de unos 650 h-e, que es la población estimada para la época invernal. Durante esta época uno de los dos permanecerá inactivo, manteniéndose como reserva, para tareas de limpieza o posibles daños. Durante el verano, cuando la población residente aumenta, se activarán ambos.

Los dos tanques se construirán en PRFV (Plástico Reforzado con Vidrio), totalmente impermeables para evitar fugas y se situarán enterrados, en paralelo, y con una separación entre ambos superior a 4 metros (Ortega de Miguel y col., 2010). Además, previo a su instalación, se deberá impermeabilizar el terreno donde se ubicarán, ya sea con hormigón o con otro material. Todas estas precauciones se deben a que al situarse el terreno de la instalación muy próximo al Arroyo del Prado, el nivel freático es muy alto, siendo muy elevado el riesgo de contaminación de las aguas en caso de fuga.

El tamaño de los tanques Imhoff ha sido diseñado para que la limpieza del digestor se deba hacer cada 6 meses. Este fango extraído del digestor, deberá ser tratado por un gestor autorizado, entre los que puede encontrarse una EDAR de mayores dimensiones y con línea de fangos.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
DECANTADOR		
TRH	1,5	h
Volumen	15	m ³
Altura (h)	1,5	m
Anchura (B)	1,85	m
Longitud (L)	5,6	m
DIGESTOR		
TRH	6	meses
Volumen (V)	45,3	m ³
Altura (h)	4	m
Anchura (B)	2	m
Longitud (L)	6	m

Tabla 10: Dimensiones del Tanque Imhoff

La elección de este equipo frente a otros, como la fosa séptica o un decantador primario, se debe principalmente a:

- Menores costes de instalación
- Simplicidad en el manejo de los fangos
- Se adapta mejor a los requerimientos y fluctuaciones de la población actual que un sedimentador

Tomaremos como rendimientos del tanque Imhoff los siguientes:

PARÁMETRO	RENDIMIENTO
DQO	25%
DBO	25%
SST	55%
Nitrógeno (N)	15%

Tabla 11: Rendimiento del Tanque Imhoff (Ortega de Miguel y col., 2010)

5.5 TRATAMIENTO SECUNDARIO

El tratamiento secundario tiene como objetivo la eliminación del contenido en materia orgánica del agua, tanto la que está en disolución como en estado coloidal. Esto se lleva a cabo mediante procesos de oxidación biológica.

Según el Real Decreto-Ley 11/95 un tratamiento secundario es *“el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que incluya un tratamiento biológico en el que se consiga la eliminación de materia orgánica”*.

Los “tratamientos blandos” o “tecnologías no convencionales” aplican procesos propios de los tratamientos naturales (fotooxidación, absorción por las plantas...) operando a una velocidad natural (sin aporte de energía), desarrollándose los procesos en un único reactor-sistema y el ahorro en energía se compensa con un uso de superficie mayor (Alianza, 2008). Esta es la mayor diferencia con los “tratamientos convencionales”, la ausencia de consumo de energía.

El tratamiento de aguas residuales urbanas mediante la tecnología de humedales artificiales se basa en la reproducción artificial de las condiciones propias de las zonas húmedas naturales, para aprovechar los procesos de eliminación de contaminantes que se dan en las mismas.

Los Humedales Artificiales son sistemas de depuración constituidos por lagunas poco profundas (inferiores a 1 m), pobladas con vegetación propia de zonas húmedas (macrófitos acuáticos) (Fernández González y col., [s.l.]). En ellos los procesos de depuración se ejecutan de forma paralela mediante acciones físicas, químicas y biológicas.

Estos humedales se construyen por excavación en el terreno y la impermeabilización del mismo (para evitar infiltraciones que contaminen las aguas subterráneas), tras la que se coloca el sustrato que conformará la base del humedal.

Se ha diseñado un tratamiento secundario consistente en 2 fases. La primera, consistirá en un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal. Este estará dividido en 6 balsas separadas e independientes unas de otras, que se irán llenando de forma periódica, según las necesidades. A continuación, el agua pasará al humedal

superficial, dividido en 2 balsas, en las que el agua proseguirá su tratamiento de depuración. Estas balsas se irán llenando según la producción de aguas residuales.

Tras ello, el agua ya depurada, será vertida al Arroyo del Prado.

5.5.1 HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

El primer proceso que se llevará a cabo en el tratamiento secundario será una depuración del influente al cruzar un humedal subsuperficial horizontal.

En este tipo de humedales, el agua circula a través de un material granular (suelen ser arenas o gravas), que sea permeable, el cual está en un recinto impermeabilizado, para evitar la contaminación de las aguas subterráneas. Este mismo material granular sirve como soporte para el enraizamiento de la vegetación. La eliminación de sólidos se produce principalmente mediante sedimentación y filtración, pero también se producen procesos de floculación (Ver Anexo III. Imagen 8).

La superficie total del humedal se ha dividido en varias celdas para que la distribución del agua a tratar sea mejor. Se ha decidido una división en 6 células, de 52x26 metros, que se dispondrán en dos filas, con tres humedales cada una, con una separación entre cada uno de 10 metros (ver Anexo III. Imagen 9). Esta disposición permitirá la distribución del agua tanto en continuo, atravesando de forma seguida varias balsas, como de forma individual a cada, en función del caudal de entrada o de los rendimientos de reducción de contaminantes. Para garantizar el movimiento del agua desde la cabecera a la salida, se ha dispuesto una pendiente del terreno de 1% (Ortega de Miguel y col., 2010).

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Volumen	676	m ³
Nº de celdas	6	-
Alto	0,5	m
Largo	52	m
Ancho	26	m
Superficie	1352	m ²

Tabla 12: Dimensionado Humedal Artificial Subsoperficial Horizontal

Para la impermeabilización del recinto, se ha decidido emplear bentonita compactada. Por encima de esta capa impermeable se depositará una manta de arenas, previo al asentamiento del sustrato de arenas-gravas. La función de este estrato de arenas, es proteger la tonga de bentonita de perforaciones por las raíces de las plantas

El sustrato elegido para este equipo ha sido uno de características medias, compuesto por arenas y gravas, de un tamaño de entre 6-10 mm de diámetro (Ortega de Miguel y col., 2010). Este tendrá un grosor de 50-60 cm, según las zonas del humedal.

La alimentación de los humedales se hará mediante tuberías perforadas, que se encontrarán a la cabecera del humedal y distribuirán el caudal de agua lo más homogéneamente posible. Estas tuberías perforadas se encontrarán recubiertas de una capa de cantos gruesos, sobre los que descargarán el agua, reduciéndose así problemas de colmatación del sustrato. El agua recorrerá la longitud de la celda, permaneciendo a una profundidad de 5 cm por debajo de la superficie del sustrato de gravas-arenas (Alianza, 2008).

El agua, tras atravesar el humedal, llegará a otra zona con cantos de gran tamaño, donde varias tuberías abatibles recogerán el agua y lo conducirán hasta un vertedero, desde donde se canalizará para continuar el tratamiento. Estas tuberías abatibles permitirán controlar el nivel de agua en el humedal, a través de su apertura o cierre.

La especie elegida para la plantación en este tipo de humedales ha sido el carrizo (*Phragmites australis*), ya que posee una buena penetración de raíces en el sustrato. Se dispondrán de forma aleatoria, con una densidad aproximada de 4 plantas/m² (Comisión Europea, 2001).

5.5.2 HUMEDAL ARTIFICIAL SUPERFICIAL

Tras sufrir la primera etapa del tratamiento secundario, el agua entra en una nueva fase, con la que se pretende completar el proceso depurador y cumplir con los requisitos legales de vertido, empleando para ello un humedal artificial superficial.

En estos humedales, el agua se encuentra expuesta directamente a la atmosfera y circula a través de los tallos y las raíces de las plantas emergentes instaladas en el

propio humedal. La depuración tiene lugar durante el tránsito de las aguas entre estas estructuras de la planta. Tallos, hojas y raíces actúan como soporte para la fijación de la película bacteriana responsable de los procesos de biodegradación (Alianza, 2008) (Ver Anexo III. Imagen 10).

Al igual que en el caso anterior, la superficie total de humedal, se ha dividido, con el objetivo de distribuir de manera más eficaz el agua. En este caso se ha repartido en 2 celdas de 191x38,2 m. Dichas balsas se encontrarán en paralelo, la una con la otra. Para garantizar el movimiento del agua desde la cabecera a la salida, se ha dispuesto una pendiente del terreno de 1%, al igual que en el proceso anterior.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Volumen	2913	m ³
Nº de celdas	2	-
Alto	0,4	m
Largo	191	m
Ancho	38,2	m
Superficie	7282	m ²

Tabla 13: Dimensionado Humedal Artificial Superficial

De forma similar a los humedales subsuperficiales horizontales, el fondo de estas celdas se ha impermeabilizado con una capa de bentonitas y continuamente una de arenas, para proteger el manto estanco de posibles perforaciones por el sistema radicular de las plantas. Sobre esta superficie de arenas se ha dispuesto una capa de tierra, que actuará como soporte de las macrófitas del humedal.

El abastecimiento de agua al humedal se hará por toda la superficie de la celda, mediante tuberías perforadas, que descargarán directamente al agua del humedal.

En cuanto a la evacuación de estas aguas, ya depuradas, se hará desde varios puntos. En estas salidas, se dispondrán tuberías abatibles, que permitirán controlar la altura de la lámina de agua, en función del agua que se extraiga, manteniéndola entre 0,3-0,4 metros (Alianza, 2008).

Para la plantación, se ha seleccionado un conjunto de varias especies, lo que mejorará la biodiversidad del entorno y la eficacia del proceso depurador. Estas especies son

autóctonas de la zona, impidiendo problemas con especies invasoras y asegurándose una buena adaptación al entorno. Las plantas elegidas han sido: espadaña (*Typha angustifolia*), carrizo (*Phragmites australis*) y junco (*Scirpus lacustris*). Se instalarán con una densidad aproximada de 6 plantas/m² (Ortega de Miguel y col., 2010).

En este tipo de humedales se consigue una alta tasa de eliminación de patógenos, gracias a la acción de la radiación ultravioleta de la luz solar. Al emplearse de una operación de afino, tras un primer tratamiento del agua, se previene la generación de olores y mosquitos, uno de los grandes problemas de este tipo de sistemas.

Los humedales superficiales tienen altas tasas de producción de biomasa, por lo que periódicamente deben llevarse a cabo labores de mantenimiento, en las que se retire una proporción de las plantas o las partes de estas que están en estado de descomposición. Estas actividades son muy importantes de cara a la calidad del efluente, ya que esta biomasa, si no se retira, sufrirá procesos de degradación, incrementándose la DBO₅ del agua.

Finalmente el efluente clarificado será vertido al arroyo del Prado, mediante una tubería que canalizará el agua de ambos humedales.

Tras sufrir el proceso depurativo, el efluente presentará las siguientes características:

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Sólidos suspendidos (SS)	6,57	mg/l
DBO ₅	1,03	mg/l
DQO	9,01	mg/l
Nitrógeno (N)	9	mg/l

Tabla 14: Características estimadas del vertido a cauce

Que cumple con lo dictado por la Directiva 91/271/CEE y pudiéndose considerar de este modo, satisfactorio el diseño de la línea de tratamiento.

6. CONCLUSIONES

Remitiéndose a la legislación vigente y al *Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración 2007-2015* se pretende conseguir la depuración de las aguas residuales de todos los municipios, previo a su vertido a cauce.

El empleo de tratamientos no convencionales para la depuración de aguas residuales en pequeños municipios es una solución factible y económica a esta problemática. Los resultados del presente proyecto lo avalan.

El conocimiento de las características de la zona y su entorno es prioritario a la hora de la confección del proyecto, ya que determinarán su desarrollo y evitará problemas durante la explotación de la instalación.

Además de conseguir la depuración de las aguas residuales, la instalación de un humedal artificial superficial generará muchos beneficios en el entorno:

- Creación de una zona húmeda, generando un nuevo ecosistema, con nuevos nichos ecológicos y por tanto nuevas especies.
- Se podrán llevar a cabo acciones de educación ambiental, aprovechando el nuevo entorno y las nuevas estructuras, con el fin de concienciar a la población de la importancia de la depuración de las aguas y el cuidado de los ecosistemas de ribera.

A parte de estas ventajas, al emplearse tras un tratamiento previo se evitará la generación de malos olores y la proliferación de insectos.

Es de especial importancia conocer la pauta en las oscilaciones de población residente, para poder llevar a cabo una depuración adecuada de las aguas residuales y que no haya problemas en la línea de tratamiento.

7. Bibliografía

- AEMET. (2014). *www.AEMET.es*. Obtenido de Agencia Estatal de Meteorología.
- Alianza, por el. agua. (2008). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. [s.l.]: Ideasmares.
- CHD, Confederación Hidrográfica del Duero. (2013). *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. León.
- Comisión Europea, O. I. (2001). *Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales adaptadas a las pequeñas y medias colectividades*. Luxemburgo: Oficina de las publicaciones oficiales de las comunidades europeas.
- Fernández González y col., J. [s.l.]. *Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Humedales artificiales para depuración*. Madrid.
- Google. (2014). *Google Maps*. Recuperado en 2014, <https://www.google.es/maps/preview>
- IGME, I. T. (1997). *Mapa geológico de España 1:50000. Antigüedad de Cerrato*. Madrid: Graymo S.A.
- INE. (2012). *Instituto Nacional de Estadísticas*. Recuperado en septiembre de 2014, de Padrón Municipal: www.INE.es
- ITC, I. T. (2005). *Depuranat*. Obtenido de http://depuranat.itccanarias.org/index2.php?option=com_tecnologias&func=ver&id=2
- Lara Borrero, J. A. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Martín García y col., I. (2006). *Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población* (Primera edición ed.). [s.l.]: Daute Diseño.
- OPS, (Organización. Panamerica de la Salud) (2005). *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización*. Lima.

- Ortega de Miguel y col., E. (2010). *Manual para la implantación de sistemas de depuración para pequeñas poblaciones*. Madrid.
- Palacios Cenzano y col., G. (2013). *Tratamientos selvícolas preventivos de incendios en la comarca del Cerrato palentino*. Palencia: Junta de Castilla y León.
- Pidre Bocado, J. R. (2010). *Influencia del tipo y granulometría del sustrato en la depuración de las aguas residuales por el sistema de humedales artificiales de flujo vertical y horizontal*. Tesis doctoral. Universidad de Cádiz.
- Red Biodiversidad (2011). *Biodiversidad. Red de gobiernos locales*. Recuperado el 2014, de <http://redbiodiversidad.es/pages/index/diputacion-de-palencia>
- Red Natura, 2000. (2005). *FICHA RESUMEN DE LOS FORMULARIOS OFICIALES DE LA RED NATURA 2000*. [s.l.].
- Salas Rodríguez, J., & Ferrer Medina, Y. (ca. 2013). *Saneamiento y depuración de aguas residuales en pequeñas aglomeraciones*.
- SIGPAC, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2014). *SIGPAC*. Recuperado el 2014, de <http://sigpac.mapa.es/fega/visor/>



ANEXOS

ANEXO I: CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

A. Cálculos de población

Para hallar los habitantes equivalentes en cada periodo del año, se ha utilizado la siguiente fórmula, obtenida del CENTA (Martín García y col., 2006):

$$h - e = \frac{Q \cdot [DBO_5]}{60}$$

Siendo:

$h - e$ = Habitantes equivalentes

Q = caudal (m^3/d)

DBO_5 = Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)

60 = $g DBO_5/d$

$$h - e_{inv} = \frac{78 \cdot 500}{60} = 647 h - e$$

$$h - e_{ver} = \frac{154 \cdot 500}{60} = 1280 h - e$$

B. Caudales

Para el cálculo de caudales, como ya se dijo en el apartado "2.2 DATOS DE PARTIDA Y CARACTERÍSTICAS DEL INFLUENTE" se han tomado datos bibliográficos, obtenidos del CEDEX (Ortega de Miguel y col., 2010) y del CENTA (Martín García y col., 2006).

Inicialmente se hallaron los caudales medios (Q_m) tanto de invierno como de verano, a través de la población del municipio y el abastecimiento de agua requerido por cada habitante. También se consideró que de toda el agua gastada por cada ciudadano, solo el 80% llega al colector. Para mayor seguridad a la hora del dimensionamiento de equipos, se ha considerado un factor de seguridad del 20%.

$$Q_m = \frac{P \cdot (D \cdot P.C) \cdot F.S}{1000}$$

Siendo:

Q_m = caudal medio diario (m^3/d)

P = número de habitantes en cada periodo (hab.)

D = abastecimiento de agua para cada habitante (200 l/hab/dia)

P.C = porcentaje de agua que llega a colector (80%)

F.S = Factor de Seguridad (20%)

$$Q_{minv} = \frac{404 \cdot (200 \cdot 0,8) \cdot 1,2}{1000} = 78 \text{ m}^3/d$$

$$Q_{mver} = \frac{800 \cdot (200 \cdot 0,8) \cdot 1,2}{1000} = 154 \text{ m}^3/d$$

Para conocer los caudales horarios, importantes a la hora del dimensionamiento, se dividirán los caudales diarios entre 24 horas.

$$Q_{mh} = \frac{Q_{md}}{24}$$

$$Q_{mhinv} = \frac{78}{24} = 3,2 \text{ m}^3/h$$

$$Q_{mhver} = \frac{154}{24} = 6,4 \text{ m}^3/h$$

Especialmente importantes para que el diseño de los equipos sea el correcto y pueda soportar caudales superiores al normal. Por ello, se deben calcular los caudales punta.

El CENTA facilita la siguiente ecuación para hallar su valor:

$$Q_p = Q_m \cdot \left(1,15 + \frac{2,575}{Q_m^{0,25}}\right)$$

Así se pueden conocer los caudales punta, tanto horario como diario.

$$Q_{pdi} = 78 \cdot \left(1,15 + \frac{2,575}{78^{0,25}}\right) = 157 \text{ m}^3/d$$

$$Q_{pdv} = 154 \cdot \left(1,15 + \frac{2,575}{154^{0,25}}\right) = 290 \text{ m}^3/d$$

$$Q_{phi} = 3,2 \cdot \left(1,15 + \frac{2,575}{3,2^{0,25}}\right) = 9,85 \text{ m}^3/h$$

$$Q_{phv} = 6,4 \cdot \left(1,15 + \frac{2,575}{6,4^{0,25}}\right) = 17,8 \text{ m}^3/h$$

C. Composición del vertido

Para conocer los niveles de los contaminantes en el vertido se ha procedido a multiplicar los valores medios, ofrecidos por el CEDEX (Ortega de Miguel y col., 2010), por los caudales en cada periodo. A través de la siguiente ecuación:

$$\text{Parámetro} \left(\frac{kg}{d}\right) = \frac{\text{Parámetro}}{1000} \cdot Q_m$$

A continuación se detallará, como ejemplo, el cálculo de la DBO_5 , tanto para invierno como para verano, ya que los caudales son diferentes y por tanto el nivel de contaminación también lo será. Para el resto de parámetros los cálculos son iguales.

$$DBO_{5_{inv}} = \frac{500}{1000} \cdot 78 = 38,78 \text{ kg/d}$$

$$DBO_{5_{ver}} = \frac{500}{1000} \cdot 154 = 76,80 \text{ kg/d}$$

D. Pretratamiento

- Desbaste de gruesos

Basándose en *CEDEX* (Ortega de Miguel y col., 2010) lo primero que hay que hallar es la anchura del canal para la que la velocidad del agua es la adecuada. Para ello, facilita la siguiente ecuación y varios datos obtenidos de otras plantas de tratamiento:

$$W = \frac{Q}{V \cdot H} \cdot \frac{E + e}{E} \cdot C$$

Dónde:

- W= anchura (m)
- Q= caudal máximo (m^3/s) = 0,4 m^3/s
- V= velocidad máxima de paso = 1,4 m/s
- H = nivel aguas arriba de la reja (m) = 1 m
- e= ancho de barrotes (mm) = 18 mm
- E= luz entre barrotes (mm) = 25 mm
- C= Coeficiente de seguridad = 1,3

$$W = \frac{0,4}{1,4 \cdot 1} \cdot \frac{25 + 18}{25} \cdot 1,3 = 0,64 \text{ m}$$

Se ha elegido el caudal máximo de $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ para considerar momentos de elevado caudal debidos a episodios de lluvia. Se hace así una estimación de un caudal superior, momento en que las exigencias del desbaste y del sedimentador serán superiores.

Para el desbaste de finos se empleará la misma fórmula, solo se variarán los siguientes valores:

- e = ancho de barrotes (mm) = 12 mm
- E = luz entre barrotes (mm) = 8 mm

$$W = \frac{0,4}{1,4 \cdot 1} \cdot \frac{12 + 8}{12} \cdot 1,3 = 0,62 \text{ m}$$

Como ambas cifras son muy parecidas, se elegirá un valor medio. Por tanto $W = 0,63 \text{ m}$.

El otro parámetro que se necesita conocer para dimensionar el canal de desbaste, es la longitud del mismo que asegure un tiempo de residencia adecuado.

$$L = T_r \cdot v$$

Siendo:

- L = longitud del canal (m)
- T_r = tiempo de retención (s) = 10 segundos
- V = velocidad de aproximación (m/s) = $0,9 \text{ m/s}$

$$L = 10 \cdot 0,9 = 9 \text{ m}$$

Finalmente se hallará la altura de agua en el canal, empleando la siguiente ecuación:

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

Dónde:

- H = altura del agua en el canal (m)
- Q = caudal (m^3/s) = $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$

- $V =$ velocidad del agua en el canal (m/s) = 0,9 m/s
- $W =$ ancho del canal (m) = 0,6 m

$$h = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{1}{0,6} = 0,74 \text{ m}$$

Por lo tanto, como la altura mínima es de 0,74 m, se considerará una altura del canal de 1 metro.

- **Desarenador**

Para el dimensionado del desarenador se emplearán datos típicos para el diseño de estos equipos (Ortega de Miguel y col., 2010). Los valores tomados inicialmente son los siguientes:

- $v =$ Velocidad horizontal = 0,3 m/s
- $t_r =$ tiempo de retención = 60 segundos
- $h =$ altura de la lámina de agua = $L/20$
- $L =$ longitud del desarenador

A partir de estos datos y los valores del caudal, se ha procedido al cálculo. Se han empleado los caudales punta del periodo invernal, ya que será durante esta época cuando se utilizará uno solo de los desarenadores. En la época estival, cuando se duplica la población y el consumo, se emplearán 2 de ellos. $Q = 0,4 \text{ m}^3/\text{s}$

Inicialmente se halló el área transversal (S_t) del desarenador, a partir de la siguiente ecuación:

$$S_t = \frac{Q}{v}$$

$$S_t = \frac{0,4}{0,3} = 1,33 \text{ m}^2$$

Empleando el valor del tiempo de retención (t_r), puede despejarse el volumen del equipo:

$$t_r = \frac{Vol}{Q}$$

$$60 = \frac{Vol}{0,4} \rightarrow Vol = 60 \cdot 0,4 = 24 \text{ m}^3$$

Usando una variante de la anterior ecuación (S_t) y modificándola ligeramente, puede hallarse el valor de la longitud del desarenador.

$$\text{Si } S_t = h \cdot B \text{ y } Vol = h \cdot B \cdot L$$

Entonces:

$$S_t = \frac{Vol}{L} \rightarrow L = \frac{24}{1,33} = 18 \text{ m}$$

A partir del valor de la longitud del canal, y empleando la relación L:h facilitadas por el CEDEX (Ortega de Miguel y col., 2010), se pueden hallar fácilmente sus medidas.

$$h = \frac{L}{20} = \frac{18}{20} = 0,9 \text{ m}$$

$$B = \frac{Vol}{h \cdot L} = \frac{24}{18 \cdot 0,9} = 1,5 \text{ m}$$

Se tomará como altura efectiva de desarenador 1 metro.

Para conocer la superficie horizontal (S) del equipo, se empleará la siguiente fórmula:

$$S = L \cdot B$$

$$S = 18 \cdot 1,5 = 27 \text{ m}^2$$

- **Tanque homogeneizador**

Para el cálculo del tanque homogeneizador se han contemplado los caudales de entrada y de salida al mismo. Para ello, se ha supuesto que el caudal de entrada será el caudal punta y el caudal de salida el caudal medio. De este modo se podrá tener la seguridad que el tanque podrá soportar estas puntas de caudal.

Los datos de caudal están tomados de la época estival, que es cuando estos serán mayores.

- Q_e = caudal de entrada = $290 \text{ m}^3/\text{d}$
- Q_s = caudal de salida = $153 \text{ m}^3/\text{d}$
- TRH= Tiempo Hidraulico de Residencia = 1 día
- V = volumen del tanque
- F.S = Factor de Seguridad = 1,2

$$V = ((Q_e - Q_s) \cdot TRH) \cdot FS$$

$$V = ((290 - 153) \cdot 1) \cdot 1,2 = 165 \text{ m}^3$$

Se ha supuesto una altura del tanque de 4 metros, para evitar condiciones anaerobias en el tanque, y que este tiene base cuadrada. Por lo que la relación B:L es de 1:1.

$$V = h \cdot B \cdot L$$

$$165 = 4 \cdot x^2$$

$$x = \sqrt{\frac{130}{4}} = 6,43 \text{ m}$$

E. Tratamiento primario

Los valores de la composición del agua de entrada al tratamiento primario son los siguientes:

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
DBO ₅ influente	500	mg/l
SST influente	120	mg/l
N influente	75	mg/l

Tabla 15: Características del influente a tratamiento primario

Para el diseño del tanque Imhoff se emplearán los criterios facilitados por el CEDEX (Ortega de Miguel y col., 2010):

- **Decantador**
 - Carga hidráulica (C.H) = 1 m/h
 - TRH = 1,5 h

Sabiendo que el caudal punta en invierno (Q_p) es 9,84 m³/h:

$$Vol = Q \cdot TRH$$

$$Vol = 9,84 \cdot 1,5 = 14,76 \text{ m}^3 = 15 \text{ m}^3$$

A partir de la carga hidráulica podemos conocer el área del decantador:

$$C.H = \frac{Q}{A} \rightarrow A = \frac{Q}{C.H}$$

$$A = \frac{9,84}{1} = 9,84 \text{ m}^2 = 10 \text{ m}^2$$

$$h = \frac{Vol}{A} = \frac{15}{10} = 1,5 \text{ m}$$

A partir de la relación L:B de 3:1 puede hallarse sus valores

$$B = \sqrt{\frac{10}{3}} = 1,85 \text{ m}$$

$$L = 3B = 5,6 \text{ m}$$

- **Digestor**

- Volumen necesario (Ortega de Miguel y col., 2010): $0,07 \text{ m}^3/\text{h-e}$

H-e en invierno = 647 h-e.

$$Vol = h - e \cdot 0,07$$

$$Vol = 647 \cdot 0,07 = 45,3 \text{ m}^3$$

Suponiendo una altura del digestor del tanque Imhoff de 4 metros y la relación L:B de 3:1:

$$Vol = B \cdot 3B \cdot h$$

$$45,3 = 3B^2 \cdot 4 \rightarrow B^2 = \frac{45,3}{4 \cdot 3} = \sqrt{3,8}$$

$$B = 1,95 \text{ m} = 2 \text{ m}$$

$$L = 3B = 3 \cdot 2 = 6 \text{ m}$$

F. Tratamiento secundario

- Humedal artificial subsuperficial horizontal

Los valores de entrada tras el tratamiento primario son los siguientes:

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
DBO ₅ influente	350	mg/l
SST influente	54	mg/l
N influente	64	mg/l

Tabla 16: Características del influente al humedal artificial subsuperficial horizontal

Para conocer la superficie necesaria de humedal, se empleará la fórmula facilitada por (Ortega de Miguel y col., 2010), como algunos de los valores, obtenidos del mismo documento:

$$S = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{C_i}{C_e}\right)}{K_t \cdot h \cdot \varphi_s}$$

Siendo:

- S = superficie necesaria del humedal (m²)
- Q = caudal de alimentación (m³/d) = 290 m³/d
- C_i = concentración del contaminante en el influente (mg/l) = 375 mg/l
- C_e = concentración del contaminante en el efluente (mg/l)
- K_t = cte de reacción dependiente de la temperatura (d⁻¹)
- h = profundidad de la lámina de agua (m) = 0,5 m
- φ_s = porosidad del sustrato filtrante (tanto por 1) = 0,35

Para conocer K_t se empleará la siguiente expresión:

$$K_t = K_r \cdot \theta_R^{(T_w - T_r)}$$

Dónde:

- K_R = cte de reacción a la temperatura de referencia ($d-1$) = 1,104
- T_w = temperatura del agua considerada en el diseño ($^{\circ}\text{C}$) = 3,8 $^{\circ}\text{C}$
- T_r = temperatura de referencia a la que se ha calculado el coeficiente θ_R = 20 $^{\circ}\text{C}$
- θ_R = coeficiente de temperatura (adimensional) = 1,06

(Tanto θ_R como K_R o φ_s han sido obtenidos de tablas de (Ortega de Miguel y col., 2010))

$$K_t = 1,104 \cdot 1,06^{(3,8-20)} = 0,43$$

$$S = \frac{290 \cdot \ln\left(\frac{375}{25}\right)}{0,43 \cdot 0,5 \cdot 0,35} = 10.437 \text{ m}^2$$

Nos daría un dimensionado muy grande, además de que la reducción de 375 mg/l a 25 mg/l es técnicamente imposible debido a que supone una reducción del 93% de la DBO. Por ello se planteará una reducción del 80% de la DBO, ya que posteriormente el agua se conducirá a otro humedal, con lo que se conseguirá reducir aún más sus niveles.

$$S = \frac{290 \cdot \ln\left(\frac{375}{75}\right)}{0,4 \cdot 0,5 \cdot 0,35} = 6.668 \text{ m}^2$$

Pero también hay que considerar la reducción del nitrógeno en el agua, muy importante. Por ello, se volverá a calcular la superficie del humedal, pero para este nutriente, por lo que estará ligeramente modificada.

$$S = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{C_i}{C_e}\right)}{K_A}$$

- $C_i = 64 \text{ mg/l}$
- $C_e = 32 \text{ mg/l}$
- $K_A = \text{cte de reacción (m/d)} = 0,025$

Se espera conseguir una reducción del 50% del contenido en nitrógeno del influente, para eliminarse la parte restante, hasta cumplir con los requisitos legislativos, en el humedal superficial.

$$S = \frac{290 \cdot \ln\left(\frac{64}{32}\right)}{0,025} = 8.040 \text{ m}^2 = 8.100 \text{ m}^2$$

Por tanto, se deberá construir un humedal de 8100 m^2 . Esta superficie de humedal se dividirá en varias balsas. La relación L:B en ellas será de 2:1. Por exigencias de espacio se ha decidido dividir esta superficie en 6 balsas de $50 \times 25 \text{ m}$

$$S_2 = \frac{8100}{6} = 1350 \text{ m}^2$$

$$S_3 = 26 \cdot 52 = 1252 \text{ m}^2$$

$$S_2 = 1350 = S_3$$

Entonces:

$$S = 1352 \cdot 6 = 8112 \text{ m}^2$$

Por lo tanto se elegirán esas dimensiones. Para comprobar si las medidas dadas a cada humedal son las adecuadas, se calculará el área transversal que es necesaria. Como son 6 balsas se dividirá el caudal entre 6.

Para conocer el área transversal se empleará la siguiente fórmula:

$$A_s = \frac{Q}{K_s \cdot s}$$

Siendo:

- Q= caudal (m³/d) = 48,5 m³/d
- A_s= área transversal o sección del humedal (m²)
- K_s= conductividad hidráulica del medio filtrante (m/d) = 500 m/d
- s= pendiente del fondo del humedal (m/m) = 0,01

$$A_s = \frac{48,5}{500 \cdot 0,01} = 9,7 \text{ m}^2$$

Área transversal de las balsas ya dimensionadas:

$$A_{s_2} = L \cdot h$$

$$A_{s_2} = 25 \cdot 0,5 = 12,5 \text{ m}^2$$

Como la sección de nuestros humedales es superior, se pueden dar por válidas sus dimensiones.

Teniendo las dimensiones del humedal subsuperficial, se puede calcular la reducción de DBO_5 que se producirá con dicho tamaño:

$$8112 = \frac{290 \cdot \ln\left(\frac{375}{x}\right)}{0,43 \cdot 0,5 \cdot 0,35}$$

$$e^{2,1} = \frac{375}{x}$$

$$x = 43,7 \text{ mg/l}$$

Conocidas las tasas de reducción de los otros elementos, se hallarán los valores de los SST. Para el cálculo de los sólidos suspendido eliminados se empleará la siguiente fórmula (Pidre Bocado, 2010):

$$SS_e = SS_i \cdot (0,1139 + 0,00213 \cdot CHS)$$

Dónde:

- SS_e = concentración de sólidos en suspensión en el efluente (mg/l)
- SS_i = concentración de sólidos en suspensión en el influente (mg/l) = 54 mg/l
- CHS= carga hidráulica superficial (cm/d)

Que se calculará:

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

Siendo:

- $Q = \text{caudal (m}^3/\text{d)} = 290 \text{ m}^3/\text{d}$
- $S = \text{superficie del humedal (m}^2) = 8112 \text{ m}^2$

$$CHS = 100 \cdot \frac{290}{8112} = 3,58 \text{ cm/d}$$

$$SS_e = 54 \cdot (0,1139 + 0,00213 \cdot 3,58) = 6,57 \text{ mg/l}$$

- **Humedal artificial superficial**

Tras calcular las dimensiones de la anterior fase del tratamiento, se dimensionará finalmente el humedal superficial. La composición del agua a la entrada de esta fase es:

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
DBO ₅ influente	43,7	mg/l
SST influente	6,57	mg/l
N influente	32	mg/l

Tabla 17: Características del influente al humedal artificial superficial

Para calcular la superficie de los humedales superficiales se emplea la misma fórmula que anteriormente, pero cambiarán algunas variables:

$$S = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{C_i}{C_e}\right)}{K_t \cdot h \cdot \varphi_s}$$

Se considerará que el 99% del agua que entró en la fase anterior llega a esta etapa. De este modo se dimensionará el equipo para las máximas exigencias. Se hallarán primero las dimensiones para la DBO₅.

- $Q = 287 \text{ m}^3/\text{d}$
- $C_i = 43,15 \text{ mg/l}$
- $C_e = 24 \text{ mg/l}$
- $K_t = 0,264$
 - $K_R = 0,678$
 - $T_w = 3,8^\circ\text{C}$
 - $T_r = 20^\circ\text{C}$
 - $\theta_R = 1,06$

$$K_t = 0,678 \cdot 1,06^{(3,8-20)} = 0,264$$

- $h = 0,4 \text{ m}$
- $\varphi_s = 0,7$

$$S = \frac{287 \cdot \ln\left(\frac{43,7}{24}\right)}{0,264 \cdot 0,4 \cdot 0,7} = 2.328 \text{ m}^2$$

Conocidas las exigencias de superficie para la reducción de la DBO₅ se calculará la necesaria para eliminar el nitrógeno, con la misma fórmula que en el apartado anterior.

$$S = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{C_i}{C_e}\right)}{K_A}$$

- $Q = 287 \text{ m}^3/\text{d}$
- $C_i = 32 \text{ mg/l}$
- $C_e = 9 \text{ mg/l}$
- $K_A = 0,025$

$$S = \frac{287 \cdot \ln\left(\frac{32}{9}\right)}{0,025} = 13.091 \text{ m}^2 = 14.563 \text{ m}^2$$

Por tanto, esta deberá ser la superficie del humedal.

La relación B:L adecuada para este tipo de humedales, es de 1:5 (Ortega de Miguel y col., 2010). Debido a las grandes dimensiones y a que es recomendable hacer más de un compartimento, se dividirá la superficie en 2 balsas similares:

$$S_{1/2} = \frac{14.563}{2} = 7281,5 \text{ m}^2$$

Según las relaciones dadas:

$$B = 38,2 \text{ m}$$

$$L = 191 \text{ m}$$

Conocida la superficie del humedal que se va a construir, se calculará la eliminación de DBO que se conseguirá con dichas dimensiones:

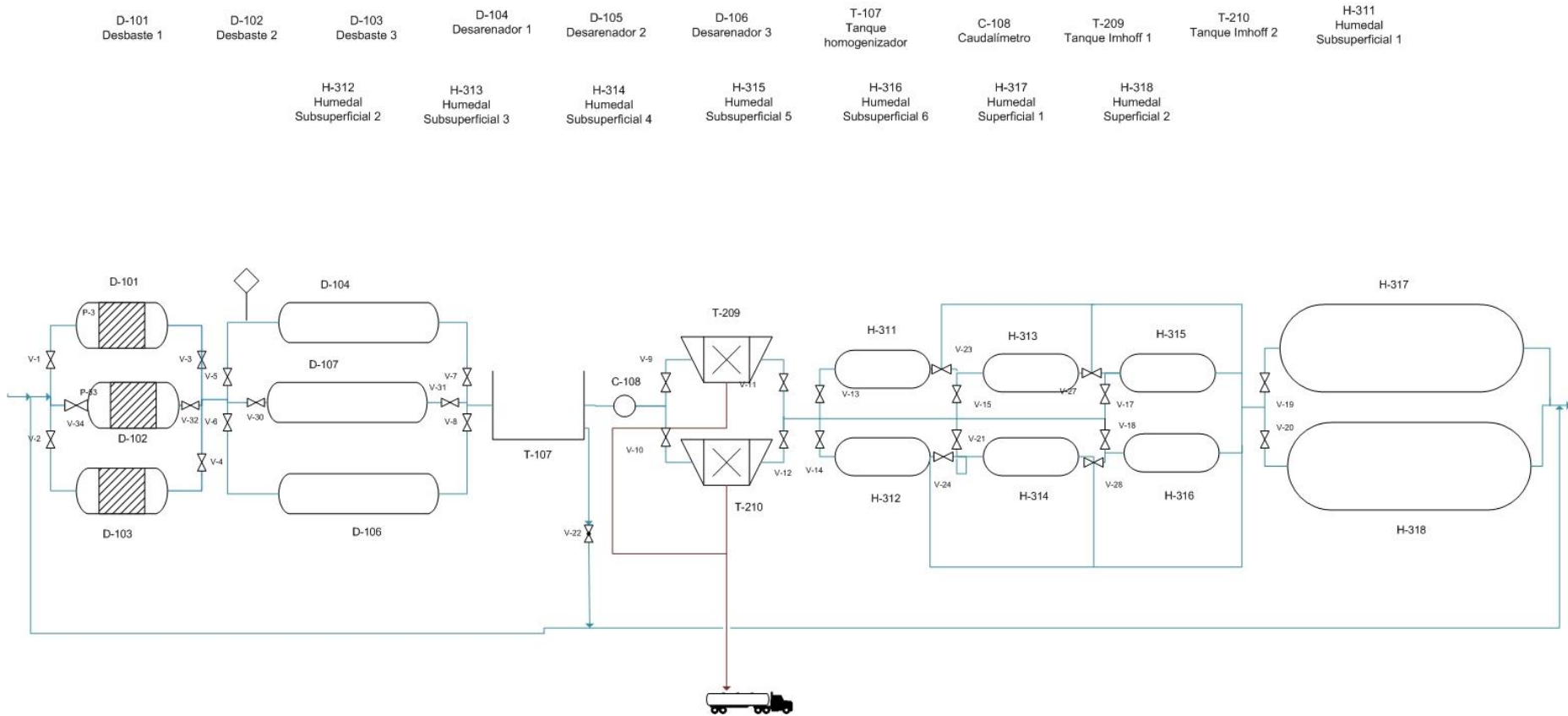
$$14.563 = \frac{287 \cdot \ln\left(\frac{43.15}{x}\right)}{0,264 \cdot 0,4 \cdot 0,7}$$

$$e^{3,75} = \frac{43,7}{x}$$

$$x = 1,03 \text{ mg/l}$$

Obteniéndose un valor por debajo de los parámetros exigidos por la legislación.

ANEXO II: DIAGRAMA DE PROCESOS



ANEXO III: IMÁGENES

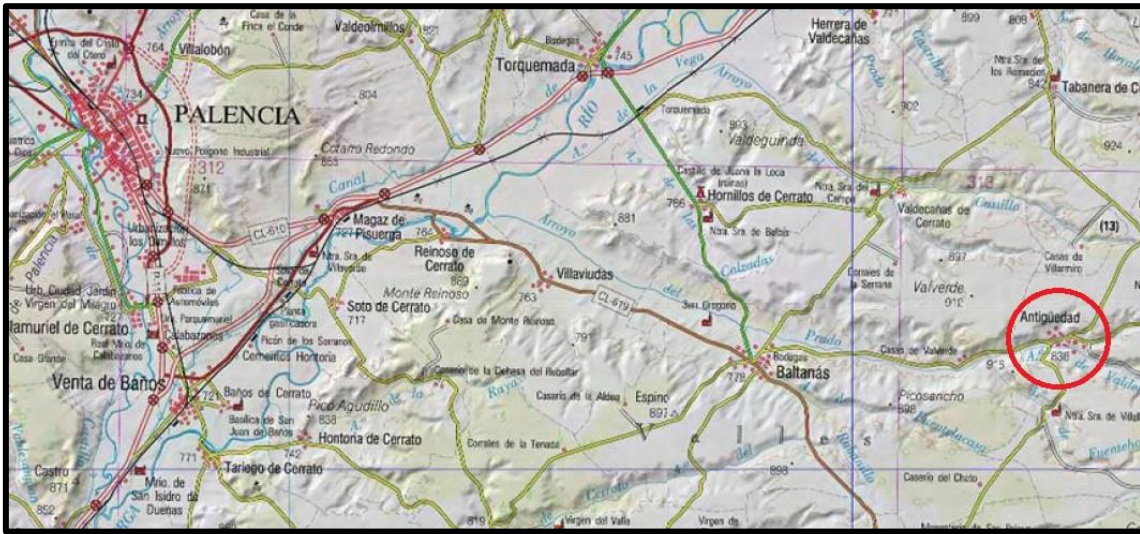


Imagen 1: Situación de Antigüedad de Cerrato (SIGPAC, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014)

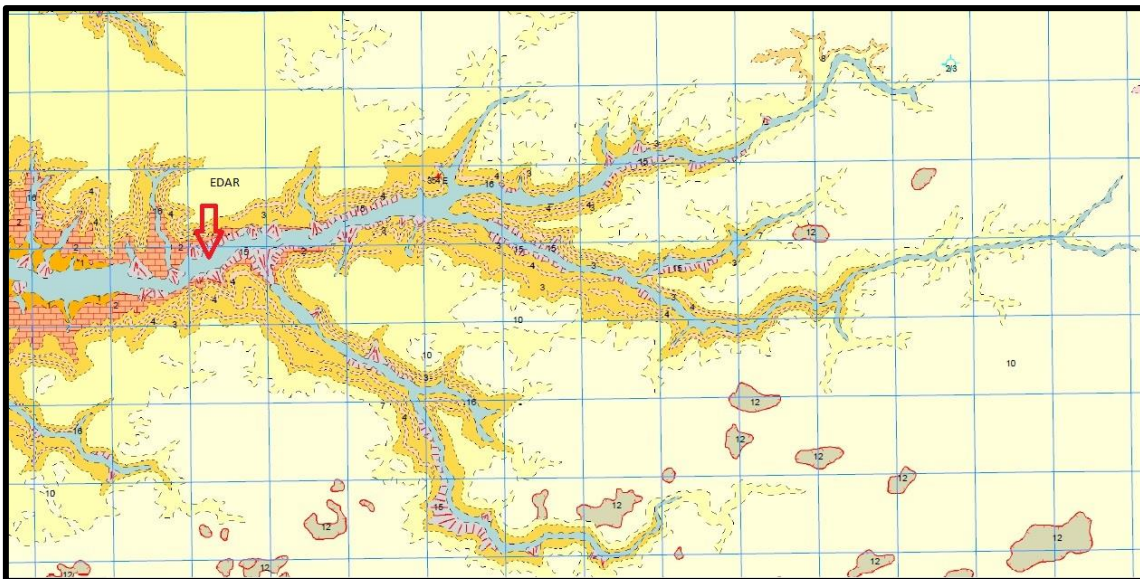


Imagen 2: Mapa geológico (IGME, 1997)

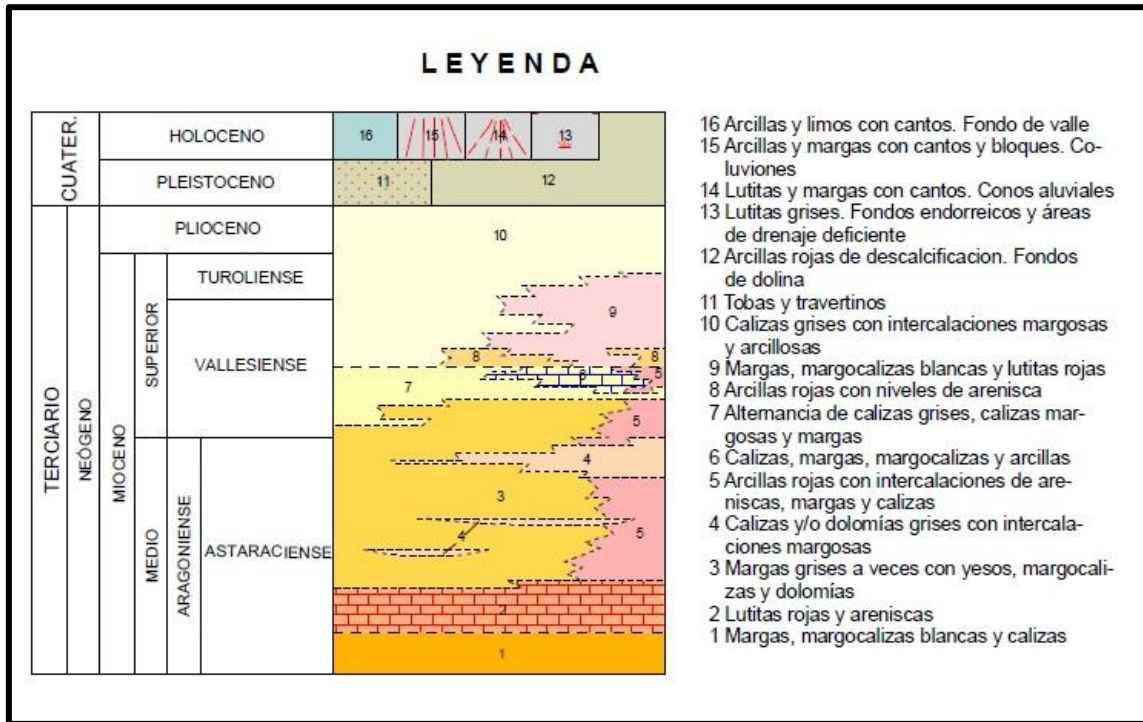


Imagen 3: Leyenda Mapa Geológico (IGME, 1997)

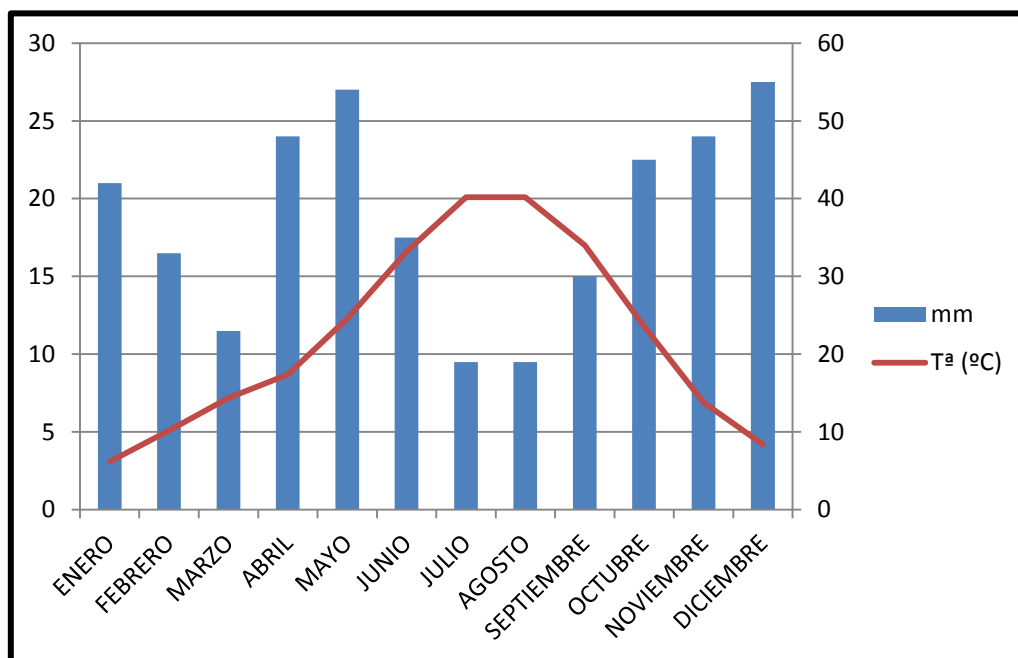


Imagen 4: Climograma estación meteorológica de Venta de Baños (Palencia)



Imagen 5: LIC Montes del Cerrato. (SIGPAC, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014)

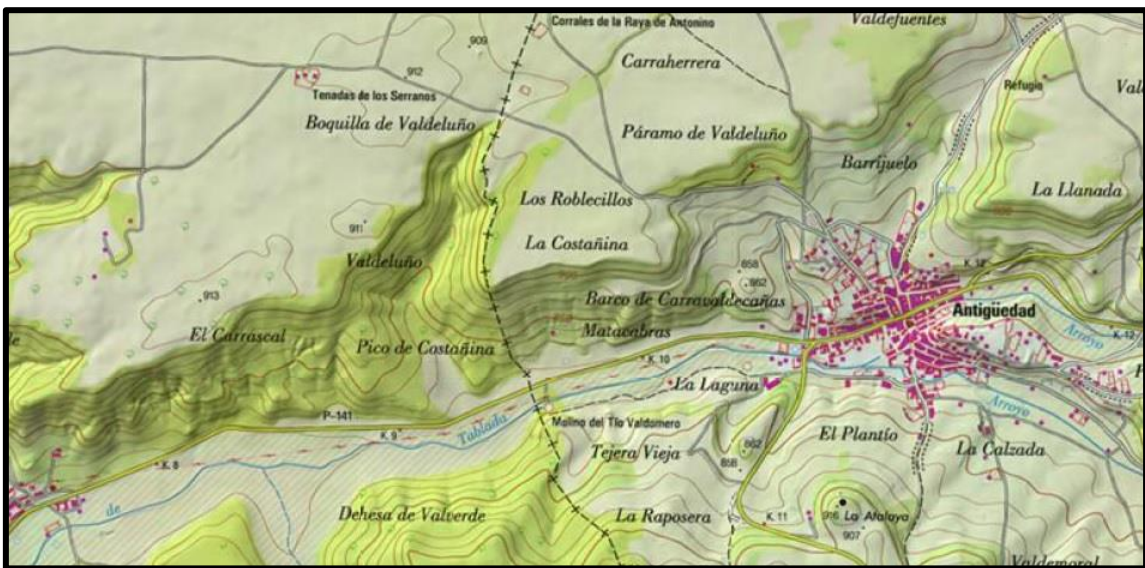


Imagen 6: Limite administrativo de Antigüedad de Cerrato (SIGPAC, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014)



Imagen 7: Ubicación del punto de vertido y de la EDAR. (Google, 2014)

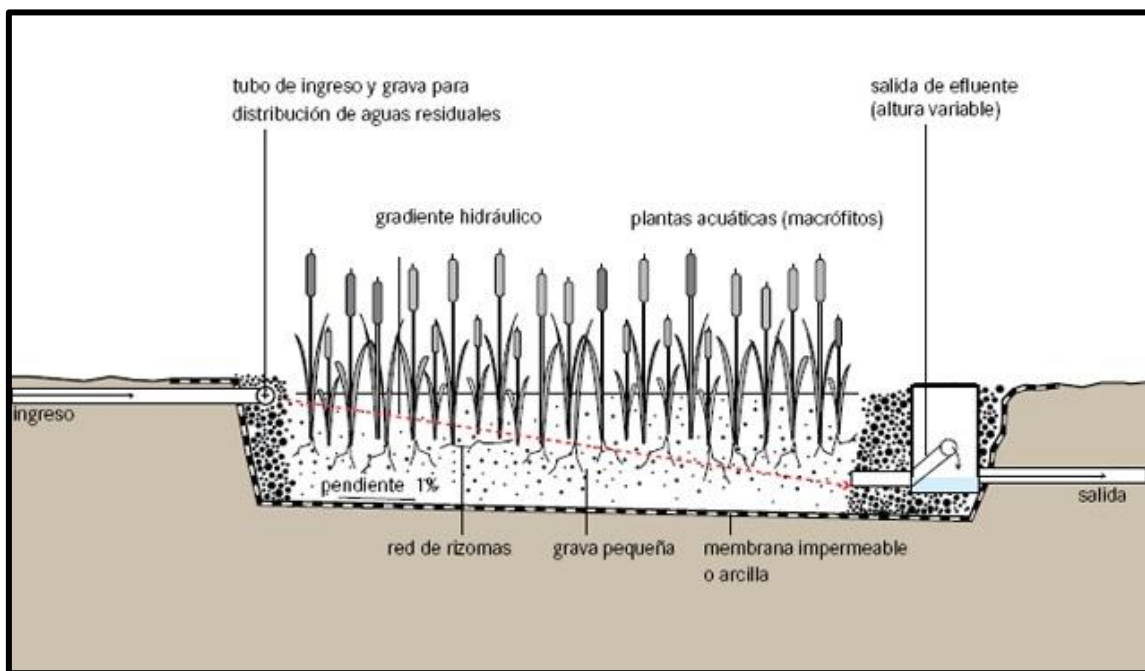


Imagen 8: Esquema de un humedal artificial subsuperficial horizontal (Alianza, 2008)

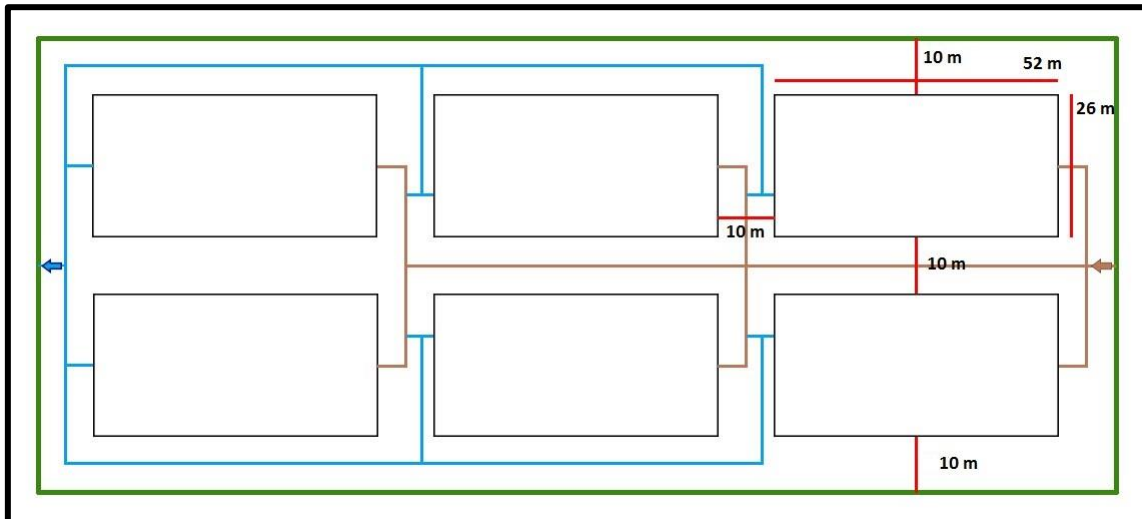


Imagen 9: Distribución de los humedales subsuperficiales horizontales

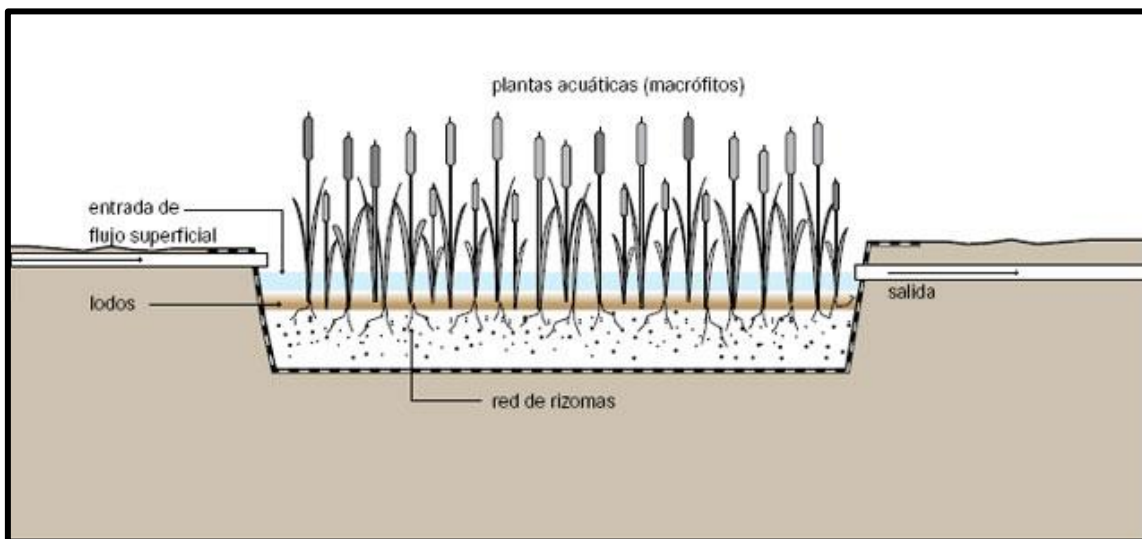


Imagen 10: Esquema de un humedal artificial de flujo superficial (Alianza, 2008)